

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 4: Handling procedures for gases for insulation and/or switching**

**Appareillage à haute tension –
Partie 4: Procédures de manipulation des gaz pour l'isolation et/ou la
commutation**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 4: Handling procedures for gases for insulation and/or switching**

**Appareillage à haute tension –
Partie 4: Procédures de manipulation des gaz pour l'isolation et/ou la
commutation**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.130.10; 29.130.99

ISBN 978-2-8322-4025-0

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

CONTENTS

FOREWORD.....	15
INTRODUCTION.....	17
1 Scope.....	18
2 Normative references	18
3 Terms and definitions	19
3.1 General terms and definitions	19
3.2 Terms and definitions for SF ₆	24
3.3 Terms and definitions for SF ₆ mixtures	24
3.4 Terms and definitions for compressed air.....	25
3.5 Terms and definitions for natural-origin gases.....	26
3.6 Terms and definitions for C ₅ F ₁₀ O (C5-FK) in mixtures with N ₂ , CO ₂ , O ₂ (C5-FK mixtures)	27
3.7 Terms and definitions for C ₄ F ₇ N (C4-FN) in mixtures with N ₂ , CO ₂ , O ₂ (C4-FN mixtures)	28
4 Gas handling during installation, commissioning and after repair or overhaul on site	29
4.1 General.....	29
4.2 Evacuation, filling and quality checking	30
4.3 Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching	33
4.4 Filling sealed pressure systems	35
5 Gas handling during normal service life	35
5.1 Topping-up of gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching.....	35
5.2 Checking the quality of the gas	37
5.2.1 General	37
5.2.2 On-site measurement of the quality of gases with portable measurement equipment.....	37
5.2.3 Sampling and shipment of gases for off-site analysis.....	38
5.3 Rectifying the composition of a gas mixture	38
6 Recovery and reclaiming of gases during maintenance, repair, overhaul or dismantling on-site	39
6.1 General.....	39
6.2 Recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gases from any gas compartment.....	39
6.3 Recovery and reclaiming from any gas compartment containing heavily arced gas.....	41
7 End-of-life of electric power equipment.....	43
7.1 General.....	43
7.2 End-of-life of controlled or closed pressure systems	44
7.3 End-of-life of sealed pressure systems.....	44
7.4 Gas recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems.....	45
7.5 Dismantling of electric power equipment (informative).....	49
Annex A (informative) Sulphur hexafluoride (SF ₆).....	50
A.1 Gas properties	50
A.2 Safety and first aid.....	50
A.2.1 General	50

A.2.2	Protection of personnel.....	51
A.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools.....	53
A.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices.....	53
A.2.5	Personal safety and protective equipment.....	53
A.2.6	Facilities and services	54
A.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of SF ₆	54
A.2.8	First aid equipment and treatment	54
A.3	Environmental impact.....	55
A.4	Training and certification.....	55
A.4.1	General	55
A.4.2	Training	56
A.4.3	Certification	57
A.5	Storage and transportation.....	57
A.5.1	General	57
A.5.2	Storage of containers filled with SF ₆	57
A.5.3	Transportation of containers filled with SF ₆	58
A.5.4	Storage and transportation of electric power equipment containing SF ₆	59
A.5.5	Responsibilities	60
A.6	Description of handling equipment	60
A.6.1	General	60
A.6.2	Filters	61
A.6.3	Vacuum pump.....	62
A.6.4	Main and vacuum compressors.....	63
A.6.5	Outlet compressor	63
A.6.6	External and internal gas storage containers	63
A.6.7	Evaporator and gas storage container heater.....	63
A.6.8	Gas piping and pipe junctions.....	64
A.6.9	Control instruments	64
A.6.10	Safety valves	64
A.6.11	Flexible hose connections.....	64
A.6.12	Portable devices for gas measurement	64
A.6.13	Gas leakage tester	66
A.6.14	Gas concentration alarm systems	66
A.6.15	Gas sampling cylinders.....	67
A.7	Reclaiming procedures	67
A.8	By-products	67
A.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products.....	67
A.10	Handling of SF ₆	67
A.10.1	General	67
A.10.2	Filling gas compartments with SF ₆	67
A.10.3	Topping-up gas compartments with SF ₆ to the filling pressure for insulation and/or switching.....	67
A.10.4	Checking the quality of SF ₆	67
A.10.5	Recovery and reclaim of SF ₆	67
A.11	Specifications for SF ₆ needed for filling or topping-up electric power equipment.....	67
Annex B (informative)	SF ₆ mixtures	68

B.1	Gas properties	68
B.1.1	General	68
B.1.2	Chemical properties	68
B.1.3	Physical properties	68
B.1.4	Insulating and switching behaviour	69
B.2	Safety and first aid	70
B.2.1	General	70
B.2.2	Protection of personnel	70
B.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools	70
B.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices	70
B.2.5	Personal safety and protective equipment	70
B.2.6	Facilities and services	70
B.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of SF ₆ mixtures	70
B.2.8	First aid equipment and treatment	70
B.3	Environmental impact	70
B.4	Training and certification	70
B.4.1	General	70
B.4.2	Training	71
B.4.3	Certification	71
B.5	Storage and transportation	71
B.5.1	General	71
B.5.2	Storage of containers filled with SF ₆ mixture	71
B.5.3	Transportation of containers filled with SF ₆ mixture	73
B.5.4	Storage and transportation of electric power equipment containing SF ₆ mixture	74
B.5.5	Responsibilities	75
B.6	Description of handling equipment	75
B.6.1	General	75
B.6.2	Filters	77
B.6.3	Vacuum pump	77
B.6.4	Main and vacuum compressors	77
B.6.5	Outlet compressor	77
B.6.6	External and internal gas storage containers	77
B.6.7	Evaporator and gas storage container heater	77
B.6.8	Gas piping and pipe junctions	77
B.6.9	Control instruments	77
B.6.10	Safety valves	77
B.6.11	Flexible hose connections	77
B.6.12	Portable devices for gas measurement	77
B.6.13	Gas leakage tester	78
B.6.14	Gas concentration alarm systems	78
B.6.15	Gas sampling cylinders	79
B.6.16	Gas mixing unit	79
B.7	Reclaiming procedures	79
B.8	By-products	79
B.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products	79
B.10	Handling of SF ₆ mixtures	79
B.10.1	General	79

B.10.2	Filling gas compartments with SF ₆ mixtures	80
B.10.3	Topping-up gas compartments with SF ₆ mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching	80
B.10.4	Checking the quality of SF ₆ mixtures	81
B.10.5	Recovery and reclaim of SF ₆ mixtures	81
B.10.6	Rectifying the composition of SF ₆ mixtures	82
B.11	Specifications for SF ₆ mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment	82
Annex C	(informative) Compressed air	83
C.1	Gas properties	83
C.1.1	General	83
C.1.2	Chemical properties	83
C.1.3	Physical properties	83
C.1.4	Insulating and switching behaviour	84
C.2	Safety and first aid	84
C.2.1	General	84
C.2.2	Protection of personnel	85
C.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools	86
C.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices	86
C.2.5	Personal safety and protective equipment	87
C.2.6	Facilities and services	88
C.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of compressed air	88
C.2.8	First aid equipment and treatment	88
C.3	Environmental impact	89
C.3.1	General	89
C.3.2	Ecotoxicology	89
C.3.3	Ozone depletion	90
C.3.4	Global warming/climate change (greenhouse effect)	90
C.3.5	Environmental impact of by-products	90
C.4	Training and certification	90
C.4.1	General	90
C.4.2	Training	90
C.4.3	Certification	91
C.5	Storage and transportation	92
C.5.1	General	92
C.5.2	Storage of containers filled with compressed air	92
C.5.3	Transportation of containers filled with compressed air	92
C.5.4	Storage and transportation of electrical power equipment containing compressed air	93
C.5.5	Responsibilities	93
C.6	Description of handling equipment	93
C.6.1	General	93
C.6.2	Filters	94
C.6.3	Vacuum pump	95
C.6.4	Main and vacuum compressors	96
C.6.5	Outlet compressor	96
C.6.6	External and internal gas storage containers	96
C.6.7	Evaporator and gas storage container heater	96

C.6.8	Gas piping and pipe junctions	96
C.6.9	Control instruments	96
C.6.10	Safety valves	97
C.6.11	Flexible hose connections	97
C.6.12	Portable devices for gas measurement	97
C.6.13	Gas leakage tester	98
C.6.14	Gas concentration alarm systems	98
C.6.15	Gas sampling cylinders	99
C.6.16	Gas purifying and filling device	99
C.7	Reclaiming procedures	100
C.7.1	General	100
C.7.2	Filtering recommendations	100
C.7.3	Transport of used compressed air in gas cylinders and containers by road	100
C.8	By-products	101
C.8.1	General	101
C.8.2	Decomposition of compressed air	101
C.8.3	Corrosion behaviour of compressed air and its by-products	102
C.8.4	Measures for the removal of by-products	102
C.8.5	Physiological characteristics of by-products	102
C.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products	103
C.9.1	General	103
C.9.2	Formation of by-products and health effects	104
C.10	Handling of compressed air	114
C.10.1	General	114
C.10.2	Filling gas compartments with compressed air	114
C.10.3	Topping-up gas compartments with compressed air to the filling pressure for insulation and/or switching	114
C.10.4	Checking the quality of compressed air	114
C.10.5	Recovery and reclaim of compressed air	115
C.11	Specifications for compressed air needed for filling or topping-up electric power equipment	115
Annex D (informative)	Natural-origin gases	116
D.1	Gas properties	116
D.1.1	General	116
D.1.2	Chemical properties	116
D.1.3	Physical properties	116
D.1.4	Insulating and switching behaviour	117
D.2	Safety and first aid	117
D.2.1	General	117
D.2.2	Protection of personnel	119
D.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools	120
D.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices	120
D.2.5	Personal safety and protective equipment	120
D.2.6	Facilities and services	121
D.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of natural-origin gases	122
D.2.8	First aid equipment and treatment	122
D.3	Environmental impact	123
D.3.1	General	123

D.3.2	Ecotoxicology	123
D.3.3	Ozone depletion	124
D.3.4	Global warming/climate change (greenhouse effect)	124
D.3.5	Environmental impact of by-products	124
D.4	Training and certification	124
D.4.1	General	124
D.4.2	Training	125
D.4.3	Certification	126
D.5	Storage and transportation	126
D.5.1	General	126
D.5.2	Storage of containers filled with natural-origin gases	126
D.5.3	Transportation of containers filled with natural-origin gases	127
D.5.4	Storage and transportation of electrical power equipment containing natural-origin gases	128
D.5.5	Responsibilities	129
D.6	Description of handling equipment	129
D.6.1	General	129
D.6.2	Filters	132
D.6.3	Vacuum pump	133
D.6.4	Main and vacuum compressors	133
D.6.5	Outlet compressor	133
D.6.6	External and internal gas storage container	134
D.6.7	Evaporator and gas storage container heater	134
D.6.8	Gas piping and pipe junctions	134
D.6.9	Control instruments	134
D.6.10	Safety valves	134
D.6.11	Flexible hose connections	134
D.6.12	Portable devices for gas measurement	135
D.6.13	Gas leakage tester	137
D.6.14	Gas concentration alarm systems	137
D.6.15	Gas sampling cylinders	137
D.6.16	Gas mixing unit	137
D.6.17	Gas filling unit	138
D.6.18	Gas recovery unit	138
D.6.19	Used gas storage and transportation devices	138
D.7	Reclaiming procedures	138
D.7.1	General	138
D.7.2	Filtering recommendations	139
D.7.3	Transport of used natural-origin gases in gas cylinders and containers by road	139
D.8	By-products	140
D.8.1	General	140
D.8.2	Decomposition of natural-origin gases	140
D.8.3	Corrosion behaviour of natural-origin gases and their by-products	140
D.8.4	Measures for the removal of by-products	141
D.8.5	Physiological characteristics of by-products	141
D.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products	142
D.9.1	General	142
D.9.2	Formation of by-products and health effects	142

D.10	Handling of natural-origin gases.....	152
D.10.1	General	152
D.10.2	Filling gas compartments with natural-origin gases	152
D.10.3	Topping-up gas compartments with natural-origin gases.....	153
D.10.4	Checking the quality of natural-origin gases.....	153
D.10.5	Recovery and reclaim of natural-origin gases	154
D.10.6	Rectifying the composition of natural-origin gas mixtures.....	154
D.11	Specifications for natural-origin gases needed for filling or topping-up electric power equipment	155
Annex E (informative)	C ₅ F ₁₀ O (C5-FK) in mixtures with N ₂ , CO ₂ , O ₂ (C5-FK mixtures)	156
E.1	Gas properties	156
E.1.1	General	156
E.1.2	Chemical properties.....	156
E.1.3	Physical properties	157
E.1.4	Insulating and switching behaviour	158
E.2	Safety and first aid.....	158
E.2.1	General	158
E.2.2	Protection of personnel.....	159
E.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools.....	161
E.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices	161
E.2.5	Personal safety and protective equipment.....	162
E.2.6	Facilities and services	163
E.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of C5-FK mixtures	163
E.2.8	First aid equipment and treatment	163
E.3	Environmental impact.....	164
E.3.1	General	164
E.3.2	Ecotoxicology	164
E.3.3	Ozone depletion	165
E.3.4	Global warming/climate change (greenhouse effect).....	165
E.3.5	Environmental impact of by-products	165
E.3.6	Decomposition by UV-light in the upper atmosphere	165
E.4	Training and certification.....	165
E.4.1	General	165
E.4.2	Training	166
E.4.3	Certification	167
E.5	Storage and transportation.....	167
E.5.1	General	167
E.5.2	Storage of containers filled with C5-FK or C5-FK mixtures.....	167
E.5.3	Transportation of containers filled with C5-FK or C5-FK mixtures	169
E.5.4	Storage and transportation of electrical power equipment containing C5-FK mixtures	171
E.5.5	Responsibilities	172
E.6	Description of handling equipment	172
E.6.1	General	172
E.6.2	Filters	174
E.6.3	Vacuum pump.....	175
E.6.4	Main and vacuum compressors.....	176

E.6.5	Outlet compressor	176
E.6.6	External and internal gas storage containers	176
E.6.7	Evaporator and gas storage container heater.....	176
E.6.8	Gas piping and pipe junctions	177
E.6.9	Control instruments	177
E.6.10	Safety valves	177
E.6.11	Flexible hose connections.....	177
E.6.12	Portable devices for gas measurement	177
E.6.13	Gas leakage tester	179
E.6.14	Gas concentration alarm systems	179
E.6.15	Gas sampling cylinders.....	179
E.6.16	Gas mixing unit.....	180
E.6.17	Gas filling unit	180
E.6.18	Gas recovery unit	180
E.6.19	Used gas storage and transportation devices.....	181
E.7	Reclaiming procedures	181
E.8	By-products	181
E.8.1	General	181
E.8.2	Decomposition of C5-FK mixtures.....	181
E.8.3	Corrosion behaviour of C5-FK mixtures and their by-products.....	183
E.8.4	Measures for the removal of by-products.....	183
E.8.5	Physiological characteristics of by-products.....	184
E.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products.....	184
E.9.1	General	184
E.9.2	Formation of by-products and health effects	185
E.10	Handling of C5-FK mixtures	194
E.10.1	General	194
E.10.2	Filling gas compartments with C5-FK mixtures.....	194
E.10.3	Topping-up gas compartments with C5-FK mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching	195
E.10.4	Checking the quality of C5-FK mixtures	195
E.10.5	Recovery and reclaim of C5-FK mixtures	196
E.10.6	Rectifying the composition of C5-FK mixtures.....	196
E.11	Specifications for C5-FK mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment	196
Annex F (informative)	C ₄ F ₇ N (C4-FN) in mixtures with N ₂ , CO ₂ , O ₂ (C4-FN mixtures)	197
F.1	Gas properties	197
F.1.1	General	197
F.1.2	Chemical properties.....	197
F.1.3	Physical properties	198
F.1.4	Insulating and switching behaviour	199
F.2	Safety and first aid.....	199
F.2.1	General	199
F.2.2	Protection of personnel.....	200
F.2.3	Handling of contaminated safety equipment and tools.....	202
F.2.4	Pressurised equipment and tools or measuring devices	202
F.2.5	Personal safety and protective equipment.....	202
F.2.6	Facilities and services	203

F.2.7	Additional safety measures in case of sudden release of C4-FN mixtures	203
F.2.8	First aid equipment and treatment	204
F.3	Environmental impact.....	204
F.3.1	General	204
F.3.2	Ecotoxicology	204
F.3.3	Ozone depletion	205
F.3.4	Global warming/climate change (greenhouse effect)	205
F.3.5	Environmental impact of by-products	205
F.3.6	Decomposition by UV-light in the upper atmosphere	206
F.4	Training and certification.....	206
F.4.1	General	206
F.4.2	Training	206
F.4.3	Certification	207
F.5	Storage and transportation.....	208
F.5.1	General	208
F.5.2	Storage of containers filled with C4-FN or C4-FN mixtures	208
F.5.3	Transportation of containers filled with C4-FN or C4-FN mixtures	210
F.5.4	Storage and transportation of electrical power equipment containing C4-FN mixtures	212
F.5.5	Responsibilities	213
F.6	Description of handling equipment	213
F.6.1	General	213
F.6.2	Filters	215
F.6.3	Vacuum pump.....	216
F.6.4	Main and vacuum compressors.....	217
F.6.5	Outlet compressor	217
F.6.6	External and internal gas storage containers	217
F.6.7	Evaporator and gas storage container heater.....	217
F.6.8	Gas piping and pipe junctions	218
F.6.9	Control instruments	218
F.6.10	Safety valves	218
F.6.11	Flexible hose connections.....	218
F.6.12	Portable devices for gas measurement	218
F.6.13	Gas leakage tester	220
F.6.14	Gas concentration alarm systems	220
F.6.15	Gas sampling cylinder	220
F.6.16	Gas mixing unit.....	221
F.6.17	Gas filling unit	221
F.6.18	Gas recovery unit	221
F.6.19	Used gas storage and transportation devices.....	222
F.7	Reclaiming procedures	222
F.8	By-products	222
F.8.1	General	222
F.8.2	Decomposition of C4-FN mixtures.....	222
F.8.3	Corrosion behaviour of C4-FN mixtures and their by-products	224
F.8.4	Measures for the removal of by-products	224
F.8.5	Physiological characteristics of by-products.....	225
F.9	Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products.....	225

F.9.1	General	225
F.9.2	Formation of by-products and health effects	226
F.10	Handling of C4-FN mixtures	234
F.10.1	General	234
F.10.2	Filling gas compartments with C4-FN mixtures	234
F.10.3	Topping-up gas compartments with C4-FN mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching	235
F.10.4	Checking the quality of C4-FN mixtures	236
F.10.5	Recovery and reclaim of C4-FN mixtures	236
F.10.6	Rectifying the composition of C4-FN mixtures	236
F.11	Specifications for C4-FN mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment	236
	Bibliography	237
	Figure 1 – Evacuation, filling and checking of the quality of the gas after filling	31
	Figure 2 – Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching	34
	Figure 3 – Topping-up of a gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching	36
	Figure 4 – Example of recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gas from any gas compartment	40
	Figure 5 – Example of recovery and reclaiming of heavily arced gas from any gas compartment	42
	Figure 6 – End-of-life of controlled or closed pressure systems	44
	Figure 7 – End-of-life of sealed pressure systems	45
	Figure 8 – Gas recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems	46
	Figure 9 – Dilution method	48
	Figure 10 – Dismantling of electric power equipment	49
	Figure A.1 – Pressure-temperature-density diagram for SF ₆	50
	Figure A.2 – Schematic view of an example of a handling equipment for SF ₆	61
	Figure B.1 – Schematic view of an example of a handling equipment for SF ₆ mixture	76
	Figure C.1 – Controlled release of compressed air	94
	Figure C.2 – Example of a gas filling and purifying device	99
	Figure D.1 – Schematic view of an example of a handling equipment for natural origin gases	131
	Figure E.1 – Structure of the C5-FK molecule	156
	Figure E.2 – Vapour pressure curve of C5-FK	157
	Figure E.3 – Schematic view of an example of a handling equipment for C5-FK mixture	173
	Figure F.1 – Structure of the C4-FN molecule	197
	Figure F.2 – Vapour pressure curve of C4-FN	198
	Figure F.3 – Schematic view of an example of a handling equipment for C4-FN mixture	214

Table 1 – Evacuation, filling and checking of the quality of the gas after filling	32
Table 2 – Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching	35
Table 3 – Topping-up of a gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching	37
Table 4 – Sampling and shipment of gases	38
Table 5 – Example of recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gas from any gas compartment.....	41
Table 6 – Example of recovery and reclaiming of heavily arced gas from any gas compartment.....	43
Table 7 – Gas recovery at the end-of-life of sealed pressure systems	47
Table A.1 – Measures when working with SF ₆ electric power equipment.....	51
Table A.2 – Safety measures when opening or accessing gas compartments.....	52
Table A.3 – Examples of container types required for storage and transportation of SF ₆	58
Table A.4 – International regulations for shipment of SF ₆	59
Table A.5 – Gas measuring devices	64
Table B.1 – Main chemical characteristics of CF ₄ and N ₂	68
Table B.2 – Main physical characteristics of CF ₄ and N ₂	69
Table B.3 – Examples of container types required for storage and transportation of SF ₆ mixtures and their complementary gases	73
Table B.4 – International regulations for shipment of SF ₆ mixtures	74
Table B.5 – Gas measuring devices	78
Table C.1 – Main chemical characteristics of N ₂ and O ₂	83
Table C.2 – Typical physical characteristics of N ₂ and O ₂	84
Table C.3 – Measures when working with electric power equipment containing compressed air	85
Table C.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments	86
Table C.5 – Examples of container types required for storage and transportation of compressed air	92
Table C.6 – International regulations for shipment of compressed air.....	93
Table C.7 – Typical filter types used during release of compressed air to the atmosphere.....	95
Table C.8 – Gas measuring devices	97
Table C.9 – Exemplary filtering methods	100
Table C.10 – Typical adsorbents for various compressed air contaminants	100
Table C.11 – OELs for NO ₂ , NO, O ₃ and HNO ₃	106
Table C.12 – Example calculation of a normal leakage	109
Table C.13 – Example calculation of an abnormal leakage.....	111
Table C.14 – Example calculation for maintenance	112
Table D.1 – Main chemical characteristics of N ₂ , O ₂ and CO ₂	116
Table D.2 – Typical physical characteristics of N ₂ , O ₂ and CO ₂	117
Table D.3 – Measures when working with electric power equipment containing natural-origin gases	118
Table D.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments	119

Table D.5 – Examples of container types required for storage and transportation of natural-origin gases	127
Table D.6 – International regulations for shipment of natural-origin gases.....	128
Table D.7 – Typical filter types used during release of natural-origin gases to the atmosphere.....	132
Table D.8 – Gas measuring devices.....	135
Table D.9 – Exemplary filtering operations.....	139
Table D.10 – Typical adsorbents for various contaminants of natural-origin gases	139
Table D.11 – OELs for NO ₂ , NO, O ₃ , CO and HNO ₃	144
Table D.12 – Example calculation of a normal leakage	147
Table D.13 – Example calculation of an abnormal leakage.....	149
Table D.14 – Example calculation for maintenance	150
Table E.1 – Main chemical characteristics C5-FK	157
Table E.2 – Main physical characteristics of C5-FK.....	158
Table E.3 – Measures when working with electric power equipment containing C5-FK mixtures.....	159
Table E.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments.....	160
Table E.5 – Methods for storage of C5-FK	168
Table E.6 – Examples of container types required for storage / transportation of C5-FK	168
Table E.7 – Methods for storage of C5-FK mixtures	169
Table E.8 – Examples of container types required for storage / transportation of C5-FK mixtures.....	169
Table E.9 – International regulations for shipment of C5-FK.....	170
Table E.10 – International regulations for shipment of C5-FK mixtures	171
Table E.11 – Typical filter types	175
Table E.12 – Gas measuring devices	177
Table E.13 – OELs and LC50 values for C5-FK mixtures by-products	182
Table E.14 – Example calculation of a normal leakage.....	189
Table E.15 – Example calculation of an abnormal leakage.....	191
Table E.16 – Example calculation for maintenance	192
Table E.17 – TWA values of gas components	193
Table F.1 – Main chemical characteristics C4-FN.....	198
Table F.2 – Main physical characteristics of C4-FN.....	199
Table F.3 – Measures when working with electric power equipment containing C4-FN mixtures.....	200
Table F.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments.....	201
Table F.5 – Methods for storage of C4-FN	208
Table F.6 – Examples of container types required for storage / transportation of C4-FN	208
Table F.7 – Methods for storage of C4-FN mixtures	209
Table F.8 – Examples of container types required for storage and transportation of C4-FN mixtures	210
Table F.9 – International regulations for shipment of C4-FN.....	210
Table F.10 – International regulations for shipment of C4-FN mixtures	212
Table F.11 – Typical filter types	216
Table F.12 – Gas measuring devices	218

Table F.13 – OELs and LC50 values for C4-FN mixtures by-products	223
Table F.14 – Example calculation of a normal leakage.....	230
Table F.15 – Example calculation of an abnormal leakage	231
Table F.16 – Example calculation for maintenance	232
Table F.17 – TWA values of gas components	233

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 4: Handling procedures for gases for insulation and/or switching

FOREWORD

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

IEC 62271-4 has been prepared by IEC technical committee 17: High-voltage switchgear and controlgear. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition of IEC 62271-4 published in 2013. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) title has been modified;
- b) handling procedures of alternatives to SF₆, which are used for insulation and/or switching, are added;
- c) the main clauses are independent from the type of gas;
- d) for each gas a separate annex describes gas specific information, handling procedures, safety measure, etc.;

- e) information about SF₆ (former Annex E) and about environmental effects of SF₆ and its mixtures (former Annex F) has been moved to IEC 60376;
- f) information about by-products of SF₆ and its mixtures (former Annex G), the procedure for evaluating the potential effects on health of by-products of SF₆ and its mixtures (former Annex H) and the cryogenic reclaim of SF₆ (former Annex I) have been moved to IEC 60480.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
17/1124/FDIS	17/1125/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

A list of all parts in the IEC 62271 series, published under the general title *High-voltage switchgear and controlgear*, can be found on the IEC website.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

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

INTRODUCTION

The International Electrotechnical Commission (IEC) draws attention to the fact that it is claimed that compliance with this document can involve the use of a patent. IEC takes no position concerning the evidence, validity, and scope of this patent right.

The holder of this patent right has assured IEC that s/he is willing to negotiate licences under reasonable and non-discriminatory terms and conditions with applicants throughout the world. In this respect, the statement of the holder of this patent right is registered with IEC. Information can be obtained from the patent database available at <http://patents.iec.ch>.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document can be the subject of patent rights other than those in the patent database. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This document does not purport to address all the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this document to establish appropriate health and safety practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

The gases for insulation and/or switching which are the subjects of this document should be handled in compliance with local regulations, suppliers safety data-sheets, the operating instruction manual of the manufacturer and the safety guidance of the user of the electric power equipment.

Considering the limited information for some of the data which appear in the informative Annex E and Annex F, the reader should be aware that the information related with possible by-products and their possible toxicological effects on health and on the environment is still a matter of study.

Within IEC TC 10 new standards about specifications of technical grade (IEC 63360) and re-use (IEC 63359) for alternatives to SF₆ are being prepared. Therefore, in a later revision of this standard, some of the information will be moved to these new standards, similarly as it has been done for SF₆ and SF₆ mixtures.

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 4: Handling procedures for gases for insulation and/or switching

1 Scope

This part of IEC 62271 applies to the procedures for handling of gases for insulation and/or switching during installation, commissioning, repair, overhaul, normal and abnormal operations and disposal at the end-of-life of electric power equipment.

These procedures are regarded as minimum requirements to ensure the reliability of electric power equipment, the safety of personnel working with these gases and to minimize the impact on the environment. Additional requirements could be given or specified in the operating instruction manual of the manufacturer.

For each gas, which is known to be used in electric power equipment at the date of the publication of this document, a separate annex describes specifications, handling procedures, safety measures, etc. For gases not covered by these annexes the electric power equipment manufacturer should provide the information needed, following the structure of these annexes. Such gases should also be described in a next edition or in amendments to this edition.

NOTE 1 For the use of this document, high-voltage (HV) is defined as the rated voltage above 1 000 V. However, the term medium-voltage (MV) is commonly used for distribution systems with voltages above 1 kV and generally applied up to and including 52 kV.

NOTE 2 Throughout this document, the term “pressure” stands for “absolute pressure”.

NOTE 3 In this document, percentages of gaseous components, contaminants and by-products, are always percentages per volume, measured at 20 °C, if not otherwise indicated.

NOTE 4 Reference is also made to CIGRE Brochure 802 [1] ¹.

NOTE 5 For further details on gases, e.g. ecotoxicology, also refer to the chemical database of the European Chemicals Agency, ECHA (www.echa.europa.eu), which takes the actual tonnage band into consideration.

NOTE 6 If gases for insulation and/or switching are regulated, their designation and regulation origin can be found in the IEC 62474 database (available at <https://std.iec.ch/iec62474> [26]).

NOTE 7 When reference to circuit-breakers is made, only gas circuit-breakers are of interest. When vacuum circuit-breakers are of interest, they are explicitly mentioned.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-212:2010, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 212: Electrical insulating solids, liquids and gases* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-212:2010/AMD1:2015

IEC 60050-212:2010/AMD2:2015

IEC 60050-212:2010/AMD3:2020

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

IEC 60050-426:2020, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 426: Explosive atmospheres* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-441:1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 441: Switchgear, controlgear and fuses* (available at www.electropedia.org)
IEC 60050-441:1984/AMD1:2000

IEC 60335-2-69:2021, *Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-69: Particular requirements for wet and dry vacuum cleaners, including power brush, for commercial use*

IEC 60376:2018, *Specification of technical grade sulphur hexafluoride (SF₆) and complementary gases to be used in its mixtures for use in electrical equipment*

IEC 60480:2019, *Specifications for the re-use of sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures in electrical equipment*

IEC 62271-1:2017, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*
IEC 62271-1:2017/AMD1:2021

ISO 8573-1:2010, *Compressed air – Part 1: Contaminants and purity classes*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-212 and IEC 60050-441, as well as the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1 General terms and definitions

3.1.1

electric power equipment

any high-voltage or medium-voltage equipment containing gas for insulation and/or switching, e.g. switchgear and controlgear, gas-insulated lines, transformers, instrument transformers, etc.

3.1.2

gas

pure gas or gas mixture used for insulation and/or switching within electric power equipment

Note 1 to entry: A gas might contain contaminants.

3.1.3

pure gas

gas made up of identical atoms or molecules used for insulation and/or switching within electric power equipment

Note 1 to entry: A pure gas might contain contaminants.

EXAMPLE SF₆ is a typical example of a pure gas.

3.1.4

gas mixture

gas made up of a minimum of two different pure gases used for insulation and/or switching within electric power equipment

Note 1 to entry: A gas mixture might contain contaminants.

EXAMPLE SF_6/N_2 is a typical example of a gas mixture of two pure gases.

3.1.5

contaminant

foreign substance or material in an insulating liquid, gas or solid

[SOURCE: IEC 60050-212:2010, 212-17-27, modified – "and which usually has a deleterious effect on one or more properties" has been deleted.]

3.1.6

by-product

contaminant which is formed by the degradation of the gas by electrical arcs, corona effect or sparks, or formed by chemical reaction with other substances or materials

3.1.7

flammable gas

gas that, when mixed with air in certain proportions, will form an explosive gas atmosphere

Note 1 to entry: Explosive atmospheres are classified on the basis of the presence of flammable gases and flammable vapours, and frequently a mixture of the two, which is referred to as "flammable gas and vapour".

[SOURCE: IEC 60050-426:2020, 426-02-34]

3.1.8

abnormal leakage

leakage from electric power equipment above the permissible leakage rate ("normal leakage") due to a defect of the electric power equipment or an assembly failure

Note 1 to entry: An abnormal leakage is usually an unwanted and continuous emission of gas at a higher rate than the designed leakage rate of the electric power equipment.

3.1.9

sudden release of a gas

sudden release of the gas from electric power equipment or from a container due to a failure in the pressure system or a mistake in the handling process

Note 1 to entry: A sudden release is an unwanted and sudden emission of gas, e.g. the break of a bushing, the opening of a pressure relief device due to an internal arc failure or the destruction of the electric power equipment.

3.1.10

gas handling equipment

equipment designed or suitable for the handling of a specific gas

3.1.11

handling of a gas

any process which involves transfer and/or treatment of the gas

3.1.12**evacuation**

transfer of air, N₂ or other natural-origin gases into the atmosphere

Note 1 to entry: Below ambient pressure the operation is performed utilising a vacuum pump.

Note 2 to entry: In closed rooms, evacuation of gas compartments filled with N₂ can increase the risk of anoxia, and evacuation of gas compartments filled with CO₂ can increase the risk of intoxication.

3.1.13**recovery of a gas**

process of transferring a gas from a gas compartment into an alternate container (recovery container)

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

3.1.14**topping-up with a gas**

filling a pre-filled or partially filled gas compartment with a gas to the filling pressure (density) for insulation and/or switching at the specified mixing ratio, if applicable

3.1.15**reclaiming of a gas**

process of removing contaminants from a gas

3.1.16**gas-insulated metal-enclosed switchgear**

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

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

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

3.1.17**gas compartment**

compartment of electric power equipment in which the gas pressure is maintained by one of the following systems:

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

3.1.18**container**

vessel (cylinder) suitable for the containment of pressurized gases either in gaseous or liquid phase, according to local and/or international safety and transportation regulations

[SOURCE: IEC 60480:2019, 3.2]

3.1.19**controlled pressure system for gas**

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

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

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.1, modified – Deletion of the Note 2 to entry.]

3.1.20

closed pressure system for gas

volume which is replenished when needed by manual connection to an external gas source

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

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.2]

3.1.21

sealed pressure system

volume for which no further liquid, gas or vacuum processing is required during its expected operating duration

Note 1 to entry: Examples of sealed pressure systems are vacuum circuit-breakers or some MV circuit-breakers or MV switchgear with leakage rates < 0,1 %/a.

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

Note 3 to entry: Expected operating duration starts when the device is sealed.

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.3, modified – Note 1 to entry and Note 2 to entry modified.]

3.1.22

non-arced gas

gas within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

Note 2 to entry: Typical electric power equipment having non-arced gases are: gas-insulated lines, gas-insulated busbars, gas-insulated voltage and current transformers, cable box, gas compartment around a vacuum circuit-breaker.

3.1.23

normally arced gas

gas within a gas compartment or a gas-cylinder that experienced arcing during load current or fault current switching operations

Note 1 to entry: Overheating, for example due to bad contacts, or heavy partial discharge can also lead to decomposition of the gas.

Note 2 to entry: Details on normally arced gases depend on the design of the switchgear and the gas.

Note 3 to entry: Typical electric power equipment having normally arced gases are: any gas compartment containing switching equipment, like earthing switch, disconnector, load-break switch and circuit-breaker.

3.1.24

heavily arced gas

gas within a gas compartment or a gas-cylinder that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker after interruption failure or arcing within a switch after interruption failure or arcing within a circuit-breaker during successful interruption of several short-circuits

Note 1 to entry: Details on heavily arced gases depend on the design of the switchgear and the gas.

3.1.25**filling pressure p_{re} for insulation and/or switching****filling density ρ_{re} for insulation and/or switching**

pressure (in kPa), for insulation and/or for switching, referred to the standard atmospheric air conditions of 20 °C and 101,3 kPa (or density), which may be expressed in relative or absolute terms, to which the assembly is filled before being put into service, or automatically replenished

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.5.1]

3.1.26**partial pressure of a component of a gas mixture**

pressure that a component of a gas mixture would exert if it alone occupied the same volume as the gas mixture at the same temperature

3.1.27**occupational exposure limit****OEL**

maximum concentration of a substance to which a worker can be exposed to without experiencing significant adverse health effects over a given period of time, with possibly different concentration limits for different exposure times

3.1.28**time weighted average value****TWA value**

maximum average workplace concentration of a substance to which workers can be exposed without experiencing significant adverse health effects

Note 1 to entry: As a baseline typically an 8 h per day, 40 h per week, 52 weeks a year, and an occupational working lifetime of > 30 years is used. Excursions in worker exposure levels can exceed three times the TWA value for no more than a total of 30 min during a workday, provided that the STEL value is not exceeded, and under no circumstances they should exceed five times the TWA value, provided that during each workday the TWA value and the C value are not exceeded.

EXAMPLE The substance A can have a TWA value of 100 µl/l (ppmv). If the workplace concentration of substance A is 300 µl/l (ppmv) for the first 20 min, then followed by a workplace concentration of 150 µl/l (ppmv) for the next 30 min, then followed by a workplace concentration of again 300 µl/l (ppmv) for the next 10 min, then followed by a workplace concentration of 75 µl/l (ppmv) for the next 3 h and finally followed by a workplace concentration of 50 µl/l (ppmv) for the last 4 h, then the average workplace concentration is calculated in the following way: average workplace concentration = $(0,33 \times 300 + 0,5 \times 150 + 0,17 \times 300 + 3 \times 75 + 4 \times 50) / 8$ µl/l (ppmv) = 81,25 µl/l (ppmv) < TWA value. It can be concluded, that the TWA value has not been exceeded during the full workday of 8 h and that three times the TWA has not been exceeded for more than a total of 30 min, hence the workplace is safe.

3.1.29**short term exposure value****STEL value**

maximum average workplace concentration of a substance to which workers can be exposed without experiencing significant adverse health effects over a short time period of typically 15 min per day

3.1.30**ceiling value****C value**

maximum workplace concentration, also known as maximum allowable concentration value (MAC value), of a substance to which workers can be exposed that should never be exceeded for any period of time

Note 1 to entry: In the event of a sudden release of a gas, it can be assumed, that the workplace concentration of at least one component of the gas or its by-products exceeds its C value. When the C values of the gas components and their by-products are not defined, it can be assumed, that the workplace concentration of at least one component of the gas or its by-products exceeds its STEL value. In the absence of established C and STEL values, personnel should not be exposed to three times the TWA value for more than a total of 30 min during a workday, and under no circumstances personnel should be exposed to more than five times the TWA value.

3.1.31

LC50 value

statistically derived concentration at which 50 % of the animals are expected to die

3.2 Terms and definitions for SF₆

3.2.1

technical grade SF₆

SF₆ having a very low level of contaminants in accordance with IEC 60376:2018, Table 1

3.2.2

used SF₆

SF₆ that has been introduced into electric power equipment

Note 1 to entry: Information concerning SF₆ by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex B.

3.2.3

used SF₆ suitable for reuse

used SF₆ having a maximum level of contaminants in accordance with IEC 60480:2019, Table 2

3.2.4

non-arced SF₆

used SF₆ within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

3.2.5

normally arced SF₆

used SF₆ that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxyfluorides

3.2.6

heavily arced SF₆

used SF₆ that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after failure to interrupt or arcing within a circuit-breaker after successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products and a medium to large amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxyfluorides

3.3 Terms and definitions for SF₆ mixtures

3.3.1

SF₆ mixture

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

[SOURCE: IEC 60376:2018, 3.1.3]

3.3.2

used SF₆ mixture

SF₆ mixture that has been introduced into electric power equipment

Note 1 to entry: Information concerning SF₆ by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex B.

3.3.3**used SF₆ mixture suitable for reuse**

used SF₆ mixture having a maximum level of contaminants in accordance with IEC 60480:2019

3.3.4**non-arced SF₆ mixture**

used SF₆ mixture within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

3.3.5**normally arcaded SF₆ mixture**

used SF₆ mixture that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxyfluorides

3.3.6**heavily arcaded SF₆ mixture**

used SF₆ mixture that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after failure to interrupt or arcing within a circuit-breaker after successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products and a medium to large amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxyfluorides

3.4 Terms and definitions for compressed air**3.4.1****technical grade compressed air**

filtered or cleaned ambient air with purity classes according to ISO 8573-1, with the minimum purity classes given by the electric power equipment manufacturer

3.4.2**used compressed air**

compressed air that has been introduced into electric power equipment

3.4.3**non-arcaded compressed air**

used compressed air within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

Note 2 to entry: Non-arcaded compressed air can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when releasing non-arcaded compressed air to the atmosphere.

3.4.4**normally arcaded compressed air**

used compressed air that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products, mainly metal oxides

Note 1 to entry: Normally arcaded compressed air can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when releasing normally arcaded compressed air to the atmosphere.

3.4.5

heavily arced compressed air

used compressed air that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after interruption failure or arcing within a circuit-breaker during successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products and medium to large amount of solid by-products, including metal fluorides

Note 1 to entry: Heavily arced air might always be generated during switching operations in circuit-breakers or switches containing non-metallic materials (for example PTFE). After reclaiming, heavily arced compressed air can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when reclaiming and releasing heavily arced compressed air to the atmosphere.

3.5 Terms and definitions for natural-origin gases

3.5.1

natural-origin gases

natural-origin gases are nitrogen (N₂), oxygen (O₂) and carbon dioxide (CO₂), and their mixtures in any combination

3.5.2

technical grade N₂

N₂ having a maximum level of contaminants in accordance with IEC 60376:2018, Table 2

3.5.3

technical grade O₂

O₂ having a maximum level of contaminants of 0,5 % and a maximum humidity concentration of 200 µl/l (ppmv)

3.5.4

technical grade CO₂

CO₂ having a maximum level of contaminants of 0,5 % and a maximum humidity concentration of 200 µl/l (ppmv)

3.5.5

synthetic air

gas mixture formed by 80 % ± 2 % of N₂ and 20 % ± 2 % of O₂

3.5.6

technical grade synthetic air

synthetic air formed by technical grade N₂ and technical grade O₂

3.5.7

used natural-origin gases

natural-origin gases that have been introduced into electric power equipment

3.5.8

used natural-origin gases suitable for reuse

used natural-origin gases having a maximum level of contaminants in accordance with the requirements defined by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual

3.5.9

non-arced natural-origin gases

used natural-origin gases within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

Note 2 to entry: Non-arced natural-origin gases can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when releasing non-arced natural-origin gases to the atmosphere.

3.5.10

normally arced natural-origin gases

used natural-origin gases that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products, mainly metal oxides

Note 1 to entry: Normally arced natural-origin gases can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when releasing normally arced natural-origin gases to the atmosphere.

3.5.11

heavily arced natural-origin gases

used natural-origin gases that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after failure to interrupt or arcing within a circuit-breaker during successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products (not entirely captured by adsorbents) and medium to large amount of solid by-products, including metal fluorides

Note 1 to entry: Heavily arced natural-origin gases might always be generated during switching operations in circuit-breakers or switches containing non-metallic materials (for example PTFE). After reclaiming, heavily arced natural-origin gases can be released to the atmosphere. Local regulations are considered when reclaiming and releasing heavily arced natural-origin gases to the atmosphere.

3.6 Terms and definitions for C₅F₁₀O (C5-FK) in mixtures with N₂, CO₂, O₂ (C5-FK mixtures)

3.6.1

technical grade C5-FK

C5-FK having a level of contaminants of ≤ 0,5 %

Note 1 to entry: The kind and acceptable limits for specific contaminants depend on the production process (therefore depend on the gas manufacturer) and are to be agreed between the manufacturer of the gas and the manufacturer of the electric power equipment.

3.6.2

used C5-FK

C5-FK that has been introduced into electric power equipment

3.6.3

used C5-FK suitable for reuse

used C5-FK having a maximum level of contaminants in accordance with the requirements defined by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual

3.6.4

technical grade C5-FK mixture

mixture of technical grade C5-FK with one or more technical grade carrier gases (N₂, CO₂ and O₂) in a defined mixing ratio

Note 1 to entry: The selected mixing ratio depends on the electric power equipment design, the required ratings and the minimum ambient temperature. Therefore, the requirements of technical grade C5-FK mixture are given by the electric power equipment manufacturer, including maximum level of contaminants and tolerances for the mixture accuracy.

3.6.5

used C5-FK mixture

C5-FK mixtures that have been introduced into electric power equipment

Note 1 to entry: Compression of the mixture to higher pressures as in the electric power equipment might lead to liquefaction of the C5-FK.

3.6.6

used C5-FK mixture suitable for reuse

used C5-FK mixtures complying with the specification given by the electric power equipment manufacturer

Note 1 to entry: Compression of the mixture to higher pressures as in the electric power equipment might lead to liquefaction of the C5-FK. Before reuse care is taken that all C5-FK is evaporated and the mixture is homogenous. This can be done by limiting the compression level or by supporting the evaporation of C5-FK by external heating.

3.6.7

non-arc'd C5-FK mixture

used C5-FK mixture within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

3.6.8

normally arc'd C5-FK mixture

used C5-FK mixture that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products

3.6.9

heavily arc'd C5-FK mixture

used C5-FK mixture that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after failure to interrupt or arcing within a circuit-breaker during successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products and a medium to large amount of solid by-products

3.7 Terms and definitions for C₄F₇N (C4-FN) in mixtures with N₂, CO₂, O₂ (C4-FN mixtures)

3.7.1

technical grade C4-FN

C4-FN having a level of contaminants ≤ 0,5 %

Note 1 to entry: The kind and acceptable limits for specific contaminants depend on the production process (therefore depend on the gas manufacturer) and are to be agreed between the manufacturer of the gas and the manufacturer of the electric power equipment.

3.7.2

used C4-FN

C4-FN that has been introduced into electric power equipment

3.7.3

used C4-FN suitable for reuse

used C4-FN having a maximum level of contaminants in accordance with the requirements defined by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual

3.7.4

technical grade C4-FN mixture

mixture of technical grade C4-FN with one or more technical grade carrier gases (N₂, CO₂ and O₂) in a defined mixing ratio

Note 1 to entry: The selected mixing ratio depends on the electric power equipment design, the required ratings and the minimum ambient temperature. Therefore, the requirements of technical grade C4-FN mixture are given by the electric power equipment manufacturer, including acceptable maximum levels of contaminants and tolerances for the mixture accuracy.

3.7.5

used C4-FN mixture

C4-FN mixtures which have been introduced into electric power equipment

Note 1 to entry: Compression of the mixture to higher pressures as in the electric power equipment might lead to liquefaction of the C4-FN.

3.7.6

used C4-FN mixture suitable for reuse

used C4-FN mixtures complying with the specification given by the electric power equipment manufacturer

Note 1 to entry: Compression of the mixture to higher pressures as in the electric power equipment might lead to liquefaction of the C4-FN. Before reuse care is taken that all C4-FN is evaporated, and the mixture is homogenous. This can be done by avoiding or limiting the compression level or by supporting the evaporation of C4-FN by external heating.

3.7.7

non-arc'd C4-FN mixture

used C4-FN mixture within a gas compartment or gas-cylinder that never experienced arcing and contains no relevant gas decomposition and no relevant solid by-products, but where small quantities of gaseous by-products can be present

Note 1 to entry: Small quantities of gaseous by-products can be present for example when partial discharges have occurred in the gas.

3.7.8

normally arc'd C4-FN mixture

used C4-FN mixture that experienced arcing during load current or fault current switching operations and contains typically not more than 1 % of gaseous by-products and a small amount of solid by-products

3.7.9

heavily arc'd C4-FN mixture

used C4-FN mixture that experienced an internal arc fault or arcing within a circuit-breaker or switch after failure to interrupt or arcing within a circuit-breaker during successful interruption of several short-circuits and contains typically more than 1 % of gaseous by-products and a medium to large amount of solid by-products

4 Gas handling during installation, commissioning and after repair or overhaul on site

4.1 General

Clause 4 provides guidance on working with gases after the electric power equipment has been installed, overhauled or repaired on site. Safety and environmental aspects might be different for different gases. More information is given in the related annexes. Personal protective equipment shall be worn.

4.2 Evacuation, filling and quality checking

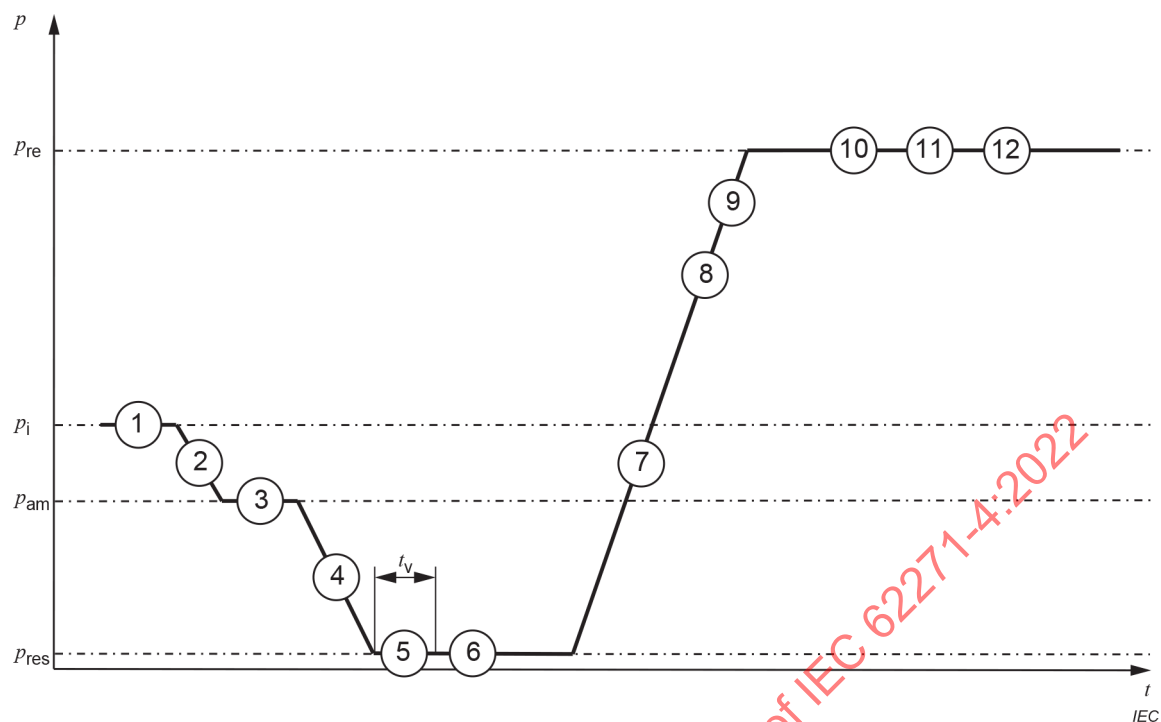
This subclause applies to gas compartments of closed pressure systems after assembly, repair or overhaul, where the gas compartments contain air at ambient pressure or – as an intermediate step before its final commissioning – were filled with N₂ at typically 100 kPa to 150 kPa.

The following detailed sequence of operations for air or N₂ evacuation and filling of gas in each gas compartment shall be performed according to Figure 1 and Table 1, except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

Suitable precautions should be taken to avoid inadvertent filling with the wrong gas.

NOTE Filling gas compartments with N₂ at slight overpressure after assembly, repair or overhaul as an intermediate step before their final commissioning can be useful to keep the gas compartment clean and avoid corrosion.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

**Key**

1 Prepare handling equipment and documentation report	p_{re}	Filling pressure/density for insulation and/or switching
2 Reduce pressure to ambient pressure	p_i	Initial pressure
3 Adsorber installation (optional step)	p_{am}	Ambient pressure
4 Evacuation	p_{res}	Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5 Vacuum stabilisation phase	t_v	Vacuum stabilisation time ≥ 30 min
6 Vacuum holding phase (optional step)		
7 Filling to filling pressure/density for insulation and/or switching		
8 Calibration of pressure/density sensor (optional step)		
9 Functional test of pressure/density sensor		
10 Tightness inspection		
11 Quality checking		
12 Documentation		

Figure 1 – Evacuation, filling and checking of the quality of the gas after filling

Table 1 – Evacuation, filling and checking of the quality of the gas after filling

Step		Procedure
1	Prepare handling equipment and documentation report	Check that the handling equipment is working properly, and the gas connections are clean and dry to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration. Prepare documentation report to record the relevant data during evacuation, filling and checking of the quality. Examples of parameters that could be recorded are: • date • name of the manufacturer • serial number, electric power equipment and gas compartment type • evacuation pressure (i.e. the residual air content) • ambient temperature • functionality of the pressure/density sensor • quality of the gas
2	Reduce pressure to ambient pressure	If applicable, use suitable device to reduce the overpressure used for transport to ambient pressure.
3	Adsorber installation (optional step)	If applicable, quickly insert the adsorber material in the gas compartment and immediately start with step 4.
4	Evacuation	Connect the vacuum pump and leave it running to reach $\leq 0,5$ kPa or the value specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. The value of 0,5 kPa is a recommended value, which can be easily reached by typical vacuum pumps. Also, a low residual pressure is advantageous to reduce the remaining humidity inside the gas compartment. For some gases a higher residual value, e.g. 2 kPa, might be acceptable, as long as the maximum level of contaminants at filling pressure will not be exceeded.
5	Vacuum stabilisation phase	Leave the vacuum pump running for at least 30 min and then disconnect the vacuum pump by closing the valve. Read the pressure gauge. ^a
6	Vacuum holding phase (optional step)	The pressure in the gas compartment should remain stable for the time which can be specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.
7	Filling to filling pressure/density for insulation and/or switching	See the corresponding annex for filling of the gas.
8	Calibration of pressure/density sensor (optional step)	Calibration is an optional step, which might be performed during filling or at any other stage.
9	Functional test of pressure/density sensor	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation should be performed during or just after the filling operation.
10	Tightness inspection	Check the tightness of at least all permanent connections made on site as requested in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^b
11	Quality checking	Quality checking typically comprises the following measurements: gas purity, the mixing ratio of gas mixtures and humidity. Quality checking shall start after a certain waiting time. See the corresponding annex for checking the quality of the gas and the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^c
12	Documentation	Record at least the name of the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the quality of the gas, the ambient temperature and the date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.

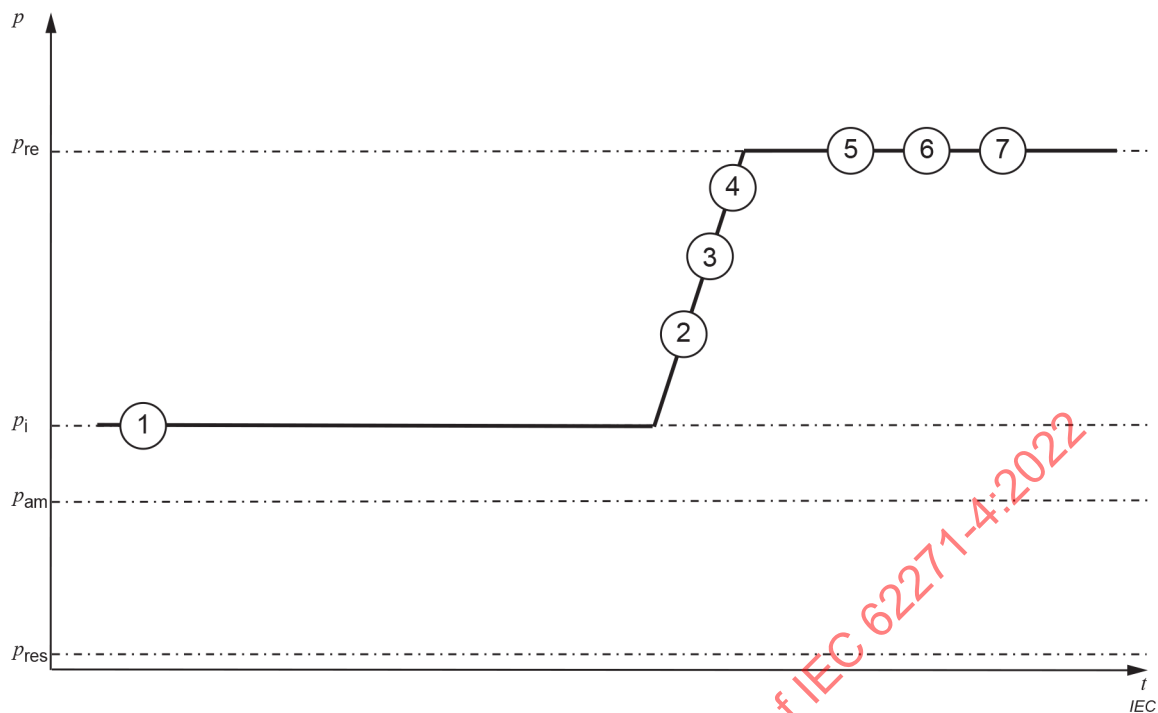
- ^a The vacuum duration can be prolonged in order to better remove moisture when for example the ambient temperature is freezing, except as otherwise specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual.
- ^b Tightness tests of equipment filled with compressed air or natural-origin gases can require additional steps, e.g. sniffing tests with helium.
- ^c If the gas compartment has a small volume, topping-up after quality checking can be required.

4.3 Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching

This subclause applies to gas compartments of closed pressure systems pre-filled in the factory prior to shipment and intended to be filled to the filling pressure for insulation and/or switching on site. They contain a gas at a typical pressure between 120 kPa and 150 kPa allowing for a faster and easier commissioning on site. The manufacturer shall document and make available the quality of the gas, which is pre-filled in the factory, including the mixing ratio for gas mixtures.

The following detailed sequence of operations for topping-up of gases in each pre-filled gas compartment shall be performed according to Figure 2 and Table 2, except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022



Key

1 Prepare handling equipment	p_{re}	Filling pressure/density for insulation and/or switching
2 Topping-up to the filling pressure/density for insulation and/or switching	p_i	Initial pressure
3 Calibration of pressure/density sensor (optional step)	p_{am}	Ambient pressure
4 Functional test of pressure/density sensor	p_{res}	Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5 Tightness inspection		
6 Quality checking		
7 Documentation		

Figure 2 – Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching

Table 2 – Topping-up of pre-filled gas compartments to the filling pressure/density for insulation and/or switching

Step		Procedure
1	Prepare handling equipment	Check that the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Topping-up	See the corresponding annex for topping-up of the gas.
3	Calibration of pressure/density sensor (optional step)	Calibration is an optional step, which might be performed during filling or at any other stage.
4	Functional test of pressure/density sensor	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation should be performed during or just after the filling operation.
5	Tightness inspection	Check the tightness of at least all permanent connections made on site as requested in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.
6	Quality checking	Quality checking typically comprises the following measurements: gas purity, the mixing ratio of gas mixtures and humidity. Quality checking shall start after a certain waiting time. See the corresponding annex for checking the quality of the gas and the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^a
7	Documentation	Record at least the name of the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the quality of the gas, the ambient temperature and the date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.
^a If the gas compartment has a small volume, topping-up after quality checking can be required.		

4.4 Filling sealed pressure systems

The large majority of medium-voltage switchgear and controlgear uses sealed pressure systems, as defined in 3.1.21. Typically, this type of electric power equipment is filled with gas in the factory and no further handling is foreseen during its expected operating life.

5 Gas handling during normal service life

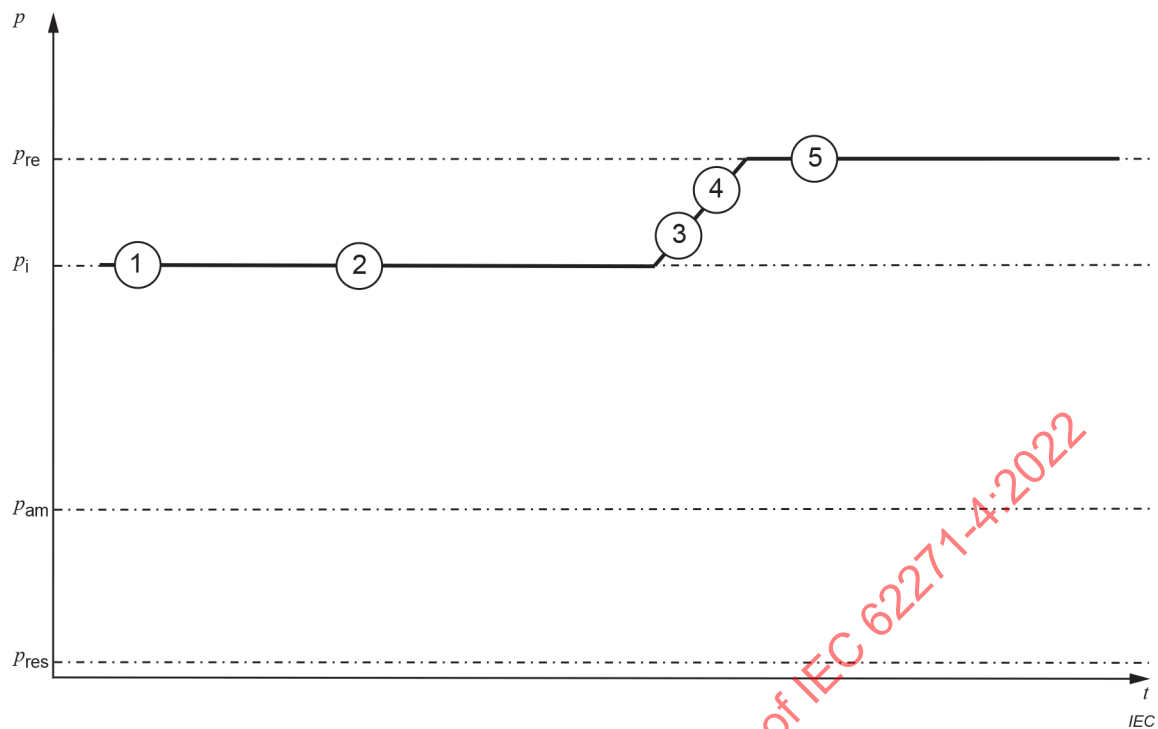
5.1 Topping-up of gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching

This subclause applies to gas compartments of closed pressure systems to assure continuity of service. Usually, the pressure/density monitor generates an alarm/indication due to too low pressure/density. The alarm value shall be proposed by the electric power equipment manufacturer.

In case the low pressure/density alarm is due to an abnormal leak, appropriate corrective measures to locate and eliminate the leak shall be immediately arranged. The alarm treatment should be performed according to the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

A quality check, including a check of the mixing ratio, is recommended for gas mixtures (see 5.2).

The following detailed sequence of operations for topping-up in each gas compartment shall be performed according to Figure 3 and Table 3, except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.



Key

1	Identify the nature of the pressure/density change	p_{re}	Filling pressure/density for insulation and/or switching
2	Prepare handling equipment	p_i	Initial pressure
3	Topping-up to the filling pressure/density for insulation and/or switching	p_{am}	Ambient pressure
4	Pressure/density sensor functional test	p_{res}	Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5	Documentation		

Figure 3 – Topping-up of a gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching

Table 3 – Topping-up of a gas to the filling pressure/density for insulation and/or switching

Step		Procedure
1	Identify the nature of the pressure/density change	Compare the actual gas pressure/density values with the recorded values of the last report including pressure/density trending if available. In case a low pressure/density alarm is due to an abnormal leak, appropriate corrective measures to locate and eliminate the leak shall be immediately arranged. A quality check, including a check of the mixing ratio, is recommended (see 5.2).
2	Prepare handling equipment	Check that the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
3	Topping-up to filling pressure/density for insulation and/or switching	See the corresponding annex for topping-up of the gas.
4	Pressure/density sensor functional test	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation should be performed during the topping-up operation and shall not be considered as a calibration.
5	Documentation	Record at least the name of the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the quality of the gas, the ambient temperature, and the date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.

5.2 Checking the quality of the gas

5.2.1 General

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

Typical quality checks on a gas are the measurement of the humidity concentration (for example frost/dew point at filling pressure for insulation and/or switching), concentration of individual gases, and reactive gaseous by-products giving rise to residual acidity concentration (for example amount of reactive gases in µl/l (ppmv)).

In case high concentration of by-products is expected, care should be taken to avoid damage to the measuring instrument.

5.2.2 On-site measurement of the quality of gases with portable measurement equipment

This subclause applies to gas compartments to check the quality of the gas with portable measurement equipment.

Safety and environmental aspects as well as typical measurement instruments might be different for different gases and more information is given in the related annexes. They shall be respected during quality measurements (for example non-arced N₂ can be released into the atmosphere after its quality measurement, whereas SF₆ shall not be released into the atmosphere after its quality measurement). Be aware that the measurement sample of the gas might contain small amounts of ambient air being added during the connection of the measurement instruments to the sampling point of the electric power equipment.

The measurement procedure shall be described in detail in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. If relevant, additional information is given in the corresponding annexes.

Record information to clearly identify the gas compartment (e.g. manufacturer, switchboard number, project name, serial number, etc.), the readings of the measurement instrument, the ambient temperature and the date for further reference.

5.2.3 Sampling and shipment of gases for off-site analysis

In case unsatisfactory quality measurements are obtained on-site or to gain more detailed results, for instance combined gas-chromatography and mass-spectrometry (GC-MS) can be made off-site.

Safety and environmental aspects for different gases is given in the related annexes. Be aware that the measurement sample of the gas might contain small amounts of ambient air being added during the connection of the sampling instruments to the sampling point of the electric power equipment.

The sequence according to Table 4 shall be performed except if otherwise specified in the handling procedure described in detail by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual and/or by the off-site laboratory and/or in the annex of the corresponding gas.

Table 4 – Sampling and shipment of gases

Step		Procedure
1	Prepare sampling equipment	Evacuate or recover any gas from the sampling equipment (sampling cylinder, hoses, valves, connection fittings and optional waste cylinder) to $\leq 0,1$ kPa. Check that the gas connections are clean and dry and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination of the gas sample. Use short connections and small hose diameters to minimise gas release. Check with the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer and/or the off-site laboratory that the cylinder volume is suitable to perform the sampling.
2	Documentation	Tag the sampling cylinder with at least the following information and keep a record: the manufacturer name, the electric power equipment type reference, the serial number and the gas compartment reference to identify the gas compartment, the residual pressure in the sampling cylinder before filling, the gas pressure, the ambient temperature and the date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations, loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.
3	Connect the sampling equipment	Connect the sampling equipment. Make tight connections and establish gas flow.
4	Purge the sampling equipment	If a waste cylinder exists, first open the valves to fill the waste cylinder in order to purge the hoses, valves and connection fittings.
5	Sampling	Open the valve of the sampling cylinder. Close the valve of the sampling cylinder when the pressure is stabilized.
6	Disconnect the sampling cylinder	Stop the entire gas flow and disconnect the sampling cylinder. ^a
7	Shipment	Transportation to the laboratory is done in accordance to local and international regulations and/or the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer and/or the off-site laboratory. More information is given in the relevant annexes for gases.
^a If the gas compartment has a small volume, topping-up after gas sampling can be required.		

5.3 Rectifying the composition of a gas mixture

This subclause applies to gas compartments where the measured concentration or ratio of the different components of a gas mixture does no longer comply with the specifications given by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual. Information on the procedure of rectifying the composition of a gas mixture is given in Annex B, Annex D, Annex E and Annex F.

6 Recovery and reclaiming of gases during maintenance, repair, overhaul or dismantling on-site

6.1 General

Clause 6 contains the procedures for recovery and reclaiming of gases from any gas compartment during maintenance, repair, overhaul or dismantling on-site.

Gas recovery and reclaiming might not be needed for air and natural-origin gases. More information about safety and environmental aspects for different gases is given in the related annexes.

Once the gas has been recovered and reclaimed and if the gas is considered as suitable for reuse, it can be either reused on site, stored or transported off-site for further reuse. If the gas is not considered as suitable for reuse it shall be stored or transported for later disposal.

6.2 Recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gases from any gas compartment

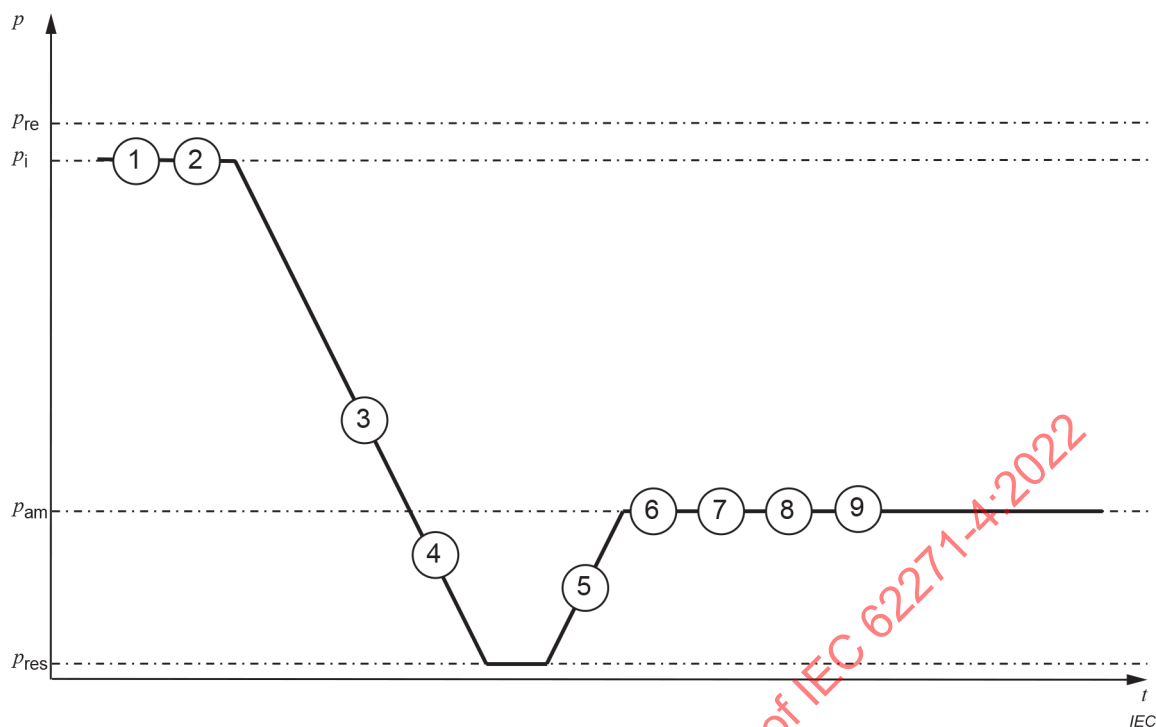
This subclause applies to any gas compartment containing non-arced or normally arced gas, when it is recovered for maintenance, repair, overhaul or dismantling on-site.

The detailed sequence of operations according to Figure 4 and Table 5 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gases from any gas compartment, except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

There are cases where the residual gas pressure cannot be reached using the procedure given in Figure 4 and Table 5 despite the use of adequate recovery facilities (for example due to leakage of the switchgear, small pumping apertures in the switchgear). In such cases other methods can be applied to reach a residual partial pressure of the original gas of 0,5 kPa (for example dilution method, see Figure 9) in the gas compartment prior to opening.

NOTE In case of a leaking gas compartment the recovery container can be changed, when ambient pressure has been reached, to avoid contamination of the recovered gas with ambient air.

More information about safety rules is given in the relevant annexes for gases.



Key

1 Prepare handling equipment	p_{re} Filling pressure/density for insulation and/or switching
2 Connect external pre-filters (optional step)	p_i Initial pressure
3 Recovery of gas	p_{am} Ambient pressure
4 Minimise residual content of gas	p_{res} Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5 Flood with air	
6 Open the gas compartment	
7 Remove solid by-products and adsorbers when present	
8 Neutralisation, if required	
9 Documentation	
- NOTE In most cases p_i is equal to p_{re}

Figure 4 – Example of recovery and reclaiming of non-arcad or normally arcad gas from any gas compartment

Table 5 – Example of recovery and reclaiming of non-arced or normally arced gas from any gas compartment

Step		Procedure
1	Prepare handling equipment	Check that the handling equipment is properly working, the filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers and if they are compatible with the gas to be recovered and reclaimed in gaseous or liquid phase. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Connect external pre filters (optional step)	Connect one or multiple external pre filters between the gas compartment and the inlet of the handling equipment.
3	Recovery of gas	Connect the gas compartment. Use a compressor as soon as the residual pressure in the gas compartment approaches the pressure in the storage container. Avoid overfilling of the storage container.
4	Minimise residual content of gas	Use a vacuum compressor in series to the compressor when the residual pressure in the gas compartment approaches 100 kPa and leave it running until a pressure $\leq 0,5$ kPa is reached. In case of a possible leak, change the container, when ambient pressure has been reached, to avoid the entrance of ambient air into the first container.
5	Flood with air	Disconnect the recovery equipment and with the use of a suitable device let the air enter slowly into the gas compartment.
6	Open the gas compartment	Apply safety rules according to the corresponding annex. Carefully open the gas compartment.
7	Remove solid by-products and adsorbers when present	Immediately use vacuum cleaner or wipe with a clean lint free rag to collect the solid by-products, if present. Place adsorber materials in a plastic bag. Seal the plastic bag with tape and tag it. Disposal of solid by-products shall be according to local and international regulations.
8	Neutralisation, if required	If solid by-products were collected, follow the instructions according to the corresponding annex.
9	Documentation	Record at least the name of the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the residual pressure, the residual quantity, the ambient temperature and the date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.

6.3 Recovery and reclaiming from any gas compartment containing heavily arced gas

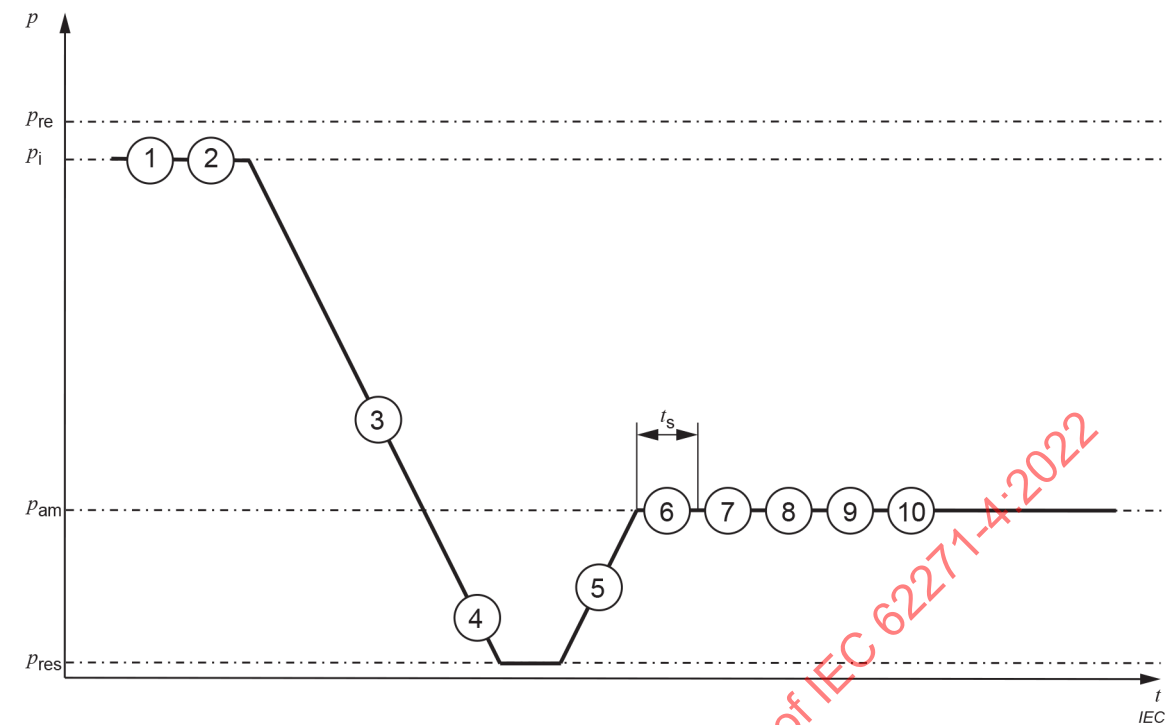
This subclause applies to any gas compartment containing heavily arced gases, when it is recovered for maintenance or repair. Non-dismantlable gas compartments containing heavily arced gases are regarded to have reached their end of life.

The pressure in the gas compartment prior to flooding with air and opening shall be $\leq 0,5$ kPa.

Figure 5 and Table 6 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for gases recovery and reclaiming from any gas compartment containing heavily arced gases except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

There are cases where the residual gas pressure of 0,5 kPa cannot be reached using the procedure given in Figure 5 and Table 6, despite the use of adequate recovery facilities (for example due to leakage of the switchgear, small pumping apertures in the switchgear). In such cases other methods can be applied to reach a residual partial pressure of the original gas of 0,5 kPa (for example dilution method, see Figure 9) in the gas compartment prior to opening. When leakage occurs, and the dilution method is used, suitable containers are needed.

More information about safety rules is given in the related annexes.



Key

1	Prepare handling equipment	p_{re}	Filling pressure/density for insulation and/or switching
2	Connect external pre-filters	p_i	Initial pressure
3	Recovery of gas	p_{am}	Ambient pressure
4	Minimise residual content of gas	p_{res}	Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5	Flood with air	t_s	Settling down time ≥ 1 h
6	Settling down of solid by-products		
7	Open the gas compartment		
8	Remove solid by-products, adsorber materials and removable parts		
9	Neutralisation		
10	Documentation		

NOTE In most cases p_i is equal to p_{re}

Figure 5 – Example of recovery and reclaiming of heavily arced gas from any gas compartment

Table 6 – Example of recovery and reclaiming of heavily arced gas from any gas compartment

Step		Procedure
1	Prepare handling equipment	Check that the handling equipment is properly working, the filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers and if they are compatible with the gas to be recovered and reclaimed. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Connect external pre-filters	Connect one or multiple external pre filters in series between the gas compartment and the inlet of the handling equipment.
3	Recovery of gas	Connect the gas compartment. Use a compressor as soon as the residual pressure in the gas compartment approaches the pressure in the storage container. Avoid overfilling of the storage container.
4	Minimise residual content of gas	Use a vacuum compressor in series to the compressor when the residual pressure in the gas compartment approaches 100 kPa and leave it running until a pressure $\leq 0,5$ kPa is reached. In case of a possible leak, change the container, when ambient pressure has been reached, to avoid the entrance of ambient air into the first container.
5	Flood with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment.
6	Settling down of solid by-products	Wait (typically at least 1 h) to give enough time for the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment.
7	Open the gas compartment	Carefully open the gas compartment. More information about safety rules is given in the relevant annexes. ^a
8	Remove solid by-products, adsorber materials and removable parts	Immediately use a vacuum cleaner to collect the solid by-products. Place adsorber materials and removable parts in plastic bags. Seal plastic bags with tape and tag them. Details on the vacuum cleaner class to be used is given in the relevant annex for the gas. Disposal of solid by-products shall be according to local and international regulations.
9	Neutralisation	Follow the instructions according to the corresponding annex.
10	Documentation	Record at least the name of the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the quality of the gas, the residual pressure, the residual quantity, the ambient temperature and the date for further reference. Record all relevant information concerning service behaviour. Include some pictures. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.
^a If the gas compartment is already open to the atmosphere (for example due to operation of a pressure relief device or enclosure burn through), the procedure can be followed starting from step 8.		

7 End-of-life of electric power equipment

7.1 General

This clause covers the different phases when electric power equipment is dismantled at the end-of-life, which is an important stage from the environmental point of view.

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

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

Dismantling of electric power equipment and related treatment of gases, gas compartments, solid by-products, adsorber materials and effluents shall be conducted with due regard to personnel and environmental safety. More information is given in the relevant annexes for the different gases.

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

Figure 6 describes the typical procedure to follow during end-of-life of controlled or closed pressure systems.

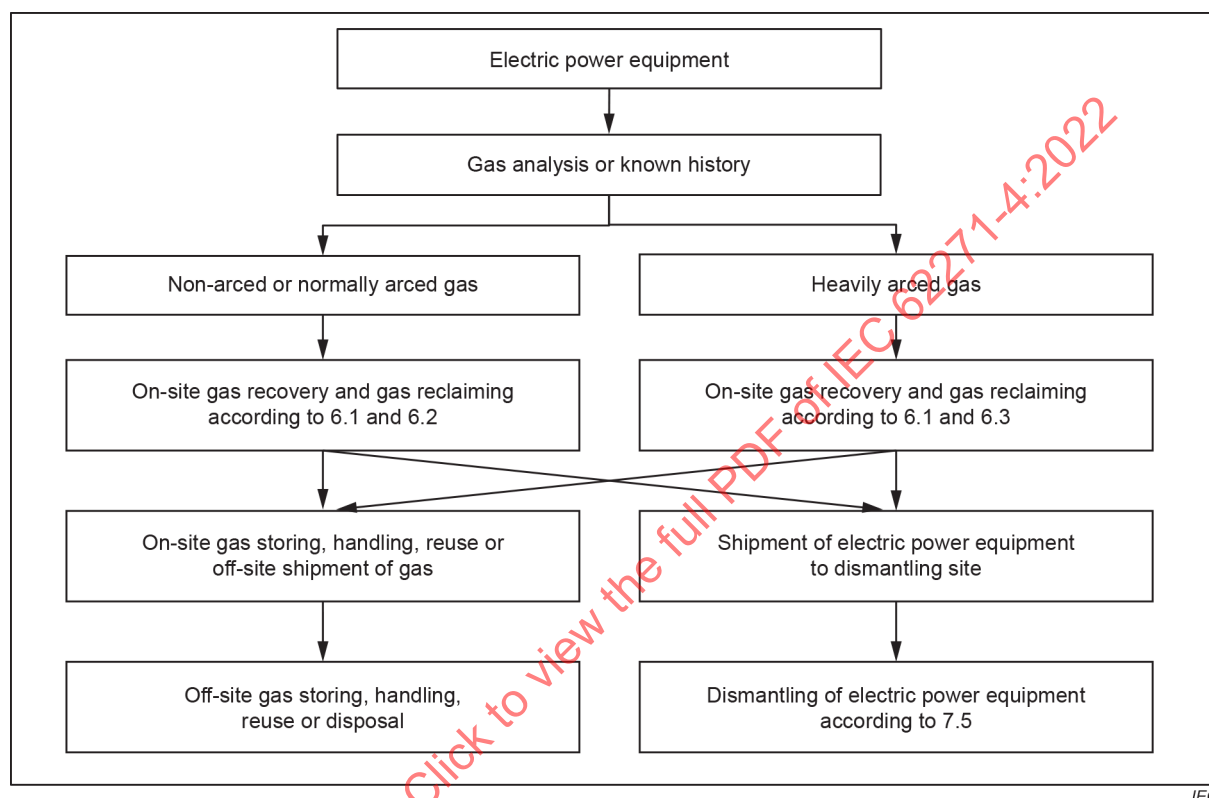


Figure 6 – End-of-life of controlled or closed pressure systems

If the history of a gas compartment is unknown, the gas shall be analysed and handled in safe conditions according to 5.2. In case a gas analysis is not possible the gas shall be treated as heavily arced gas. Once the gas has been recovered and reclaimed, it can be either reused on-site (if applicable for the gas) or stored or transported off-site for further reuse or disposal. More information is given in the relevant annexes for the different gases. The electric power equipment can be either dismantled on-site according to local regulations or shipped to a dismantling site.

7.3 End-of-life of sealed pressure systems

Sealed pressure systems can be shipped to the dismantling site as shown in Figure 7. If requested (for instance reducing to the correct transportation pressure), gas recovery and reclaiming could be performed on-site. The procedure for gas recovery and reclaiming remains the same and is described in 7.4.

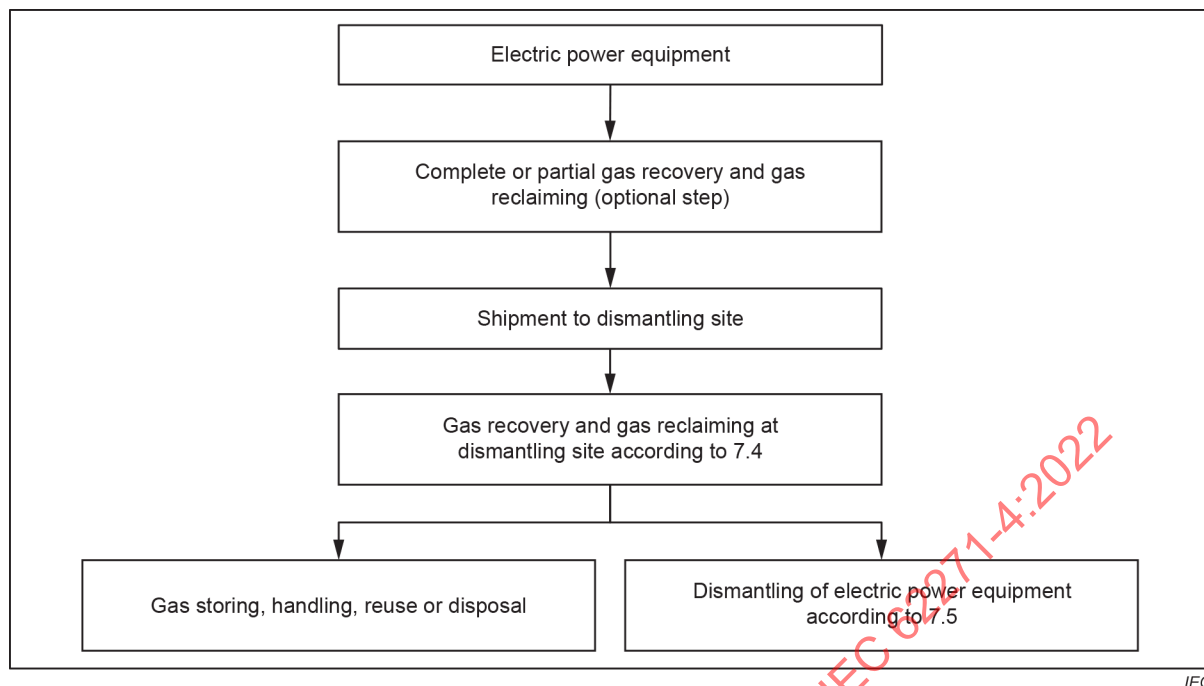


Figure 7 – End-of-life of sealed pressure systems

Sealed pressure systems can be shipped to the dismantling site before removal of the gas, this operation being typically conducted by service companies. These companies shall implement the necessary handling and storage means to avoid any shocks that can crack or break the enclosure, in particular resin-based enclosures. Experience shows that the risk of the gas being dispersed in the environment during handling and transportation is extremely low, if the local and international regulations and the transportation instructions issued by the electric power equipment manufacturer are followed.

7.4 Gas recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems

Gas recovery and reclaiming at the end-of-life of any sealed pressure systems can be performed at the dismantling site. When sealed pressure systems are fitted with connecting facilities, dedicated procedures and tools according to specifications given by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual should be used for the gas recovery. If not, then tight drilling systems shall be used.

NOTE Gas recovery and reclaiming is sometimes not applicable for air and natural-origin gases. More information is given in Annex C and Annex D.

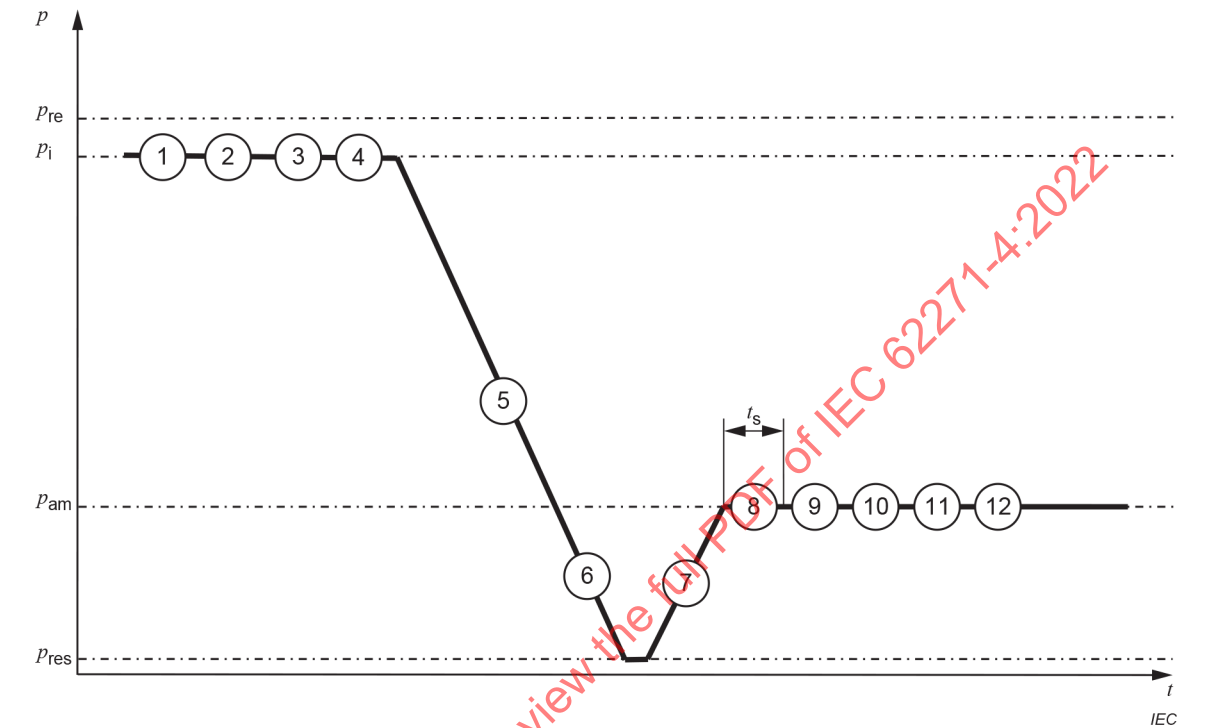
The residual gas pressure in the gas compartment prior to opening shall be $\leq 0,5$ kPa except if otherwise specified by the handling procedure of the electric power equipment manufacturer. Information about the gas recovery procedure, especially if the gas compartment cannot withstand the residual gas pressure without leaking and if the gas compartment is permanently deformed after the gas recovery, should be given in the operating instruction manual. Otherwise, contact the electric power equipment manufacturer.

In the case where the residual gas pressure cannot be reached without leaking, other methods, for example the dilution method (see Figure 9), can be applied to reach a residual (partial) gas pressure of 0,5 kPa or the value specified by the electric power equipment manufacturer in the gas compartment prior to opening.

Some dismantling and recycling companies are equipped with vacuum chambers specially designed to recover the gas from sealed pressure systems down to a residual pressure $\leq 0,5$ kPa without damaging the gas compartment.

Figure 8 and Table 7 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for gas recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems, except if otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. Figure 9 shows a typical example of the dilution method.

More information about safety rules for the different gases is given in Annex A, Clause A.2, Clause B.2, Clause C.2, Clause D.2, Clause E.2 and Clause F.2 .



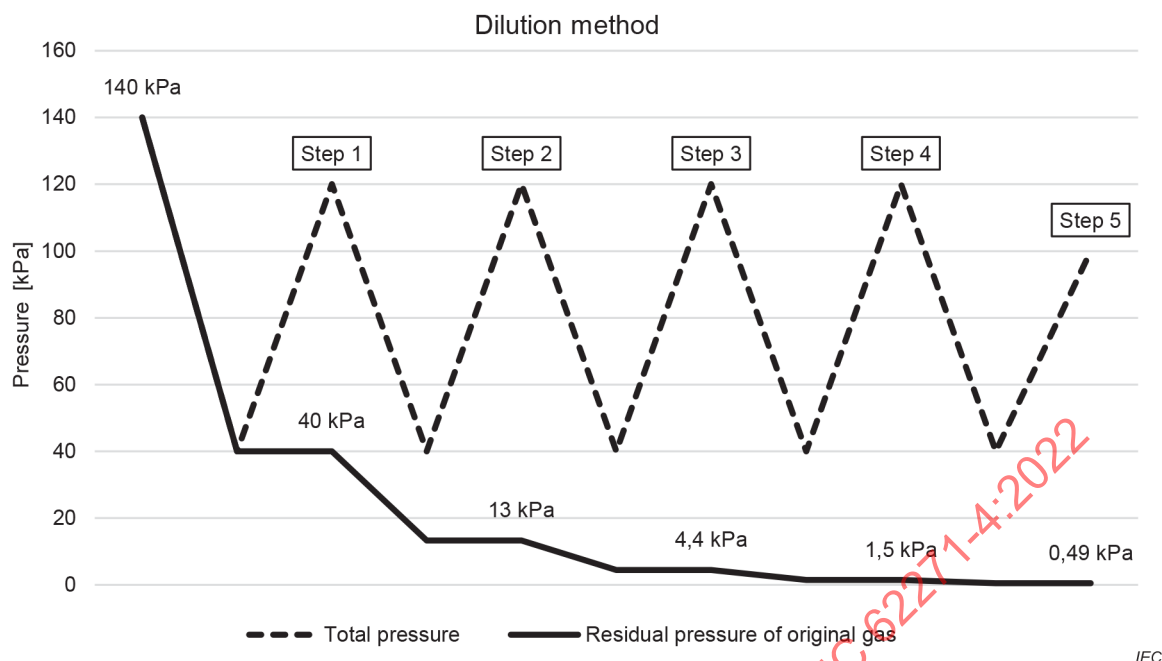
Key

1 Prepare handling equipment	p_{re}	Filling pressure/density for insulation and/or switching
2 Check quality in case heavily arced gas is expected (optional step)	p_i	Initial pressure
3 Connect external pre-filters, if required	p_{am}	Ambient pressure
4 Connect gas compartment	p_{res}	Residual pressure $\leq 0,5$ kPa
5 Recovery of gas	t_s	Settling down time ≥ 1 h
6 Minimise residual content of gas		
7 Flood with air		
8 Settling down of solid by-products, if required		
9 Open the gas compartment		
10 Remove solid by-products, adsorber materials and removable parts when present		
11 Neutralisation, if required		
12 Documentation		

Figure 8 – Gas recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems

Table 7 – Gas recovery at the end-of-life of sealed pressure systems

	Step	Procedure
1	Prepare handling equipment	Check that the handling equipment is working properly, the filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers and if they are compatible with the gas to be recovered and reclaimed. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Quality checking (optional step)	Quality checking in this case typically comprises the measurement of the concentration of by-products. See the corresponding annex for checking the quality of the gas and the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.
3	Connect external pre filters, if required	Connect one or multiple external pre filters between the gas compartment and the inlet of the handling equipment. Filters shall be selected according to the gas and its possible by-products.
4	Connect gas compartment	Use dedicated tools and follow the instructions of the electric power equipment manufacturer to connect the gas compartment. In other cases, tight drilling systems shall be used.
5	Recovery of gas	Connect the gas compartment. Use a compressor as soon as the residual pressure in the gas compartment approaches the pressure in the storage container. Avoid overfilling of the storage container.
6	Minimise residual content of gas	Use a vacuum compressor in series to the compressor when the residual pressure in the gas compartment approaches 100 kPa and leave it running until a pressure $\leq 0,5$ kPa is reached. In case of a possible leak, change the container, when ambient pressure has been reached, to avoid the entrance of ambient air into the first container.
7	Flood with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment.
8	Settling down of solid by-products, if required.	Wait (typically at least 1 h) to give enough time for the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment.
9	Open the gas compartment	If applicable, carefully open the gas compartment. More information about safety rules for the different gases is given in the annexes.
10	Remove solid by-products, removable parts, and adsorbers when present	Immediately use vacuum cleaner or wipe with a clean lint free rag to collect the solid by-products, if present. Place adsorbers and removable parts in a plastic bag. Seal the plastic bags with tape and tag them. Disposal of solid by-products shall be according to local and international regulations.
11	Neutralisation, if required	If solid by-products were collected, follow the instructions according to the corresponding annex.
12	Documentation	Record at least the manufacturer, electric power equipment type reference, serial number and gas compartment reference to identify the gas compartment, the residual quantity (if applicable), ambient temperature and date for further reference. In addition, depending on the type of gas and local regulations loss of gas to the atmosphere shall be recorded. If this is the case, the user or manufacturer shall provide adequate methods to fulfil such requirements.



	Example values	
p_{re}	= 140 kPa	Filling pressure/density for insulation and/or switching
p_{max}	= 120 kPa	Maximum pressure used during the dilution process
p_{min}	= 40 kPa	Minimum pressure used during the dilution process (= minimum pressure suitable for the electric power equipment without damage)
p_{res}	≤ 0,5 kPa	Targeted residual partial pressure of the original gas
n_{tot}	= 5	Total number of dilution steps needed to reach p_{res}

Explanation of the dilution method:

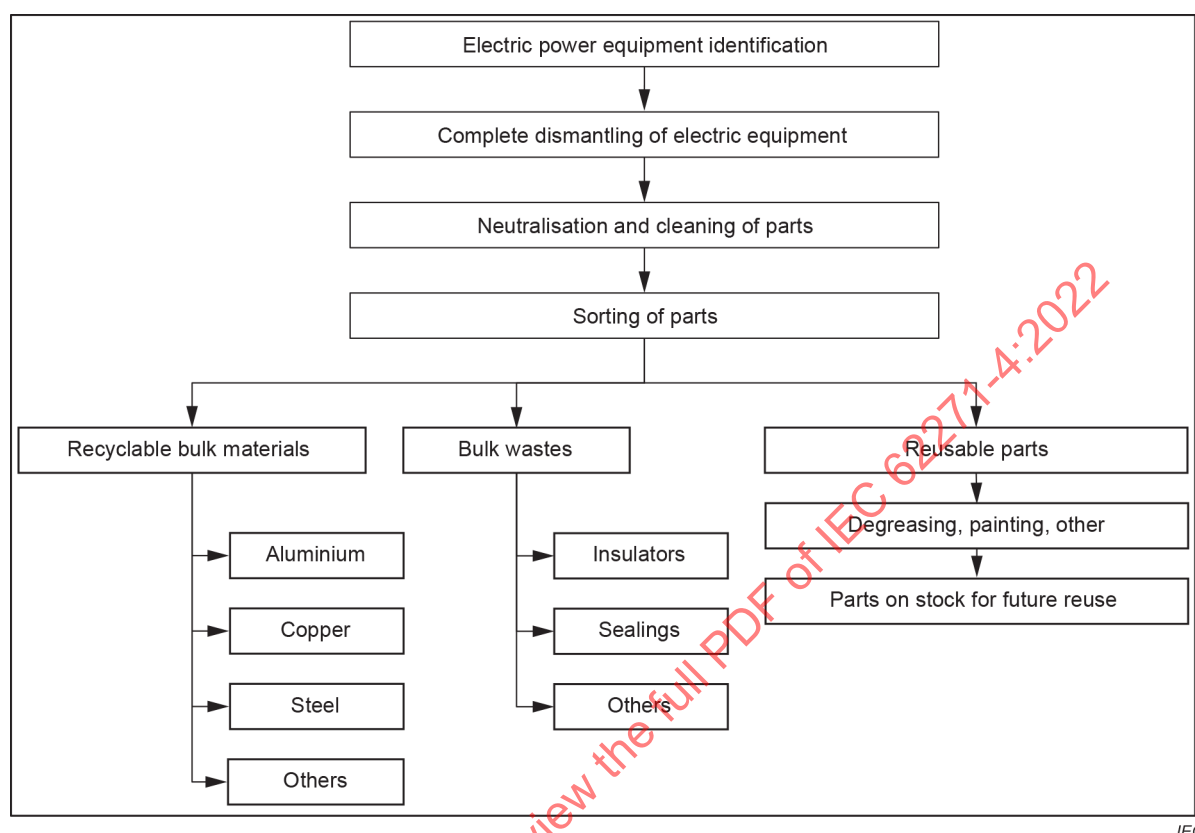
- In a first step the original gas is recovered to the minimum pressure used during the dilution process and subsequently topped-up with air to the maximum pressure used during the dilution process.
- In the second step the diluted original gas is again recovered to the minimum pressure used during the dilution process and subsequently topped-up with air to the maximum pressure used during the dilution process.
- etc.
- After n steps the residual partial pressure p_n of the original gas is:
$$p_n = \left(1 - \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max}} \right) \right)^n \times p_{max}$$
- The total number of dilution steps needed to reach the targeted residual partial pressure of the original gas can be calculated as follows:
$$n_{tot} = \text{roundup} \left\{ \frac{\ln \left(\frac{p_{res}}{p_{max}} \right)}{\ln \left(1 - \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max}} \right) \right)} \right\}$$
- At the end of the last dilution step the air is only topped-up to ambient pressure and the gas compartment can then be opened.

NOTE Several recovery containers can be used depending on the volume of the gas compartment to be processed.

Figure 9 – Dilution method

7.5 Dismantling of electric power equipment (informative)

Figure 10 describes the typical procedure for the dismantling of electric power equipment at the end-of-life.



IEC

Figure 10 – Dismantling of electric power equipment

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

Gas compartments and internal parts can contain solid by-products. The quantity of by-products within a gas compartment depends on the cumulative arc energy, which has been applied during its life, in relation to the amount of gas, the chemical characteristics and the quantity and type of adsorbers. The cumulative arc energy depends on the function and service history of the electric power equipment in question. A gas load-break switch will contain much smaller quantities of by-products than a gas circuit-breaker with a history of frequent fault clearances.

Solid by-products and adsorbers shall be disposed correctly and gas compartments shall be neutralised and cleaned so that they can be recycled according to local regulations or international standards. More information is given in the relevant annexes.

For the dismantling phase, operators should know the electric power equipment. Tools and drawings should be available. More information about safety rules is given in the relevant annexes.

Typical electric power equipment is made up of approximately 75 % to 90 % by weight of metals (both ferrous and non-ferrous metals), the rest being mainly dielectric material, with most of the weight of the dielectric material being solid insulation (for example cast resin, plastics and ceramics).

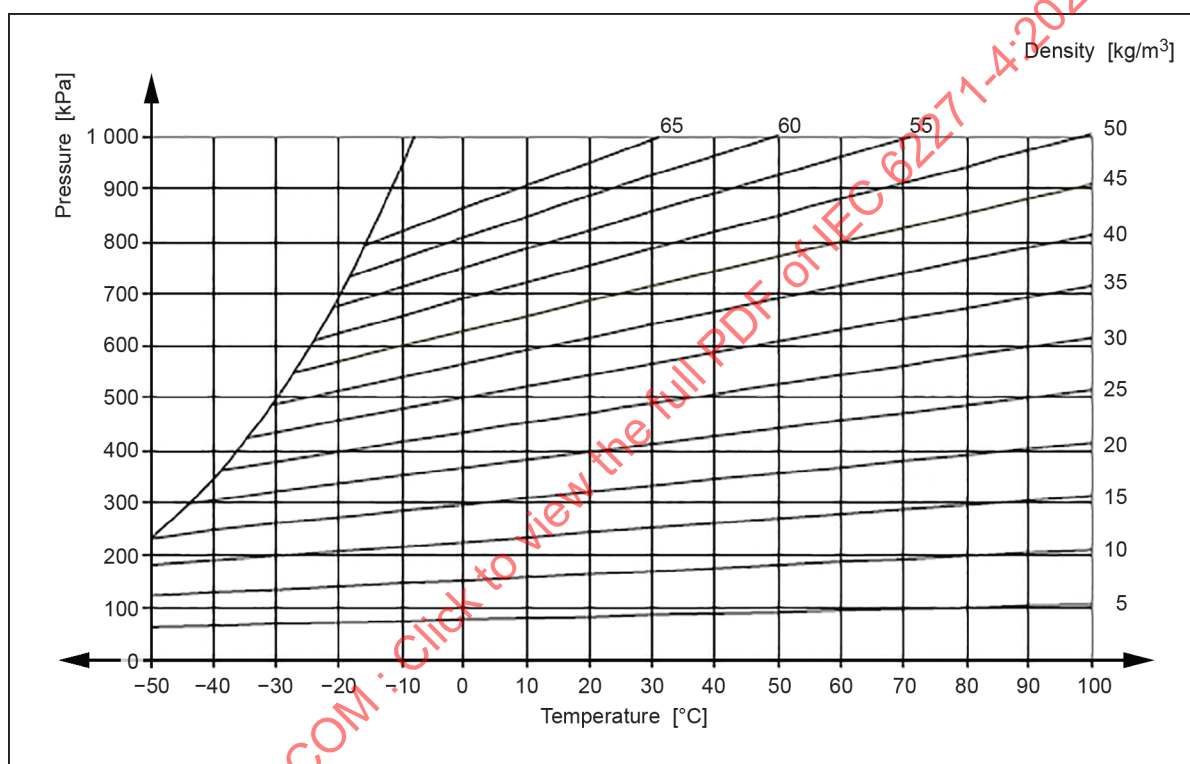
The disposal of non-recyclable materials (bulk wastes) shall be done according to local and international regulations.

Annex A (informative)

Sulphur hexafluoride (SF₆)

A.1 Gas properties

Figure A.1 [2] shows the pressure-temperature-density diagram of SF₆. More information about chemical, physical and electrical properties of technical grade SF₆ is reported in IEC 60376:2018, Annex A and properties of SF₆ to be reused is reported in IEC 60480:2019, Table 2.



IEC

Figure A.1 – Pressure-temperature-density diagram for SF₆

A.2 Safety and first aid

A.2.1 General

Before starting any maintenance/service work on electric power equipment, a detailed inspection of the state of the electric power equipment should be carried out and documentation of the status is recommended. In addition to the local safety regulations, at least the following general safety rules should be followed:

- switch off and isolate;
- secure against re-closing;
- verify that electric power equipment is de-energised;
- earth and short-circuit the electric power equipment;
- cover or fence off nearby live parts.

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

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

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

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

A notice stating that open fire, naked flames (for example matches), smoking, use of heat engines, heating to more than 180 °C and welding without special precautions are prohibited because SF₆ decomposes in the presence of certain metals above the temperature of 200 °C, and will decompose on its own at temperatures above 500 °C, should be displayed. Electric arcing (through normal operations or interruption of fault currents) causes decomposition. Naked flames can also cause decomposition. Instructions for giving first-aid (see A.2.8) should be displayed while SF₆ is being handled in any location.

When a gas compartment is opened after the electric power equipment has been in service, personnel should wear suitable protective clothing in order to avoid contact with the fine solid by-products, which can be present. Particular attention should be given to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which have contained normally arced or heavily arced SF₆ should:

- use suitable tools and handling equipment;
- wear suitable protective clothing (see A.2.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their handling equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components which have been in contact with by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues.

A.2.2 Protection of personnel

SF₆ should be handled by certified personnel, only. The training content can be adopted, depending on the kind of work to be performed on the electric power equipment (see A.4.2).

A specific training covering the recovery of used SF₆ from a gas compartment is requested for personnel opening or entering the gas compartment. The operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed.

Table A.2 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given when opening or entering the gas compartment. Specific protections against solid by-products being dispersed by wind are required when opening at outdoor conditions.

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

	Potential risk	Safety precaution	Safety equipment and tools
Non-arced SF ₆	Fumes of cleaning substances	Ventilation	Suction ventilator
	Asphyxiation due to high remaining SF ₆ concentration.	Ventilation Measurement of O ₂ and/or SF ₆ concentration before entering, with the minimum O ₂ concentration value required for entering = 16 %. Wear personal protective equipment	Suction ventilator O ₂ and/or SF ₆ concentration measuring device Self-contained breathing apparatus (respirator)
	Residual reactive gaseous by-products	Ventilation Wear personal protective equipment Measurement of concentration of residual reactive gaseous by-products	Suction ventilator Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask (filter)
	Solid by-products and adsorber materials	Removal of solid by-products and adsorber materials Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Vacuum cleaner Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask Protective goggles Environmental protection against rain or wind

Like any gas but O₂, a concentration greater than 19 % of SF₆ in the air is considered as a potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the O₂ concentration below 16 %, which is usually considered as the threshold for asphyxiation. As a consequence, it is recommended that the O₂ or SF₆ concentration in the gas compartment be measured after ventilation and prior to accessing it. In addition to that, the O₂ or SF₆ concentration in the ambient environment can be checked when working in confined spaces.

Eating, drinking and smoking is prohibited when accessing or opening a gas compartment. It is recommended that clothes should be changed, and the skin washed as soon as possible after the work to prevent potential danger of irritation or burns.

A.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

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

Reusable safety equipment and tools should be cleaned, for example washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. Examples of neutralising solutions are given in IEC 60480:2019, Table 11.

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

A.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

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

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

A.2.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the SF₆ electric power equipment itself. Safety shoes, helmet, and protective goggles can be required according to local regulations to get in the vicinity of the electric power equipment.

In case of abnormal leakage of SF₆, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to A.2.7.

The required protective equipment should be specified in the operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer.

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

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166 [3]);
- breathing protective mask: to be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas only;
- full / half face mask: for short-term inspection and work where ventilation can be provided but where the concentration of by-products can exceed the appropriate maximum level, a face mask with changeable active charcoal filter should be used according to local regulations (for example European Standards EN 140 [4], EN 14387 [5] and EN 143 [6] specify masks, gas filters and particle filters, respectively. Combined filters of type A2/B2/E2/K2/P3 or A3/B3/E3/K3/P3 manufactured to these standards are available);
- single use protective overall: dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap, pocketless, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene), disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;

- self-contained breathing apparatus (respirator): when entering and/or working at indoor applications after an abnormal leakage or a sudden release due to internal arcing when the concentration of O₂ or the amount of by-products are exceeding TWA values, a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136 [7]);
- O₂ concentration measurement device for permanent monitoring of the O₂ concentration in the environment;
- SF₆ concentration measurement device;
- environmental protection for outdoor work locations: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open;
- vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping particles according to dust class H (high hazard). Dust classes are specified in Annex AA of IEC 60335-2-69:2021;
- suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment might be portable or permanently installed, depending on the size of the installation.

A.2.6 Facilities and services

Where gas compartments, containing used SF₆ are opened (after recovery of the SF₆), adequate washing facilities for workers, and a supply of water for preparing cleaning solutions should be available.

A.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of SF₆

In case of sudden release of SF₆ the affected rooms should be left immediately. After ventilation of the rooms only trained and certified personnel (see Clause A.4) are allowed to re-enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment.

The potential risks, safety precautions and the safety equipment and tools required, as described in Table A.2 are additionally valid for the entire room where the sudden release of SF₆ occurred.

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

When entering areas which might have a low O₂ concentration follow local regulations about safety conditions. A second person being in continuous visual and audible contact will increase safety.

A.2.8 First aid equipment and treatment

A.2.8.1 General

First aid equipment includes:

- normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution;
- calcium gluconate gel (HF antidote gel);
- means for contacting emergency services;
- guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see A.2.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

A.2.8.2 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation, all personnel should immediately leave the affected area and move into the fresh air. Contaminated clothing is removed, and the affected part washed with cool running water. Apply calcium gluconate gel as a remedy after washing for fluoride acid on skin. Professional medical advice should be sought.

A.2.8.3 Irritation of the eyes

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

A.2.8.4 Breathing difficulty

In case of breathing difficulty, all personnel should immediately leave the affected area and move into the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance should be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration should be immediately commenced by trained and qualified personnel. Automated external defibrillator could be used according to local regulations.

A.3 Environmental impact

Information about the environmental effects of SF₆ is reported in IEC 60376:2018, Annex B. Special care is needed to avoid any release of SF₆ to the atmosphere because of its high global warming potential.

A.4 Training and certification

A.4.1 General

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

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

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

Given the specific nature of the electric industry and electric power equipment, safety and continuity of service are very important. Related to the tasks to be completed by trained personnel, the training can be adopted to cover different scopes, ranging from for example basic training to advanced training. The training should be related to a specific design (for example high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage switchgear, etc.) and different designs require different trainings to be certified.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the electric power equipment, operating instruction manuals of the handling equipment, safety data sheets (SDS), instrument datasheets, international standards, and CIGRE brochures. In some countries certification of natural persons carrying out SF₆ handling procedures is mandatory. If local regulations exist (for example European Union Regulations No. 517/2014 [8] and No. 2015/2066 [9]), those regulations should be followed in order to minimize emissions of SF₆ during manufacturing, operation and at the end-of-life of the electric power equipment.

A.4.2 Training

Workers, handling SF₆, should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and equipment, and procedures to assure the continuity of service and minimise SF₆ emissions.

The different aspects to be covered by a training are the following:

- safety and first aid (see Clause A.2), in particular
 - local regulations, emergency plans and instructions in case of for example asphyxiation, internal arc fault;
 - safety equipment required for personal protection;
 - safety equipment required for working on open gas compartments in relation to the task;
 - safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products;
- basic knowledge of relevant environmental issues (for example climate change, Kyoto Protocol, Global Warming Potential, see IEC 60376:2018, Annex B);
- environmental relevance of SF₆ emissions and mitigation approaches;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of SF₆ (see IEC 60376:2018, Annex A);
- use of SF₆ in electric power equipment (insulation, switching);
- existence of local regulations and international standards in relation to the task;
- SF₆ handling, hazards and health characteristics (see IEC 60480:2019, Annex C);
- design of electric power equipment (properties and application/functionality);
- checking the SF₆ quality according to the relevant standards, for example IEC 60376 and IEC 60480;
- the operating instruction manuals given by the electric power equipment manufacturer in relation to the tasks;
- types of gas compartments (see 3.1.17);
- instruments and procedures for checking the SF₆ quality;
- procedures of handling of SF₆ gas:
 - topping-up of closed pressure systems (see 5.1);
 - air evacuation and SF₆ filling (see 4.2), topping-up with SF₆ (see 4.3);
 - recovery and reclaim of non-arc'd, normally (see 6.2) and heavily arc'd SF₆ (see 6.3); handling, neutralisation and removal of by-products (see A.2.3), handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products (see A.2.3);
- leak detection methods and repair techniques;
- categories for SF₆ (see 3.2);
- storage and transportation of SF₆ (see Clause A.5);

- monitoring of SF₆ gas and appropriate recording of data related to local environmental regulations;
- SF₆ handling equipment in relation to the tasks (see Clause A.6);
- procedures for entering the switchgear room in case of abnormal leakage and/or sudden release of SF₆ due to fire or internal arc fault (see A.2.7);
- transportation of the power electric equipment to the dismantling site, if applicable;
- dismantling of electric power equipment and part sorting (see 7.5);
- operation of tight drilling systems, if necessary (see 7.4).

A.4.3 Certification

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

The following records should be retained:

- the training content;
- the date on which the training was completed.

Restrict the tasks to be performed (for example SF₆ recovery for a certain design) to personnel who have been certified for the respective skill levels and sustain a high level of expertise.

A.5 Storage and transportation

A.5.1 General

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

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

A.5.2 Storage of containers filled with SF₆

SF₆ can be stored in two ways either as a gas or as a liquid. At 20 °C gaseous storage is possible at a pressure up to about 2 000 kPa without liquefaction. At 20 °C SF₆ starts to liquefy at about 2 100 kPa. Gaseous storage has the advantage of reducing the recovery and filling times but requires large storage volumes and is therefore generally restricted to electric power equipment with small volumes or used in fixed location gas handling facilities. Liquid storage gives the ability to reduce storage volumes and economically transport large quantities of SF₆. Adequate compressors with additional cooling system are needed to liquefy SF₆. The maximum filling factor should be strictly regarded. It depends on the design pressure of the container and the concentration of gaseous by-products. The filling factor is the weight of SF₆ contained in the container divided by the container volume and is usually specified in kg/l. Use of a weighing scale to prevent overfilling. The manufacturer of the container should declare the maximum filling factor, the maximum pressure and the maximum temperature of the container. Containers should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself.

Containers should be refillable and clearly labelled to identify their contents. Containers containing different grades of SF₆ should be physically separated.

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

Table A.3 gives examples of container types. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table A.3 – Examples of container types required for storage and transportation of SF₆

Gas / fluid	Characteristic	Container type
Technical grade SF ₆ ^a	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
Used SF ₆ suitable for reuse ^b	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
Used SF ₆ not suitable for reuse	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
	Liquefied gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products ^c	Special containers approved for storing and transportation of toxic and corrosive gases (such as hydrofluoric acid HF) with a corrosion-proof valve and adapter. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (yellow shoulder).
^a Avoid any contamination of containers dedicated to technical grade SF ₆ . ^b For more details see IEC 60480. ^c Used SF ₆ containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products to meet IEC 60480:2019, Table 2, and allowing an easier transportation.		

A.5.3 Transportation of containers filled with SF₆

International regulations for shipment of SF₆ containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of SF₆ are summarised in Table A.4.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

Table A.4 – International regulations for shipment of SF₆

Gas / fluid	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade SF ₆	Liquefied inert gas	2A	UN 1080 Sulphur hexafluoride 2.2	UN 1080 Sulphur hexafluoride 2.2
Used SF ₆ suitable for reuse ^c	Liquefied inert gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride and air or nitrogen or tetrafluoromethane) 2.2
Used SF ₆ not suitable for reuse	Liquefied inert gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride and air or nitrogen or tetrafluoromethane) 2.2
	Liquefied toxic and corrosive gas (gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products) ^d	2TC	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. 2.3 + 8	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride and thionyl fluoride) 2.3 + 8
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20]. ^b Final classification, including correct UN code and hazards identification numbers (e.g. H280), are listed in the safety data sheet and/or in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^c For more details see IEC 60480. ^d According to UN regulations for transportation, a gas is classified "toxic" when its LC50 < 5 000 µl/l (ppmv). Used SF ₆ containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on-site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products and allowing an easier transportation. N.O.S.: "not otherwise specified".				

A.5.4 Storage and transportation of electric power equipment containing SF₆

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

International regulations for shipment are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation.

According to ADR, RID and IATA transportation codes the filling pressure should not exceed 200 kPa (relative) at 20 °C.

A.5.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising SF₆ is responsible for the proper use, transportation, and disposal of the electric power equipment and the gas. He is also responsible for record-keeping regarding SF₆ banked in electric power equipment or stored in containers as well as emission rates on a yearly basis. This is supported by the electric power equipment manufacturer and the gas manufacturer with basic information in the manuals as per IEC 62271-1:2017 and according to local regulation.

A.6 Description of handling equipment

A.6.1 General

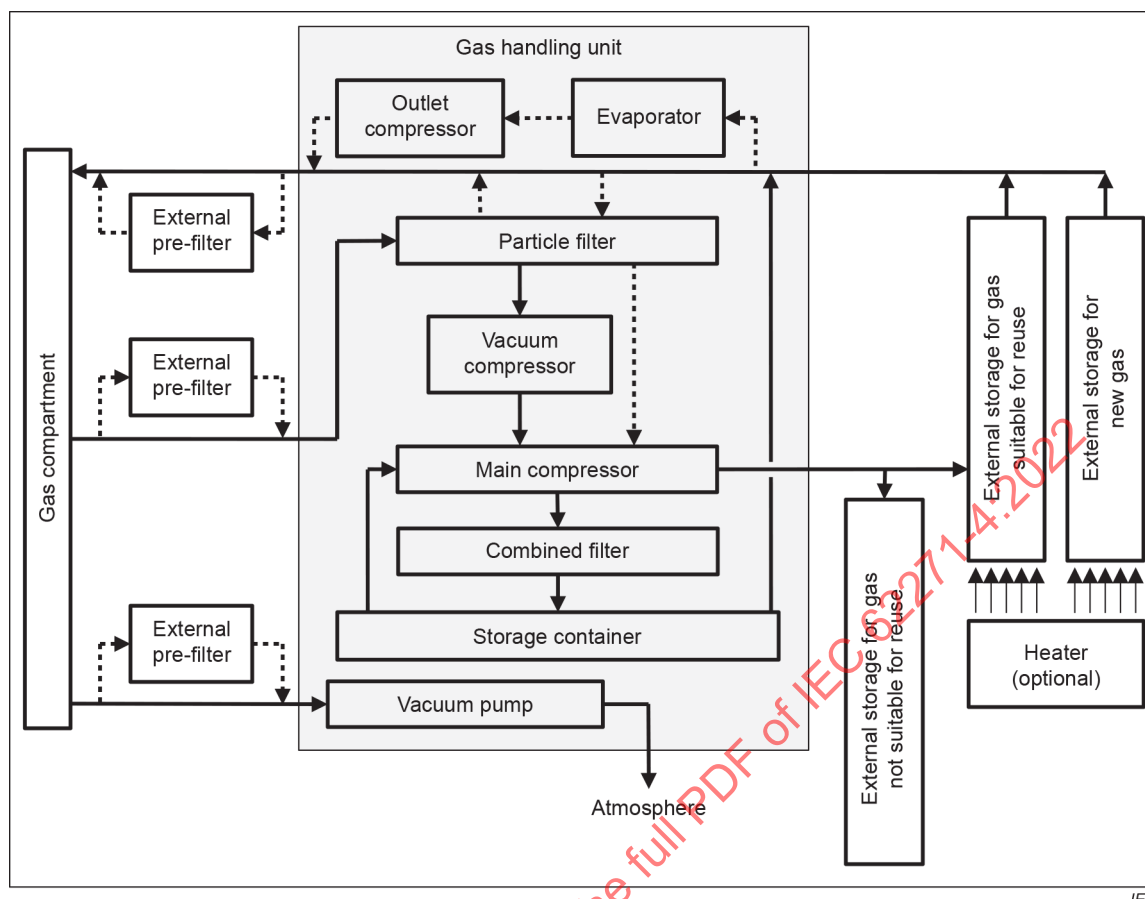
A.6.1.1 Overview

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

The appropriate type and size of the handling equipment should be chosen according to the SF₆ quantity to be handled. Figure A.2 shows a basic functional scheme. The typical functions are as follows:

- evacuation of air and/or N₂ from the gas compartment;
- filling of SF₆ in the gas compartment;
- recovery of SF₆ from the gas compartment;
- storage of SF₆ in internal or external storage containers;
- removal of contaminants;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- container to container transfer.

Not all of the listed handling equipment might be available and/or required, depending on the design of the electric power equipment. It is more a theoretical overview on the possible technical solutions.



IEC

Figure A.2 – Schematic view of an example of a handling equipment for SF₆

A.6.1.2 Qualification of handling equipment

Before using any handling equipment, it should be ensured that the handling equipment can be used for the intended task. Handling equipment for the same task but intended for another gas and not qualified for SF₆ might be damaged, malfunction or give wrong readings and therefore might generate a risk to the operator or the handling equipment or the electric power equipment.

A.6.2 Filters

A.6.2.1 General

Filters are required to remove reactive gaseous by-products, humidity and solid particles or oil droplets during gas handling. Filters can be part of the handling equipment or external pre-filters. An external pre-filter might be required to remove particles, excessive levels of humidity and gaseous by-products, which are acidic compounds, and could damage the handling equipment or the gas storage container. The requirements of the external pre-filter are the same as those of the filters installed inside the handling equipment, but the pre-filtering capacity could be considerably higher. More details on filters are also given in IEC 60480.

A.6.2.2 Filter types

A.6.2.2.1 Particle filter

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

A.6.2.2.2 Humidity and gaseous by-products filter (dry filter)

Appropriate filters can adsorb humidity and reactive gaseous by-products. The size of the filter should be large enough to get a residual humidity lower than 200 µl/l (ppmv) and a residual SO₂ + SOF₂ concentration lower than 12 µl/l (ppmv), in order to comply with IEC 60480:2019, Table 2, if the SF₆ is intended for reuse.

A.6.2.2.3 Combined filter

Instead of separate particle filters and humidity and gaseous by-products filters also filters, which combine both filtering principles, can be installed.

A.6.2.2.4 Oil filter

Oil filters which contain activated charcoal should be used in the following cases:

- if oil-lubricated handling equipment is used (not recommended);
- if an oil leakage in an oil-insulated electric component which is included in the electric power equipment utilising SF₆ is suspected.

The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

A.6.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate air or other gases (e.g. N₂), which are permitted to be released to the atmosphere, from the gas compartment/container/sample cylinders before filling them with SF₆.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 0,1 kPa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 0,010 kPa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 0,1 kPa (recommended value is lower than 0,010 kPa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended. Thermal vacuum sensors are dependent on the gas type and are not recommended. For instance, they react differently, when small amounts of SF₆ are still present, and therefore give a false vacuum reading.

A valve is required to shut off the connection between the gas compartment and the vacuum pump. When oil lubricated vacuum pumps are used, the valve should close automatically when turning off the vacuum pump to avoid oil diffusion into the gas compartment.

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

A.6.4 Main and vacuum compressors

When the SF₆ pressure in the gas compartment is higher than the pressure in the storage container, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to recover the gas. As the pressure in the gas compartment can vary within a very wide range, a dual compressor system should be used:

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

NOTE 1 Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry-running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination. State-of-the-art compressors can achieve 0,1 kPa pressure at the inlet.

NOTE 2 A 2 500 kPa rated outlet pressure of the compressor is sufficient to store SF₆ in a gaseous form (5 000 kPa pressure is usually used).

NOTE 3 An additional cooling device can be used to speed up SF₆ recovery.

A.6.5 Outlet compressor

When the pressure in the storage container is higher than the pressure in the gas compartment, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to fill in the gas. The outlet compressor, usually employing a piston type compressor, operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas compartment.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination.

A.6.6 External and internal gas storage containers

Pressure containers or special storage containers for used SF₆ are available as gas storage containers. They are mobile, stationary or installed in the handling equipment. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor, also taking elevated temperatures into account. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

A.6.7 Evaporator and gas storage container heater

If SF₆ is stored in liquid form and used as a gas, thermal losses due to evaporating inside the container can cause SF₆ to cool itself to a temperature where it will no longer evaporate. This can usually be observed by a visible frost ring / line on the container.

In order to fill large volumes rapidly, the handling equipment should be designed to extract liquid SF₆ that is then vaporized inside an evaporator. The evaporator is designed so that no liquid can reach the gas compartment.

In addition, gas storage container heaters can be used and should be designed to avoid accidental overheating and not exceeding 60 °C gas temperature.

A.6.8 Gas piping and pipe junctions

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

A.6.9 Control instruments

Control instruments should be provided to show the gas pressure in the gas compartment and in the storage container, the vacuum level, the gas temperature, etc. They should be placed in a position so that they can be observed when initiating operations with the handling equipment. Accuracy and resolution of the control instruments should be adequate to allow preservation of safe operating conditions.

A.6.10 Safety valves

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

A.6.11 Flexible hose connections

The handling equipment, the gas storage container and the gas compartment are connected via flexible hose connections. Particular care should be exercised to avoid the presence of air or other compounds inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required. The management of the hoses should be specified by the operating company taking into account the specifications, like maintenance and guidance for the end-of-life replacement, defined by the manufacturer of the hose.

A.6.12 Portable devices for gas measurement

A.6.12.1 General

Table A.5 provides an overview on devices for gas measurement including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturers of the portable devices for gas measurement in their technical datasheets.

Table A.5 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
SF ₆ concentration measuring device	SF ₆ concentration	80 % to 100 %	-10 °C to 40 °C	±0,5 %
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as for example SO ₂	1 µl/l (ppmv) to 250 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±15 % of the full range
SF ₆ pressure gauge	Pressure	0 kPa to 1 100 kPa (HV) 0 kPa to 200 kPa (MV)	-10 °C to 40 °C	±1 % of the full range
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Pressure values are conventionally reported at 20 °C. Either use a temperature compensating pressure gauge or recalculate based on the actual gas temperature during measurement.

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

- humidity concentration in the gas and/or dew point or frost point;
- SF₆ concentration;
- total amount of reactive gaseous by-products giving rise to residual acidity concentration.

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

A.6.12.2 Frost / dew point meter

The humidity concentration can be measured with different measuring principles and measuring instruments. However, a frost/dew point meter is the most common portable instrument used for this purpose. The instrument measures the frost/dew point of the humidity inside the gas, expressed in °C, and can convert it into a relative volume concentration, expressed in µl/l (ppmv).

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces and corrosive gases;
- permeation resistant pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials;
- calibrated or capable of self-calibration;
- no SF₆ gas release to the environment (for example small compressor for gas topping-up or make use of an empty cylinder);
- average time to obtain the readout less than 5 min.

A.6.12.3 Gas concentration measuring devices – SF₆ concentration measuring devices

Devices that measure the speed of sound or the thermal conductivity of the gas are used. The measured values are compared with the values for pure SF₆. Systems based on the measurement of the speed of sound are fast (response time less than 1 min), do not need recalibration and use only a minimal amount of gas. Their readout is the SF₆ concentration expressed in %.

Desirable characteristics are:

- no SF₆ gas release to the environment (for example small compressor for gas topping-up or make use of an empty cylinder).

Devices measuring the O₂ concentration and then calculating the % of SF₆ should not be used as different non-reactive gases such as N₂ or CF₄ can be present.

A.6.12.4 Analysers of reactive gaseous by-products

Various methods are available to test for reactive gaseous by-products. Common and recommended practice is to measure the SO₂ concentration. These tests can be performed using either reactive tubes, (reaction tubes change their initial colour if SF₆ containing SO₂ is fed through them) or by using an electro-chemical sensor. Electrochemical sensors as well as the SO₂ reaction tubes are also sensitive to SOF₂.

Desirable characteristics are:

- known sensitivity to SO_2 and SOF_2 ;
- connecting pipes resistant to reactive gaseous by-products and utilising self-sealing valve connections;
- no SF_6 gas release to the environment (for example small compressor for gas topping-up or make use of an empty cylinder).

The use of reaction tubes sensitive to HF is not recommended, as HF reacts very fast with metallic surfaces to form a surface layer of metal fluorides and thus making its detection almost impossible.

A.6.12.5 Portable gas detectors

Portable detectors for SF_6 are broadly the following types:

- Electron capture detector using a β -particle source to ionise a pumped sample. The ion current between electrodes is measured. An inert gas carrier is mostly used. Sensitivities down to 0,1 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) of SF_6 in air can be achieved.
- Corona discharge cell using a high-voltage (1 kV to 2 kV) applied to a point-plane electrode configuration. The discharge current is measured. This type of detector is used in a variety of portable, battery-powered units. Sensitivities of below 10 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) can be achieved.

Electron capture detectors are generally used for leak tracing and quantification.

If sensitive enough, corona discharge cells could be suitable for either assessing whether an area contains SF_6 or for leak detection.

A.6.13 Gas leakage tester

For leakage testing at a high sensitivity, photoacoustic infrared detectors can be used. They are based on the pressure waves emitted by the SF_6 molecules when illuminated by monochromatic infrared light. Special microphones detect the acoustic signal which is directly proportional to the energy absorbed. Sensitivities down to 0,01 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) can be achieved. On the other hand, the response time of about 15 s prevents the device being used for leak localisation and therefore mainly used in the factory after production or during type tests.

A second possibility is the use of infrared camera technology which enables optical gas imaging and such detect SF_6 leaks from a distance of several meters. The sensitivity of infrared camera detectors is lower than the sensitivity of photoacoustic infrared detectors.

A.6.14 Gas concentration alarm systems

Gas concentration alarm systems might be installed to monitor the SF_6 concentration in a room. Such alarm systems require detectors with very high long-term stability. The infrared absorption characteristic of SF_6 is used as the basis for most detectors of this type. An infrared source is used to heat a gas sample in a differential pressure-measuring device using a sensitive capacitance transducer. The pressure rise is measured.

Sensitivities down to 10 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) can be achieved. Automatic functional check facilities can be incorporated. In some installations, samples of air are piped from various points to a central detector. The active detection point can be selected automatically or manually.

Alarm systems incorporating SF_6 detectors are generally used only where very large volumes of SF_6 are contained in electric power equipment housed indoors, such as in gas-insulated metal-enclosed switchgear installations.

A.6.15 Gas sampling cylinders

Stainless steel cylinders with a volume smaller than 1 l are recommended. The gas quantity should be not smaller than 6 g. The gas should be sampled directly from the gas compartment using suitable fittings. If the pressure in the gas compartment exceeds the maximum allowable pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge should be used.

A.7 Reclaiming procedures

Information concerning SF₆ reclaiming procedures is reported in IEC 60480:2019, Annex E.

A.8 By-products

Information concerning SF₆ by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex B.

A.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products

Information concerning SF₆ and the procedure for evaluating the potential effects on health of by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex C.

A.10 Handling of SF₆

A.10.1 General

The scope of this subclause is to address the particularities for handling SF₆ during installation, commissioning, after repair or overhaul on site and disposal at the end-of-life of electric power equipment.

A.10.2 Filling gas compartments with SF₆

4.2 or 4.4 are applicable.

A.10.3 Topping-up gas compartments with SF₆ to the filling pressure for insulation and/or switching

4.3 or 5.1 are applicable,

A.10.4 Checking the quality of SF₆

5.2 is applicable.

A.10.5 Recovery and reclaim of SF₆

Clause 6 is applicable.

A.11 Specifications for SF₆ needed for filling or topping-up electric power equipment

If not otherwise specified by the electric power equipment manufacturer, SF₆ to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment should be topped-up, should – as a minimum – comply with the criteria given in IEC 60480.

Annex B (informative)

SF₆ mixtures

B.1 Gas properties

B.1.1 General

SF₆ mixtures are composed of SF₆ mixed with a complementary gas, N₂ or CF₄, in the concentration as specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual. The mixtures ratio ranges typically from 10 % to 75 % SF₆ for SF₆/N₂ mixtures and from 35 % to 50 % SF₆ for SF₆/CF₄ mixtures.

The purpose in using SF₆ mixtures in electrical power equipment is:

- to avoid SF₆ liquefaction at low ambient temperatures by reducing the partial pressure of SF₆;
- to reduce the quantity of SF₆ for environmental reasons and to save the costs for SF₆.

The gas properties of the SF₆ mixtures and their components are presented in the following subclauses.

B.1.2 Chemical properties

Information about chemical properties of technical grade SF₆ is reported in IEC 60376:2018, Annex A.

Information about chemical properties of N₂ is reported in Annex D.

Tetrafluoromethane CF₄ is a synthetic gas formed by 4 F atoms and one C atom. Pure CF₄ is odourless, tasteless, colourless, non-toxic, non-flammable, stable and inert.

Table B.1 lists the main chemical characteristics of CF₄.

Table B.1 – Main chemical characteristics of CF₄ and N₂

Chemical formula	CF ₄	N ₂
CAS number ^a	75-73-0	7727-37-9
REACH registration number	01-2120751230-69	-
Molecular weight	88,0043 g/mol	28,013 g/mol
Decomposition temperature	2 700 °C	≈7 000 °C
^a The CAS number is assigned by the Chemical Abstracts Service who maintains a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.		

B.1.3 Physical properties

Information about physical properties of technical grade SF₆ is reported in IEC 60376:2018, Annex A.

Information about physical properties of N_2 used as a complementary gas in SF_6 mixtures is reported in Annex D.

CF_4 in normal ambient conditions is approximately three times heavier than air. So, there is a risk of asphyxiation under conditions of insufficient ventilated areas with a low O_2 concentration. The mixing with air by convection and diffusion is slow, but once it has been mixed, it does not separate again. The thermal conductivity of CF_4 is lower than the thermal conductivity of air.

In electric power equipment the partial pressure of CF_4 is typically between 350 kPa and 650 kPa pressure. No liquefaction of N_2 or CF_4 can occur under typical operating conditions of SF_6 mixtures in insulated electric power equipment.

Table B.2 lists the main physical characteristics of CF_4 .

Table B.2 – Main physical characteristics of CF_4 and N_2

Chemical formula	CF_4	N_2
Boiling point at 101,3 kPa	-128 °C	-196 °C
Freezing point at 101,3 kPa	-187 °C	-210 °C
Sublimation point at 101,3 kPa	-	-
Liquid density at boiling point	1607 kg/m ³	808 kg/m ³
Gas density at 20 °C and 100 kPa	3,6248 kg/m ³	1,15 kg/m ³
Vapour pressure at 20°C	-	-
Critical temperature	-45,65 °C	-147 °C
Critical pressure	3 745 kPa	3 399 kPa
Critical density	633,0 kg/m ³	314 kg/m ³
Global warming potential (GWP ₁₀₀)	6 630 ^a	0
Ozone depletion potential (ODP)	0	0
^a IEC 60376:2018, Annex B.		

B.1.4 Insulating and switching behaviour

The dielectric strength of pure CF_4 or pure N_2 is about one third of the dielectric strength of SF_6 . The dielectric strength of SF_6/CF_4 mixtures is almost linearly depending on the SF_6 concentration of the mixture, whereas the dielectric strength of SF_6/N_2 mixtures shows a strong increase at low SF_6 concentrations and a tendency to saturate at high SF_6 concentrations. This saturation effect allows a reduction of the SF_6 concentration without significantly affecting the resulting dielectric strength of SF_6/N_2 mixtures. The dielectric strength of SF_6/N_2 mixtures is better than that of SF_6/CF_4 mixtures. Even though SF_6/N_2 and SF_6/CF_4 mixtures are effective dielectric mediums, the insulation performance of SF_6 mixtures is always lower than the one of pure SF_6 .

The switching performance of SF_6/CF_4 mixtures is better than that of SF_6/N_2 mixtures. Therefore SF_6/CF_4 circuit-breaker technology has been introduced in the mid 1990's to replace SF_6/N_2 circuit-breaker technology for certain applications. Even though, the switching capability of SF_6 mixtures is always lower than the one of pure SF_6 .

For more details see CIGRE Brochure 163 [11].

B.2 Safety and first aid

B.2.1 General

A.2.1 is applicable.

B.2.2 Protection of personnel

A.2.2 is applicable with the following modification:

A specific training covering the recovery and the storage condition of used SF₆ mixtures from a gas compartment is requested for personnel opening or entering the gas compartment (see B.4.2).

B.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

A.2.3 is applicable.

B.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

A.2.4 is applicable with the following modification:

All equipment and tools or measuring devices used during SF₆, N₂, CF₄ or SF₆ mixture handling potentially contain gases and/or liquids under high pressure. They should be handled with care.

B.2.5 Personal safety and protective equipment

A.2.5 is applicable.

B.2.6 Facilities and services

A.2.6 is applicable.

B.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of SF₆ mixtures

A.2.7 is applicable.

B.2.8 First aid equipment and treatment

A.2.8 is applicable.

B.3 Environmental impact

Information about the environmental effects of SF₆ mixtures is reported in IEC 60376:2018, Annex B.

B.4 Training and certification

B.4.1 General

A.4.1 is applicable.

B.4.2 Training

A.4.2 is applicable with the following additions:

Workers, handling SF₆ mixtures, should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gases, the gas handling tools and equipment, and procedures to assure the continuity of service and minimise SF₆ and CF₄ emissions.

The following additional aspects should also be covered by the training:

- environmental relevance of CF₄ emissions and mitigation approaches;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of N₂, and CF₄ (see Clause B.1);
- use of SF₆ mixtures in electric power equipment;
- procedures of handling of SF₆ mixtures (see Clause B.10);
 - filling of closed pressure systems
 - topping-up of closed pressure systems
 - recovery and reclaim of non-arced, normally and heavily arced SF₆ mixtures
- checking the quality of SF₆ mixtures on site;
- instruments for checking the SF₆ mixtures quality (see B.6.12);
- categories for SF₆ mixtures (see 3.3);
- storage and transportation of SF₆ mixtures (see Clause B.5);
- monitoring of CF₄ gas and appropriate recording of data related to local environmental regulations;
- SF₆ mixtures handling equipment in relation to the tasks (see Clause B.6).

B.4.3 Certification

A.4.3 is applicable.

B.5 Storage and transportation

B.5.1 General

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

An empty SF₆, CF₄, N₂ or SF₆ mixture container can still contain a residual amount of gas. It should be stored and transported in the same way as a filled container.

B.5.2 Storage of containers filled with SF₆ mixture

SF₆ mixtures can be stored in two ways either as a gas or as a liquid. Depending on the temperature and the partial pressure of the SF₆, partial SF₆ liquefaction can occur (see Figure A.1). Gaseous storage without SF₆ liquefaction has the advantage of preserving the uniformity of the SF₆ mixture for reuse (see Clause B.8) but requires large storage volumes. Heating elements can be applied to storage containers to increase the effective storage temperature and consequently the pressure. Such, the capacity of the storage container can be substantially increased.

The filling factor is the weight of the SF₆ mixture contained in the container divided by the container volume and is usually specified in kg/l. It depends on the design pressure and the maximum temperature of the container and the mixture composition. The maximum filling factor, the maximum pressure and the maximum temperature of the container should be strictly regarded. The manufacturer of the container should declare these values. Use of a weighing scale to prevent overfilling.

The maximum storage pressure for a SF₆ mixture $p_{\max}$ to avoid liquefaction can be calculated according to the following formula:

$$p_{\max} = \frac{p_l}{x}$$

where:

p_l is the SF₆ vapour pressure at the minimum storage temperature;

x is the SF₆ concentration of the SF₆ mixture.

The minimum storage volume for the SF₆ mixture $V_{\min}$ to avoid liquefaction can be calculated according to the following formula:

$$V_{\min} = \frac{m_{\text{SF}_6}}{\rho_l}$$

where:

m_{SF_6} is the SF₆ mass to be stored;

ρ_l is the maximum SF₆ density to avoid SF₆ liquefaction at the minimum storage temperature (see Figure A.1).

Gaseous storage with SF₆ liquefaction will not preserve the uniformity of the mixture but it gives the ability to reduce the storage volume and economically transport large quantities of SF₆ mixtures. Preferably gaseous storage with SF₆ liquefaction should only be used for the disposal of the mixture.

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

Containers should be refillable and clearly labelled to identify their content. Containers containing different grades of SF₆ mixtures should be physically separated.

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

Table B.3 gives an overview of container types and required labelling. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table B.3 – Examples of container types required for storage and transportation of SF₆ mixtures and their complementary gases

Gas / fluid	Characteristic	Container type
Technical grade CF ₄	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
Technical grade N ₂	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (black shoulder).
Used SF ₆ mixture suitable for reuse ^a	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
Used SF ₆ mixture not suitable for reuse	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
	Liquefied gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products ^b	Special containers approved for storing and transportation of toxic and corrosive gases (such as hydrofluoric acid HF) with a corrosion-proof valve and adapter. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (yellow shoulder).
^a For more details see IEC 60480. ^b Used SF ₆ mixture containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products to meet IEC 60480, Table 3 or Table 4, and allowing an easier transportation.		

B.5.3 Transportation of containers filled with SF₆ mixture

International regulations for shipment of electric power equipment containing SF₆ mixtures and SF₆ mixture containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of SF₆ mixtures are summarised in Table B.4.

Table B.4 – International regulations for shipment of SF₆ mixtures

Gas / fluid	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade CF ₄	Compressed gas	2	UN 1982 COMPRESSED GAS N.O.S. 2.2	UN 1982 COMPRESSED GAS N.O.S. (tetrafluoromethane) 2.2
Technical grade N ₂	Compressed gas	1A	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. 2.2	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. (nitrogen) 2.2
Used SF ₆ mixture suitable for reuse ^c	Liquefied inert gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride and air or nitrogen or tetrafluoromethane) 2.2
Used SF ₆ mixture not suitable for reuse	Liquefied inert gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride and air or nitrogen or tetrafluoromethane) 2.2
	Liquefied toxic and corrosive gas (gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products) ^d	2TC	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. 2.3 + 8	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. (Sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride and thionyl fluoride) 2.3 + 8

^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20].

^b Final classification, including correct UN code and hazards identification numbers (e.g. H280), are listed in the safety data sheet and/or in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

^c For more details see IEC 60480.

^d According to UN regulations for transportation, a gas is classified “toxic” when its LC50 < 5 000 µl/l (ppmv). Used SF₆ mixtures containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on-site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products and allowing an easier transportation.

N.O.S.: “not otherwise specified”.

B.5.4 Storage and transportation of electric power equipment containing SF₆ mixture

A.5.4 is applicable.

B.5.5 Responsibilities

A.5.5 is applicable with the following modification:

The owner of the electric power equipment utilising SF₆ mixtures is responsible for record-keeping regarding SF₆ and CF₄ banked in electric power equipment or stored in containers as well as emission rates on a yearly basis.

B.6 Description of handling equipment

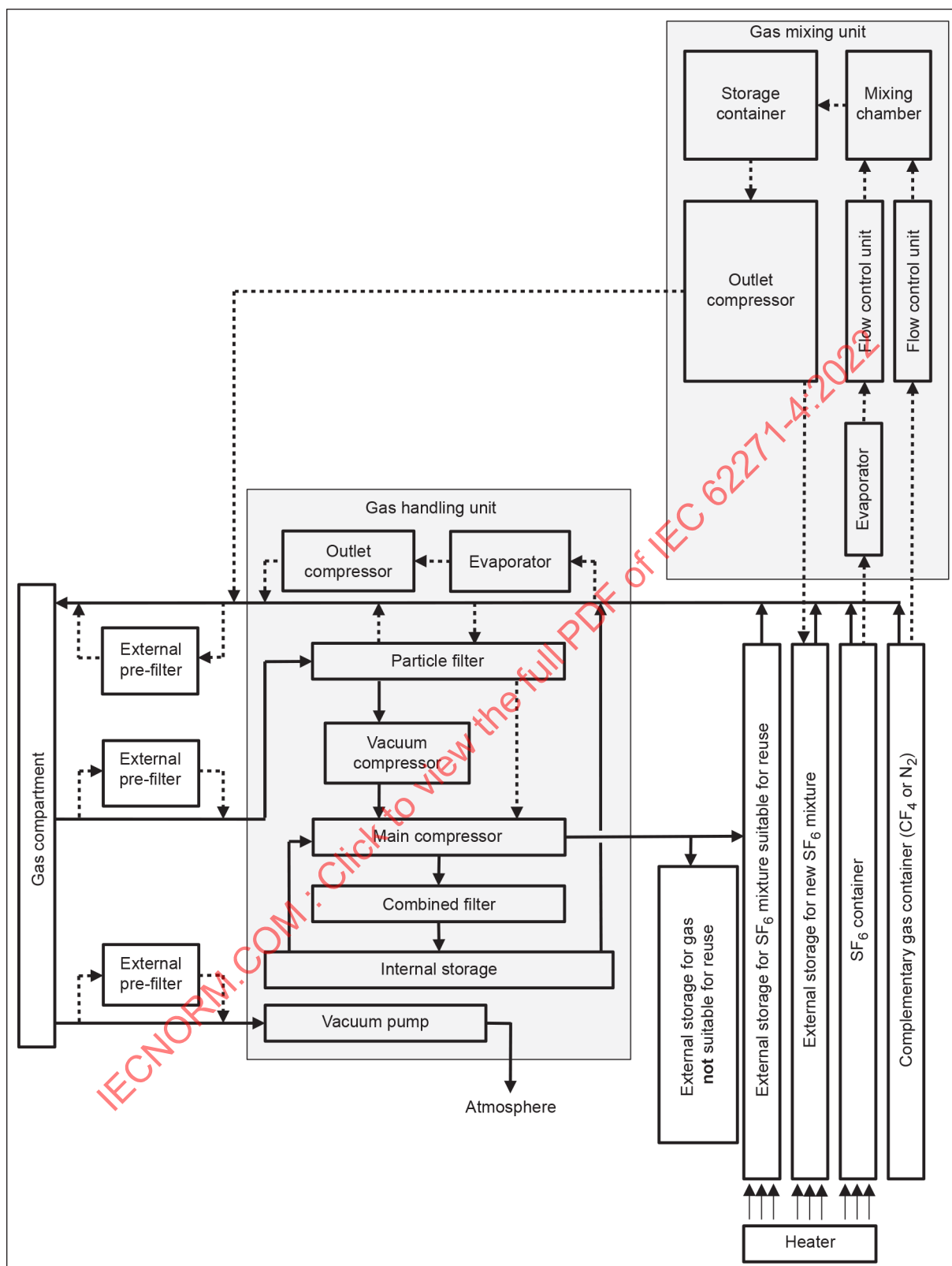
B.6.1 General

B.6.1.1 Overview

Clause B.6 gives information about minimum functionality and performance criteria for SF₆ mixtures handling equipment and specific components.

The appropriate type and size of the handling equipment should be chosen according to the quantity of the SF₆ mixture to be handled. Figure B.1 shows a basic functional scheme. The typical functions are as follows:

- evacuation of air or N₂ from the gas compartment;
- filling of SF₆ mixture in the gas compartment from external storage or through gas mixing device;
- recovery of SF₆ mixture from the gas compartment;
- storage of SF₆ mixture;
- removal of contaminants;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- container to container transfer.



IEC

Figure B.1 – Schematic view of an example of a handling equipment for SF₆ mixture

B.6.1.2 Qualification of handling equipment

A.6.1.2 is applicable.

B.6.2 Filters

A.6.2 is applicable.

B.6.3 Vacuum pump

A.6.3 is applicable.

B.6.4 Main and vacuum compressors

A.6.4 is applicable.

B.6.5 Outlet compressor

When the pressure in the storage container is higher than the pressure in the gas compartment, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to fill in the gas. The outlet compressor, usually employing a piston type compressor, operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas compartment.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination.

B.6.6 External and internal gas storage containers

A.6.6 is applicable.

B.6.7 Evaporator and gas storage container heater

A.6.7 is applicable.

B.6.8 Gas piping and pipe junctions

A.6.8 is applicable.

B.6.9 Control instruments

A.6.9 is applicable.

B.6.10 Safety valves

A.6.10 is applicable.

B.6.11 Flexible hose connections

A.6.11 is applicable.

B.6.12 Portable devices for gas measurement**B.6.12.1 General**

A.6.12.1 is applicable with the following modifications:

- The filling pressure of an electric power equipment, filled with a SF₆ mixture is typically slightly higher than the filling pressure of an electric power equipment, filled with SF₆. The maximum inlet pressure of the portable devices for gas measurement should be adapted accordingly.

- Table B.5 provides an overview on devices for gas measurement including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in their technical datasheet.

Table B.5 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
SF ₆ concentration measuring device	SF ₆ concentration ^a	0 % to 100 %	-10 °C to 40 °C	±1 % (SF ₆ /N ₂) ±2 % (SF ₆ /CF ₄)
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as for example SO ₂	1 µl/l (ppmv) to 250 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±15 % of the full range
Pressure gauge ^b	Pressure	0 kPa to 1 500 kPa	-10 °C to 40 °C	±1 % of the full range
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C
^a The SF ₆ concentration measurement instrument should be calibrated for the type of SF ₆ mixture to assess (SF ₆ /N ₂ and/or SF ₆ /CF ₄). ^b If a temperature compensated pressure gauge is used, it should be calibrated for the type and ratio of SF ₆ mixture.				

B.6.12.2 Frost / dew point meter

A.6.12.2 is applicable.

B.6.12.3 Gas concentration measuring devices – SF₆ concentration measuring devices

A.6.12.3 is applicable with the following modifications:

The measurement result of the device that uses the speed of sound in the gas to determine the SF₆ concentration of a SF₆ mixture could be affected significantly by the presence of a third gas as contaminant in the mixture. The contaminant could be air or resulting from a cross contamination during the handling of different type of mixtures with the same handling equipment, such N₂ for SF₆/CF₄ or CF₄ for SF₆/N₂ mixtures. In case of abnormal measurement results with this type of device, further investigation should be conducted and other measurements technics can be used (see IEC 60480:2019, 7.2).

B.6.12.4 Analysers of reactive gaseous by-products

A.6.12.4 and IEC 60480:2019, Annex A, are applicable.

B.6.12.5 Portable gas detectors

A.6.12.5 is applicable.

B.6.13 Gas leakage tester

A.6.13 is applicable.

B.6.14 Gas concentration alarm systems

A.6.14 is applicable.

B.6.15 Gas sampling cylinders

A.6.15 is applicable.

B.6.16 Gas mixing unit

In Figure B.1, top right, a gas mixing unit is shown. It is used to mix SF₆ with a complementary gas, typically N₂ or CF₄, according to a preselected gas ratio during filling or topping-up of electric power equipment.

The flows of the SF₆ and the complementary gas are controlled by flow control units to fill the storage container with the preselected mixture. The outlet pressure (i.e. the filling pressure in the gas compartment) is controlled by the outlet compressor.

Desirable characteristics are:

- adjustable SF₆ concentration and outlet pressure (i.e. filling pressure);
- gas mixing ratio (i.e. SF₆ concentration): 10 % to 75 %;
- maximum outlet pressure at 20 °C: up to 1 500 kPa;
- SF₆ inlet in liquid state;
- possibility of mixing quantities of gas, suitable for topping-up or filling of gas compartments.

B.7 Reclaiming procedures

Information concerning SF₆ mixture reclaiming procedures is reported in IEC 60480:2019, Annex E.

B.8 By-products

Information concerning SF₆ mixtures by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex B.

B.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products

Information concerning SF₆ mixtures and the procedure for evaluating the potential effects on health of by-products is reported in IEC 60480:2019, Annex C.

B.10 Handling of SF₆ mixtures

B.10.1 General

The scope of this subclause is to address the particularities for handling SF₆ mixtures during installation, commissioning, after repair or overhaul on site and disposal at the end-of-life of electric power equipment.

SF₆ mixtures are used in electric power equipment mainly for cold ambient applications, typically under -40 °C. Other applications at normal ambient temperature include gas-insulated transmission lines and gas-insulated transformers. SF₆ is mixed with a complementary gas, typically N₂ or CF₄, in the concentration as specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual, typically from 10 % to 75 % SF₆ for SF₆/N₂ mixtures and from 35 % to 50 % SF₆ for SF₆/CF₄ mixtures.

The mixing ratio should be kept within the tolerances given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer in order to guarantee the insulation and/or switching properties

B.10.2 Filling gas compartments with SF₆ mixtures

B.10.2.1 General

Basically, three different procedures can be used for filling (see B.10.2.2, B.10.2.3 and B.10.2.4).

B.10.2.2 Sequential filling

The specific filling procedure of a gas compartment with a SF₆ mixture is the following:

- Use the procedure as described in 4.2 to fill the gas compartment until the partial SF₆ filling pressure for insulation and/or switching is reached. Due to the lower vapour pressure, SF₆ should be filled in first. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.
- Connect the complementary gas container and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.

NOTE 1 Unless otherwise specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual, the vacuum duration can be prolonged in order to better remove humidity, when for example the ambient temperature is freezing.

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

B.10.2.3 Filling with a mixing device

As a second option and to reduce the probability of accidental mistakes, an automated gas mixing device can be used (see Figure B.1).

B.10.2.4 Filling a premixed SF₆ mixture

As a third option premixed gases, obtained from a gas manufacturer, can be used. In this case, the filling process should be according to 4.2 or 4.4.

B.10.3 Topping-up gas compartments with SF₆ mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching

If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, one of the following two procedures should be applied:

- If the mixing ratio of the remaining gas is within the specifications given by the manufacturer, topping-up can be done according to 4.3 or 5.1 by using a SF₆ mixture having the specified mixing ratio,
- As a second option the following procedure is possible:
 - Evaluate the intermediate pressure p_{int} as:

$$p_{\text{int}} = x \times p_{\text{re}} + (1-x) \times p_{\text{i}}$$

where

x is the required SF₆ concentration of the SF₆ mixture;

p_{re} is the filling pressure for insulation and/or switching of the SF₆ mixture;

y is the actual SF₆ concentration of the SF₆ mixture in the pre-filled gas compartment;

p_i is the actual pressure of the SF₆ mixture in the pre-filled gas compartment;

- Due to the lower vapour pressure, SF₆ should be filled in first. Connect the SF₆ container and fill the gas compartment until the intermediate pressure p_{int} is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.
- Connect the complementary gas container and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching p_{re} .

In order to avoid mistakes, the measurement and calculation of the pressure values p_{int} and p_i as well as the topping-up should be performed at the same temperature, with p_{re} being the filling pressure for insulation and/or switching converted to that same temperature.

NOTE 1 SF₆ to be introduced into the gas compartment can be either technical grade SF₆ or used SF₆ suitable for reuse.

Alternatively, gas mixing devices (see B.6.16) or premixed gases can be used to speed up the process and reduce the probability of accidental mistakes.

NOTE 2 Premixed gases can be obtained from gas manufacturers.

B.10.4 Checking the quality of SF₆ mixtures

B.10.4.1 General

5.2 is applicable.

NOTE When SF₆ is partially liquefied, the actual or measured SF₆ concentration can differ from the required SF₆ concentration of the SF₆ mixture. B.5.2 describes how to avoid liquefaction.

B.10.4.2 Long term variation of the composition of SF₆ mixtures

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

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

B.10.4.3 Tolerance on the composition of SF₆ mixtures

The tolerance on the composition of a SF₆ mixture should be specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual, taking into account the possible use of “used SF₆ mixture suitable for reuse” and the incertitude associated to measurement devices, for typical gas handling and cold service conditions. Unless otherwise specified by the electric power equipment manufacturer, the tolerance on composition of SF₆ mixtures for reuse are specified in IEC 60480.

B.10.5 Recovery and reclaim of SF₆ mixtures

Clause 6 is applicable.

B.10.6 Rectifying the composition of SF₆ mixtures

This subclause applies to gas compartments containing SF₆ mixtures whose mixing ratio does not comply with the specifications given in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, the following procedure should be applied:

- Evaluate the pressure p_{rec} :

$$\text{for } y \leq x \quad p_{\text{rec}} = p_{\text{re}} \times \frac{1-x}{1-y}$$

$$\text{for } y > x \quad p_{\text{rec}} = p_{\text{re}} \times \frac{x}{y}$$

where:

p_{re} is the filling pressure for insulation and/or switching of the SF₆ mixture;

x is the required SF₆ concentration of the SF₆ mixture;

y is the actual SF₆ concentration of the SF₆ mixture in the gas compartment;

- if the actual pressure of the SF₆ mixture in the gas compartment is smaller than p_{rec} , the gas compartment should be topped-up according to the procedure described in B.10.3;
- if the actual pressure of the SF₆ mixture in the gas compartment is larger than or equal to p_{rec} , recover the SF₆ mixture in the gas compartment to p_{rec} and then top-up the gas compartment as follows:
 - for $y \leq x$, top-up the gas compartment with SF₆ to the filling pressure for insulation and/or switching of the SF₆ mixture.
 - for $y > x$, top-up the gas compartment with the complementary gas to the filling pressure for insulation and/or switching of the SF₆ mixture.

B.11 Specifications for SF₆ mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment

If not otherwise specified by the electric power equipment manufacturer, SF₆ mixtures to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment is to be topped-up, should – as a minimum – comply with the criteria given in IEC 60480.

Annex C (informative)

Compressed air

C.1 Gas properties

C.1.1 General

Compressed air has a global warming potential of zero and no ozone depletion potential. The properties of compressed air are mainly determined by the major gas components N_2 and O_2 . Compressed air consists of about 78 % N_2 , 21 % O_2 , 1 % Ar, and smaller amounts of other gases like CO_2 , H_2O , Ne or He,

NOTE For more details about substances in compressed air see ISO 8573-1:2010.

C.1.2 Chemical properties

Compressed air is filtered dehumidified ambient air. Even at the maximum operating temperatures, no gas decomposition for example by catalytic reactions occurs.

Table C.1 lists the typical chemical characteristics of the two main components of compressed air.

Table C.1 – Main chemical characteristics of N_2 and O_2

Chemical formula	N_2	O_2
CAS number ^a	7727-37-9	7782-44-7
REACH registration number	-	-
Molecular weight	28,013 g/mol	31,999 g/mol
Decomposition temperature	≈ 7 000 °C	≈ 4 000 °C
^a The CAS number is assigned by the Chemical Abstracts Service who maintains a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.		

C.1.3 Physical properties

The thermal conductivity of compressed air is higher than that of SF_6 , but the overall heat transfer properties are worse due to the higher viscosity and lower density. In electric power equipment the typical pressure range of compressed air is between 100 kPa and 1 500 kPa. Liquefaction of the two main components of compressed air does not occur under typical operating conditions of electric power equipment, even for very low temperature applications down to -60 °C. However, humidity will condense at different low temperatures depending on its partial pressure. See ISO 8573-1 for different purity classes.

Table C.2 lists the main physical characteristics of the two main components of compressed air.

Table C.2 – Typical physical characteristics of N₂ and O₂

Chemical formula	N ₂	O ₂
Boiling point at 101,3 kPa	-196 °C	-183 °C
Freezing point at 101,3 kPa	-210 °C	-219 °C
Sublimation point at 101,3 kPa	-	-
Liquid density at boiling point	808 kg/m ³	1 141 kg/m ³
Gas density at 20 °C and 100 kPa	1,15 kg/m ³	1,31 kg/m ³
Vapour pressure at 20 °C	-	-
Critical temperature	-147 °C	-119 °C
Critical pressure	3 399 kPa	5 043 kPa
Critical density	314 kg/m ³	436 kg/m ³
Global Warming Potential (GWP ₁₀₀)	0	0
Ozone depletion potential (ODP)	0	0

C.1.4 Insulating and switching behaviour

The dielectric strength of compressed air is about 40 % of the dielectric strength of SF₆ at the same pressure and significantly better than that of pure N₂ which is due to the electronegative character of O₂. O₂ has a weak tendency to bind free electrons forming ions with lower mobility making the development of electron avalanches more difficult. See CIGRE Brochure 730 [12].

Compared to SF₆ at the same pressure, compressed air is a moderate arc quenching media. When an electric arc is cooling in compressed air, it remains conductive to a relatively low temperature, thus minimising current chopping before current zero, and thereby avoiding high overvoltages.

C.2 Safety and first aid

C.2.1 General

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

- switch off and isolate;
- secure against re-closing;
- verify that electric power equipment is de-energised;
- earth and short-circuit the electric power equipment;
- cover or fence off nearby live parts.

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

Table C.3 lists the major issues to consider when working with electric power equipment containing compressed air.

Table C.3 – Measures when working with electric power equipment containing compressed air

Item	Work in the vicinity of electric power equipment (operation of electric power equipment, visual check, room-cleaning)	Filling, topping-up, recovery, evacuation of gas compartments	Opening of gas compartments, work on open gas compartments
Operational manuals	Not required	Applicable	Applicable
Training	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Gas handling equipment	Not required	Applicable ^b	Only for heavily arced compressed air
Cleaning / neutralising equipment	Not required	Not required	Only for heavily arced compressed air
Personal protection equipment	Not required ^c	Only for heavily arced compressed air ^c	Only for heavily arced compressed air ^c
^a General information should be specified according to type of work and installation, according to local safety regulations. ^b Used compressed air can be released to the atmosphere optionally via adequate filters until ambient pressure is reached (local regulations should be considered). Adequate filters should be specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. No evacuation of gas compartments is required for non-arc'd and normally arc'd compressed air. ^c Local regulations can require safety shoes, helmet, and protective goggles to get in the vicinity of the switchgear.			

A notice stating instructions for giving first-aid (see C.2.8) should be displayed while compressed air is being handled in any location.

When a gas compartment containing heavily arced compressed air is opened after the electric power equipment has been in service, personnel should wear suitable protective clothing in order to avoid contact with the fine solid by-products, which can be present. Particular attention should be given to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which can contain heavily arced compressed air should:

- use suitable tools and handling equipment;
- wear suitable protective clothing (see C.2.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their handling equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components which have been in contact with by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues.

C.2.2 Protection of personnel

Safety instructions given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed by personnel handling compressed air.

Table C.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given as the operator opens or enters the gas compartment.

Table C.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments

		Potential risk	Safety precaution	Safety equipment and tools
Non-arc'd and normally arc'd compressed air	Heavily arc'd compressed air	Fumes of cleaning substances	Ventilation	Suction ventilator
		Residual reactive gaseous by-products	Ventilation Wear personal protective equipment Measurement of concentration of residual reactive gaseous by-products	Suction ventilator Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus or, at least, breathing protective mask (filter)
		Solid by-products and adsorber materials	Removal of solid by-products and adsorber materials Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Vacuum cleaner Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus or, at least, breathing protective mask Protective goggles Environmental protection against rain or wind

Eating, drinking and smoking are prohibited when accessing or opening a gas compartment which contained heavily arc'd compressed air. It is recommended that clothes should be changed, and the skin washed as soon as possible after the work to prevent potential danger of irritation or burns.

C.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

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

Reusable safety equipment and tools should be cleaned, for example washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. The same neutralisation time periods as described in IEC 60480:2019, Table 11, can be used.

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

C.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

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

All equipment and tools used during compressed air handling potentially contain compressed air under high pressure. They should be handled with care.

C.2.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the electric power equipment containing compressed air itself. Safety shoes, helmet, and protective goggles can be required according to local regulations to get in the vicinity of the switchgear.

In case of sudden release of heavily arced compressed air due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to C.2.7.

The required protective equipment should be specified in the operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer.

For handling of non-arced or normally arced compressed air, less or no additional personal safety and protective equipment as listed below is needed depending on the design of electric power equipment and local regulations. The required protective equipment should be specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table C.4, workers engaged in handling of heavily arced compressed air are provided with the following personal safety and protective equipment:

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166 [3]);
- breathing protective mask: to be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas only;
- full / half face mask: for short-term inspection and work where ventilation can be provided but where the concentration of by-products can exceed the appropriate maximum level, a face mask with changeable active charcoal filter should be used according to local regulations (for example European Standards EN 140 [4], EN 14387 [5] and EN 143 [6] specify masks, gas filters and particle filters, respectively. Combined filters of type A2/B2/E2/K2/P3 or A3/B3/E3/K3/P3 manufactured to these standards are available);
- single use protective overall: dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap; pocketless, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene) disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;
- self-contained breathing apparatus (respirator): when entering and/or working at indoor applications after an abnormal leakage or a sudden release due to internal arcing when the amount of by-products are exceeding TWA values (see C.9.2.4.6), a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136 [7]);
- environmental protection for outdoor work locations: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open;
- vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping according to dust class H (high hazard). Dust classes are specified in Annex AA of IEC 60335-2-69:2021;
- suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment can be portable or permanently installed, depending on the size of the installation.

C.2.6 Facilities and services

Where gas compartments containing heavily arced compressed air are opened (after recovery of the compressed air), adequate washing facilities for workers and a supply of water for preparing cleaning solutions should be available.

C.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of compressed air

In case of sudden release of compressed air due to internal arc or external fire the affected rooms should be left immediately.

After ventilation of the rooms and checking of possible toxic by-products only trained and certified personnel are allowed to re-enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment.

Table C.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions and as well as the safety equipment and tools required.

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

The same rules apply to areas below the floor level at which the release occurred and which are poorly ventilated or unventilated (for example cable trenches, inspection pits, drainage systems). The required ventilation time depends on type and amount of released gas.

A second person being in continuous visual and audible contact should be present, when entering areas which might have a high concentration of by-products.

Outdoor equipment needs standard measures for outdoor conditions to be applied (for example rain protection, wind protection).

C.2.8 First aid equipment and treatment

C.2.8.1 General

First aid equipment includes:

- normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution,
- for heavily arced compressed air under the circumstance, that there are arced fluorinated substances (for example PTFE) inside the gas compartment: calcium gluconate gel (HF antidote gel);
- means for contacting emergency services;
- guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see C.2.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

C.2.8.2 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation after contact with heavily arced compressed air, all personnel should immediately leave the affected area and move into fresh air. Contaminated clothing is removed, and the affected part washed with cool running water. Apply calcium gluconate gel as a remedy after washing for fluoride acid on skin. Professional medical advice should be sought.

C.2.8.3 Irritation of the eyes

In case of signs of eyes irritation after contact with heavily arced compressed air, all personnel should immediately leave to affected area and move into fresh air. Irrigation of the eye or eyes is carried out immediately and continued until a medical professional advises the patient to stop.

C.2.8.4 Breathing difficulty

All personnel should immediately evacuate the affected area containing heavily arced compressed air and move into the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance should be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration should be immediately commenced by trained and qualified personnel. Automated external defibrillator could be used according to local regulations.

C.3 Environmental impact

C.3.1 General

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

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

C.3.2 Ecotoxicology

C.3.2.1 Definition

Ecotoxicology has been defined as: "the branch of toxicology concerned with the study of toxic effects, caused by natural or synthetic pollutants, to the constituents of ecosystems, animal (including human), vegetable and microbial, in an integral context".

C.3.2.2 Toxicology

Compressed air is not toxic.

C.3.2.3 Environmental toxicology

Air is the main gas of our ecosystem and does not harm it. Compressed air has no reported potential to be acute or chronic ecotoxic. It presents no danger to surface and ground water or the soil. A biological accumulation in the nutrition cycle has no impact. Moreover, compressed air is:

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

Compressed air does not need to be handled in a closed cycle, to avoid any deliberate release to the environment. Gas recovery and reuse is not necessary. Used compressed air can be released to the atmosphere, optionally via filters, and replaced by new compressed air on-site either from dedicated containers or filling devices (see C.6.16 and C.10.5).

Gas losses do not need to be reported and no specific legal constraints apply to the use of compressed air in electric power equipment.

C.3.3 Ozone depletion

Compressed air and their by-products do not contain either chlorine or bromine and therefore do not affect stratospheric ozone.

C.3.4 Global warming/climate change (greenhouse effect)

Compressed air does not contribute to the greenhouse effect and has a global warming potential of zero.

C.3.5 Environmental impact of by-products

Major failures causing release of heavily arced compressed air are rare. The quantities released in such extreme cases are limited by the fact that standard designs of products are compartmented, limiting the fault to the place where it originates. The gas quantities concerned are subsequently small fractions of the total gas banked in an electric power equipment.

By-products can be converted into neutral products. Procedures for their treatment, handling and disposal ensure that they have a negligible impact on the environment.

C.4 Training and certification

C.4.1 General

Non-arc'd or normally arc'd compressed air has no negative environmental impact. Thus, operational safety and environmental aspects for electric power equipment containing compressed air are not tightly coupled together and therefore do not have to be treated at the same time.

The operational safety during work on electric power equipment involving gas handling (for example development, manufacturing, testing, erection, commissioning, maintenance, repair, service, and dismantling at the end of life) should be assured by following to the safety instructions given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. In particular, safety precautions for handling of pressurized systems should be described.

For safe operation, particularly when heavily arc'd compressed air is to be handled, a complementary option is to train personnel by additional trainings which can be performed for example in a special training centre of the user, in the factory or on-site during erection, commissioning and maintenance of installed electric power equipment. Related to the tasks to be completed by trained personnel, the training can be adopted to cover different scopes, ranging from for example basic training to advanced training. The training should be related to a specific design (for example high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage switchgear, etc.) and different designs require different trainings.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer, operating instruction manuals of the handling equipment, safety data sheets (SDS), instrument datasheets, international standards, CIGRE brochures, and the subclauses of Annex C.

C.4.2 Training

Workers, handling compressed air, should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and equipment, and procedures to assure the continuity of service and minimize emissions. Special trainings for handling compressed air can be offered by the electrical power equipment manufacturers, because type of electric power equipment can be different.

The different aspects to be covered by a training can be the following:

- safety and first aid (see Clause C.2), in particular:
 - local regulations, emergency plans and instructions in case of for example internal arc fault;
 - safety equipment required for personal protection;
 - safety equipment required for working on open gas compartments in relation to the task;
 - safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products;
- basic knowledge of relevant environmental issues;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of compressed air;
- use of compressed air in electric power equipment (insulation, switching);
- existence of local regulations and international standards in relation to the task;
- compressed air handling, hazards and health characteristics;
- design of electric power equipment (properties and application/functionality);
- checking the quality of compressed air;
- the operating instruction manuals given by the electric power equipment manufacturer in relation to the tasks;
- types of gas compartments filled with compressed air;
- instruments and procedures for checking the compressed air quality;
- procedures of handling of compressed air:
 - topping-up of closed pressure systems;
 - air evacuation and gas filling, topping-up, release of non-arc and normally arc compressed air to the atmosphere;
 - reclaim of heavily arc compressed air; handling, neutralisation and removal of by-products, handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products;
- leak detection methods and repair techniques;
- categories for compressed air (see 3.4);
- storage and transportation of compressed air (see Clause C.5);
- compressed air handling equipment in relation to the tasks (see Clause C.6);
- procedures for entering the switchgear room in case of abnormal leakage and/or sudden release of heavily arc compressed air due to fire or internal arc fault (see C.2.7);
- dismantling of electric power equipment and part sorting (see Clause 7);
- operation of tight drilling systems, if necessary (see 7.4).

C.4.3 Certification

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

The following records should be retained:

- the training content;
- the date on which the training was completed.

Restrict the tasks to be performed to personnel who have been certified for the respective skill levels and sustain a high level of expertise.

C.5 Storage and transportation

C.5.1 General

Storage and transportation of compressed air either in containers or in electric power equipment should always be carried out in accordance with local and international regulations.

C.5.2 Storage of containers filled with compressed air

Generally, compressed air is stored in gaseous state at pressures up to 30 000 kPa. Compressed air cannot be liquefied in containers for transportation at typical ambient temperatures. No recovery of compressed air is needed since it can be released to the atmosphere optionally via filters (see C.10.5). For handling of bigger gas volumes, on-site generation of compressed air for example by dedicated purifying and filling devices (see C.6.16) is an alternative way of gas supply.

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

Containers should be refillable and clearly labelled to identify their contents.

When samples of used compressed air are stored for gas analysis off-site, the storage containers should comply with local and international regulations on pressurised containers. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table C.5 gives examples of container types. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table C.5 – Examples of container types required for storage and transportation of compressed air

Gas	Characteristic	Container type
Technical grade compressed air ^a	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).
Used compressed air	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: The container shoulder should be specially marked to avoid confusion between used and technical grade compressed air.
^a Avoid any contamination of containers dedicated to compressed air.		

C.5.3 Transportation of containers filled with compressed air

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

- ADR: German, French, English;

- RID: English;
- IMDG code: English;
- IATA – DGR: English.

The international regulations for shipment of compressed air are summarised in Table C.6.

Table C.6 – International regulations for shipment of compressed air

Gas	Characteristic	Class	Final classification ^a	Transport document ^a
Technical grade compressed air	Compressed gas	1A	UN 1002 COMPRESSED AIR 2.2	UN 1002 COMPRESSED AIR 2.2
Used compressed air	Compressed gas	1A	UN 1002 COMPRESSED AIR 2.2	UN 1002 COMPRESSED AIR 2.2
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20]. N.O.S.: “not otherwise specified”.				

C.5.4 Storage and transportation of electrical power equipment containing compressed air

Electric power equipment filled with compressed air should be stored and transported according to local and international regulations.

International regulations for shipment are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation.

According to ADR, RID and IAT transportation codes the filling pressure should not exceed 200 kPa (relative) at 20 °C.

C.5.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising compressed air is responsible for the proper use, transportation, and disposal of the electric power equipment and the gas. No record keeping regarding banked compressed air is required.

C.6 Description of handling equipment

C.6.1 General

C.6.1.1 Overview

This subclause gives information about minimum functionality and performance criteria for compressed air handling equipment and specific components.

For handling compressed air, no general-purpose handling equipment is needed, and the required functions are realized as follows:

- controlled release of compressed air from the gas compartment to the atmosphere via a ventilation valve (see Figure C.1);

- removal of contaminants by portable filters (see C.6.2);
- if required: evacuation of compressed air from the gas compartment by a vacuum pump (see C.6.3);
- filling of compressed air into the gas compartment (see C.6.16);
- either from pre-filled containers via pressure reducers;
- or via a dedicated gas purifying and filling device;
- taking gas samples from the gas compartment by direct transfer to sample cylinders.

Compressed air does not have any negative environmental impact and does not need to be recovered from electric power equipment from environmental point of view. When releasing heavily arced compressed air to the atmosphere, filters should be used to absorb possible by-products which can be present in heavily arced compressed air. Indoor release of heavily arced compressed air should be avoided.

Figure C.1 shows an exemplary flow chart of controlled release of compressed air from an electric power equipment (closed pressure system) to the atmosphere. In case of releasing heavily arced compressed air, after having reached ambient pressure in the gas compartment, a dedicated vacuum pump (see C.6.3) connected to the ventilation valve can be used to release the residual compressed air quantity to the atmosphere.

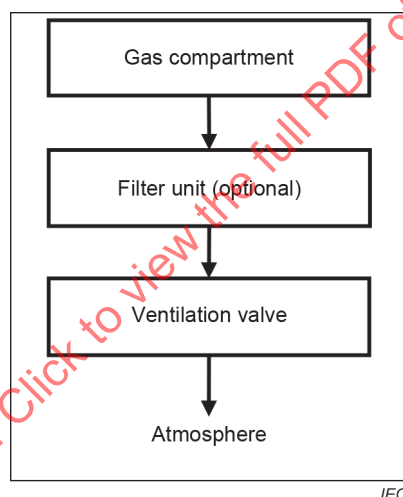


Figure C.1 – Controlled release of compressed air

C.6.1.2 Qualification of handling equipment

Before using any handling equipment, it should be ensured that the handling equipment can be used for the intended task. Handling equipment for the same task but intended for another gas and not qualified for compressed air might be damaged, malfunction or give wrong readings and therefore might generate a risk to the operator or the handling equipment or the electric power equipment.

C.6.2 Filters

C.6.2.1 General

Filters are required to remove reactive gaseous by-products, humidity and solid particles or oil droplets before either storing compressed air in a container or releasing heavily arced compressed air to the atmosphere.

Table C.7 shows typical filter types used during release of compressed air to the atmosphere.

Table C.7 – Typical filter types used during release of compressed air to the atmosphere

Filter type	Tasks	Major characteristics
Particle filter	Removes solid by-products and other particles.	Pore size lower than 1 µm.
Dry filter	Removes reactive gaseous by-products and humidity.	Residual humidity lower than 100 µl/l (ppmv). No residual NO _x concentration. OEL values see Table C.11. Particle retention ability.
Oil filter	Removes oil when required.	Special filter utilising active charcoal.

C.6.2.2 Filter types

C.6.2.2.1 Particle filter

Some by-products, which are generated during switching operations, are made up of fine solid particles (for example metal particles). The inner side of the particle filter consists of paper or suitable bonded fabric able to retain the particles in a range higher than 1 µm. Normally, the particle filter is installed at the outlet of the electric power equipment to protect the handling equipment as well as the gas storage container or to avoid the release of particles to the atmosphere, when heavily arced compressed air is released to the atmosphere.

C.6.2.2.2 Humidity and gaseous by-product filter (dry filter)

Appropriate filters can adsorb humidity and reactive gaseous by-products like nitrogen oxides (NO_x) or ozone (O₃). Molecular sieves with a pore size smaller than 0,5 nm should be used. In case a bigger pore size is used and under certain conditions, thermodynamic exothermal reactions with humidity can occur, resulting in filter overheating. Always check the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer if special filter materials are needed. Also check the size of the filter, so that it is large enough to achieve the required residual humidity.

C.6.2.2.3 Combined filter

Instead of separate particle filters and humidity and gaseous by-products filters also filters, which combine both filtering principles, can be installed.

C.6.2.2.4 Oil filter

An oil trap containing activated charcoal should be inserted in the compressed air cycle if an oil-lubricated machine is used or if an oil-insulated electric component is included in the electric power equipment utilising compressed air. The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

C.6.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the electric power equipment from air or other gases, which can be released to the atmosphere, but which do not comply with the specifications of the compressed air to be used in the electric power equipment. The vacuum pump is also used to evacuate electric power equipment containing heavily arced compressed air via filters.

Evacuation of the electric power equipment containing atmospheric air is not required if after filling the quality of the compressed air inside the electric power equipment fulfils the specifications as given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 0,1 kPa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 0,01 kPa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 0,1 kPa (recommended value is lower than 0,01 kPa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended.

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

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

C.6.4 Main and vacuum compressors

(Main) compressors can be used as part of a purifying and filling device (see C.6.16). Alternatively, compressed air can also be filled from external gas storage containers. Vacuum compressors are not used for the handling of compressed air.

C.6.5 Outlet compressor

An outlet compressor, which is located between the gas storage container and the gas compartment is not needed for the handling of compressed air, since air can be stored at high pressures in gaseous form. However, it can be required if compressed air is produced at site by a purifying unit (see C.6.16).

C.6.6 External and internal gas storage containers

External gas storage containers are used to store compressed air at an elevated pressure. They are used to directly fill the compressed air into the electric power equipment. Alternatively, purifying and filling devices can be used (see C.6.16).

C.6.7 Evaporator and gas storage container heater

Evaporators and gas storage container heaters are not used for the handling of compressed air, since compressed air does not liquefy at typical storage temperatures.

C.6.8 Gas piping and pipe junctions

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

C.6.9 Control instruments

Control gauges should be provided to show the gas pressure in the gas compartment, the vacuum level, the gas temperature, etc. They should be placed in a position so that they can be observed when filling gas compartments and when releasing compressed air to the atmosphere. Accuracy and resolution of the gauges should be adequate to allow preservation of safe operating conditions.

C.6.10 Safety valves

Safety valves are used in the compressed air cycle for pressure relief. Local safety regulations are followed.

C.6.11 Flexible hose connections

The filter elements, the gas storage container and the gas compartment are connected via flexible hose connections. For filling operations only, particular care should be exercised to avoid the presence of other compounds than compressed air inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required.

C.6.12 Portable devices for gas measurement

C.6.12.1 General

Table C.8 gives a survey on gas measuring devices including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in the technical datasheet.

Table C.8 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
He concentration measuring device (only in case of leakage detection)	He concentration in compressed air	0 % to 10 %	-10 °C to 40 °C	±0,1 %
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as for example NO, NO ₂	1 µl/l (ppmv) to 25 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±15 % of the full range
Pressure gauge	Pressure	0 kPa to 2 000 kPa	-10 °C to 40 °C	±10 kPa
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Pressure values are conventionally reported at 20 °C. Either use a temperature compensating pressure gauge or recalculate based on the actual gas temperature during measurement.

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

- humidity concentration in the gas and/or dew point or frost point;
- He concentration (only in case of leakage detection);
- amount of reactive gaseous by-products.

No pumping back of compressed air after measurement is required if the gas volume for measurement is small compared to the gas volume in the electric power equipment.

C.6.12.2 Frost / dew point meter

The humidity concentration can be measured with different measuring principles and measuring instruments. However, a frost/dew point meter is the most common portable instrument used for this purpose. The instrument measures the frost/dew point of the humidity inside the gas, expressed in °C, and can convert it into a relative volume concentration, expressed in µl/l (ppmv).

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces and corrosive gases;
- permeation resistant pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials;
- calibrated or capable of self-calibration;
- small amounts of gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 5 min.

C.6.12.3 Gas concentration measuring devices – He concentration measuring device

Helium sensors (either portable or fixed installations for laboratory use) can be required for on-site leakage testing on electric power equipment utilizing compressed air, which is temporarily filled with a certain amount of Helium, to locate abnormal leakage areas. See CIGRE brochure 430 [13]. They are based for example on velocity of sound measurements, mass-spectrometry or thermal conductivity measurements.

The electric power equipment manufacturer should define the maximum allowable concentration of helium that can be left in the electric power equipment for safe operation after the leakage testing has been performed.

C.6.12.4 Analysers of reactive gaseous by-products

Various methods are available to test for reactive gaseous by-products. Common and recommended practice is to test compressed air for the level of nitrogen oxides No_x , i.e. mainly NO_2 and NO . These tests can be performed by using either reaction tubes (reaction tubes change their initial colour if compressed air containing No_x is fed through them) or by using other sensors like an electro-chemical sensor.

Desirable characteristics are:

- known sensitivity to No_x ;
- connecting pipes resistant to reactive gaseous by-products and utilising self-sealing valve connections.

C.6.13 Gas leakage tester

In addition to the application of leakage spray, portable helium sensors can be used for on-site leakage testing on electric power equipment utilizing compressed air, which is temporarily filled with a certain amount of Helium, to locate abnormal leakage areas. See CIGRE brochure 430 [13]. Helium sensors are based for example on velocity of sound measurements, mass-spectrometry or thermal conductivity measurements. Other approaches have been reported based on either the cumulative test method (e.g. with CO_2 sensors) or the sniffing method using ozone as tracer gas instead of helium.

C.6.14 Gas concentration alarm systems

Gas concentration alarm systems are not needed, since there is no risk of asphyxiation, when compressed air is used for insulating and/or switching.

C.6.15 Gas sampling cylinders

Stainless steel cylinders with a volume smaller than 1 l are recommended. The gas should be sampled directly from the gas compartment using suitable fittings. If the pressure in the gas compartment exceeds the maximum allowable pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge should be used.

C.6.16 Gas purifying and filling device

In general, common and recommended practice for providing compressed air is utilizing pre-filled containers which are available all over the world. In that case, electric power equipment is directly filled from the pre-filled container by utilizing dedicated pressure reducers limiting the pressure to the filling pressure for insulation and/or switching.

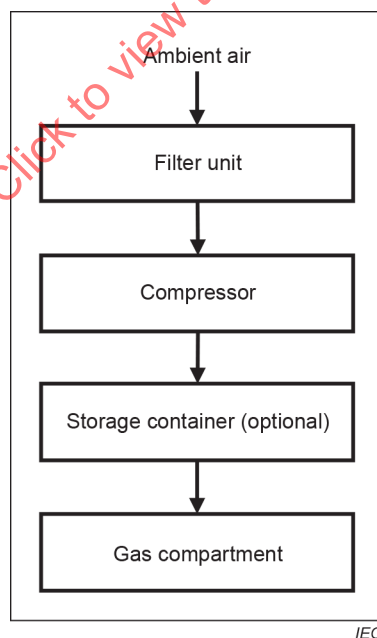
In some cases, providing compressed air on-site can be preferable. Figure C.2 shows a device for purifying atmospheric air to create compressed air on-site.

Compressed air can be generated on-site by a purifying device containing:

- dedicated filter units to clean and dry atmospheric air;
- a compressor to fill either an internal storage container or the gas compartment of the electric power equipment directly to the filling pressure for insulation and/or switching.

Desirable characteristics are:

- adjustable degree of contamination and dew or frost point;
- maximum outlet pressure: typically, up to 2 000 kPa; for internal storage also higher outlet pressures might be required.



IEC

Figure C.2 – Example of a gas filling and purifying device

C.7 Reclaiming procedures

C.7.1 General

Compressed air does not have any environmental impact and generally does not need to be reclaimed from electric power equipment from environmental point of view. Reclaiming is only needed, when releasing heavily arced compressed air to the atmosphere. In this case filters should be used to absorb possible by-products. The filter units used for SF₆ are also applicable to filter compressed air.

The filters should meet the following requirements:

- they should reliably remove the mentioned contaminants;
- the filters should be of cartridge type for safe and easy disposal;
- input and output should be equipped with the same self-sealing couplings;
- changing filters should not require disassembly of any fittings, tubing, or any other connection to reduce or eliminate the possibility of leakage;
- changing the filter is recommended for each reclaiming procedure.

C.7.2 Filtering recommendations

The quality of filtered heavily arced compressed air should meet the requirements given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer and should be in accordance with local regulations.

All occurring contaminants can be eliminated on-site. Table C.9 lists the type of contamination and the methods recommended for removing the contaminants.

Table C.9 – Exemplary filtering methods

Contamination	Humidity	Gaseous by-products	Solid by-products	Contaminated with mineral oil (if needed)
Filtering method	Adsorption with molecular sieve	Adsorption with activated aluminium oxide or molecular sieve	Retaining with solid filters	Activated charcoal filter

Various types of adsorbent materials are available to remove contaminants from compressed air (see Table C.10). Through the corresponding handling with filter elements, the gas will be filtered and finally released to the atmosphere.

Table C.10 – Typical adsorbents for various compressed air contaminants

Adsorbent	Contaminants removed
Molecular sieve 4A	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Molecular sieve 13X	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂ (only adsorbs little compressed air)
Activated aluminium oxide	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Activated charcoal	Oil vapour

C.7.3 Transport of used compressed air in gas cylinders and containers by road

Transport of used compressed air is not necessary since it can be released to the atmosphere. Only for gas analysis off-site transport is required. For used compressed air, the regulations for road transportation and labelling are the same as for technical grade compressed air (see C.5.3). However, local regulations should be taken into account.

This document does not define a maximum allowable concentration limits of dangerous by-products. Local regulations or guidelines should be applied if available.

C.8 By-products

C.8.1 General

This subclause describes general aspects on decomposition and characteristics of by-products. The quantities will depend on the contaminants and energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer according to IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

C.8.2 Decomposition of compressed air

C.8.2.1 General

When arcing occurs in compressed air different by-products are generated simultaneously in varying quantities. At temperatures above a few 1 000 °C the N_2 and O_2 molecules start to decompose into atoms. The decomposition rate is related to the total arc energy. When the temperature drops down again, most of the atoms will recombine to form N_2 or O_2 again, whilst others combine with humidity and different substances of the electric power equipment, such as vaporised electrode metals, vessel walls, PTFE-nozzle ablation, or other plastics, to form a variety of unstable or stable by-products.

The production of by-products can be categorized in three groups.

C.8.2.2 Decomposition of compressed air in low current discharges

Whilst operating voltage is applied to electric power equipment containing compressed air, the possibility of low current discharges such as corona, sparking and partial discharges cannot be ruled out. However, the concentrations of by-products resulting from such discharges are very low.

C.8.2.3 Decomposition of compressed air in an electric arc

During load current or fault current switching an electric arc, reaching temperatures in the order of 10 000 °C, is formed.

The large quantity of heat adsorbed during this process is dissipated away from the arcing zone by radiation and convection. Below a temperature of about 1 000 °C to 2 500 °C, the atoms recombine or react with other substances, such as vaporised electrode metal, the vessel wall, or plastics. Gaseous and solid by-products can arise, including metal oxides and nitrogen oxides, of which the most important are CuO , Al_2O_3 , NO and NO_2 .

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

NO_2 is the major gaseous by-product. NO_2 and N_2O_4 are chemically stable in dry air at ambient temperature. Others are unstable (i.e. NO , O_3 , N_2O_5 , NO_3), particularly in presence of water. NO_2 hydrolyses to HNO_2 and HNO_3 . From chemical point of view, nitric acid (HNO_3) is the most stable by-product in air at ambient temperature and can cause corrosion of metal surfaces (see D.8.2.5), depending on the electric power equipment design. However, large quantities of nitric acid and thus corrosion do not occur in electric power equipment containing adequate type and amount of adsorbent materials.

C.8.2.4 Decomposition of compressed air due to an internal arc failure

The decomposition mechanisms described in C.8.2.3 are similar in case of an internal arc failure. Additional gaseous by-products (e.g. CO, CO₂) as well as solid by-products (e.g. metal oxides) can arise from interaction of the internal arc with different materials present in electric power equipment.

C.8.2.5 Chemical reaction of compressed air with material

In the absence of significant amounts of by-products, corrosion is the only relevant chemical reaction to be regarded when using compressed air for insulation and/or switching. For more details, see C.8.3.

C.8.3 Corrosion behaviour of compressed air and its by-products

In normal operation significant amounts of by-products do not occur and are adsorbed by the adsorbent materials.

Only in case of heavily arced compressed air containing a significant concentration of corrosive by-products (for example in case of internal arc faults), the metals commonly used, such as aluminium, steel, copper and brass, might be attacked leading to corrosion.

N₂ is an inert gas. Therefore, there is no possibility that corrosion will be caused directly by the N₂ itself.

The impact of O₂ in the presence of water on the corrosion behaviour in electric power equipment is well known and considered in relevant standards like IEC 62271-1:2017 or IEC TR 60943 [15]. However, the primary and secondary by-products, in presence of water, can form corrosive nitrous or nitric acids as well as ozone which can lead to damage of some of the material used inside the electric power equipment.

Some materials such as polymeric materials and the like are more vulnerable to damage by ozone attack. However, the impact of ozone on material properties is very much depending on the specific material utilized in electric power equipment.

It is important that the design of the electric power equipment takes the corrosive properties of the by-products into account.

C.8.4 Measures for the removal of by-products

Humidity and by-products inside electric power equipment can be reduced to acceptable levels by adsorption. Materials such as alumina, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb most gaseous by-products very effectively, and at the same time ensure that the dew point / frost point stays low.

Disposal of by-products removed from electric power equipment is straightforward. The acid components (nitrous and nitric acid) are degraded by means of alkaline compounds, in particular washing soda (Na₂CO₃).

C.8.5 Physiological characteristics of by-products

By-products of compressed air can cause irritation of the skin, eyes and mucous membranes, such as in the respiratory tract, and in high concentrations can cause pulmonary oedema (for example O₃), given sufficient time of exposure.

Heavily arced compressed air containing by-products has an unpleasant bleach or pungent smell that in itself is associated with an irritant effect. The odour threshold values, especially for NO_2 and O_3 , are of the same order as the threshold limit values given in Table C.11. Because of these characteristics, even small quantities of gaseous by-products can give rise to unmistakable warning indications within a matter of seconds, before any risk of poisoning can arise.

Where carbon monoxide CO is produced its detection is essential. CO is odourless and toxic by inhalation. It causes headaches, nausea, dizziness, unconsciousness and sometimes death. Prolonged or repeated inhalation can cause damage to the heart.

C.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of by-products

C.9.1 General

This subclause suggests procedures for the evaluation of the health risks due to heavily arced compressed air containing a significant amount of by-products released into the local atmosphere by normal or abnormal leakage and in the event of a sudden release due to an internal arc fault or external fire.

Non-arced and normally arced compressed air have no potential effects on health of personnel and are therefore not regarded in this respect.

During normal service the compressed air remains inside the electric power equipment and the gaseous by-products formed are present at low concentrations. Compressed air by-products can become present in the atmosphere because of leakage or if the gas compartment fails to contain the gas, for example as the result of an internal arc fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal arc fault situations leading to a sudden release of compressed air by-products, when evaluating the health risk.

In case of a leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to the gaseous by-products of heavily arced compressed air. The concentrations of these by-products in the air should remain below their TWA values to present no threat to unprotected personnel during a normal working period of, for example, 8 h. The main compressed air by-products should be captured by adsorbent materials inside the electric power equipment so that leakage conditions combined with normal room ventilation cannot lead to abnormal concentrations of by-products in the environment.

In case of a sudden release of heavily arced compressed air by-products due to an internal arc fault, the emergency procedure required by the local regulation can result in short term exposure. By-product concentrations of higher levels would be tolerable if the exposure time is considerably reduced. In this case all possible sources of toxic emissions should be taken into account, and this requires detailed knowledge of all the by-products formed. A full analysis should consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to heavily arced compressed air.

The following subclauses give example calculations for evaluating the risks associated with the presence of by-products in terms of quantity and toxicity due to normal or abnormal leakage into the atmosphere. The quantities will depend on the contaminants and the arc energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

C.9.2 Formation of by-products and health effects

C.9.2.1 Formation of by-products during arcing

During load current and fault current switching in compressed air the arc core reaches temperatures of the order of 10 000 °C. At these temperatures the molecules of the gas are completely broken down into their parent atoms, N and O, as reported in Clause C.8. Any contaminants, such as water, are dissociated in a similar manner. The result of this is a localised region containing only single atoms of N, O and diverse ions. The heating of the electrodes and the insulating parts by the arc adds vapours of e.g. Ag, Cu, W, C and Al to this atmosphere.

After arc extinction or in regions where cooling commences, these atoms start to bind together again and reform mainly N₂ or O₂. However, chemical reactions take place with the contaminations present and in particular with water, giving rise to the so-called arc by-products. The quantities formed are directly related to the arc energy injected into the gas volume.

In case of circuit-breakers, containing compressed air and that use PTFE parts, also HF can be formed as a critical by-product. As a worst-case scenario, it should be considered that for such an exemplary breaker the by-products HF is always present when the arced gas is released into the atmosphere.

The most frequently encountered gaseous by-products in heavily arced compressed air are: NO₂ and O₃.

C.9.2.2 Effects of by-products on health

C.9.2.2.1 General

If arced compressed air is exhausted into the workplace, the potential health risk will depend on the concentration of each by-product in the air, and hence on the volume of the room containing the electric power equipment. Toxicity estimations should take into account the concentration of each by-product in relation to the permissible concentration for the appropriate exposure time. The formula below should be adopted to calculate the total risk associated to the by-products (see C.9.2.4 for example calculations, which should be done for every by-product occurring).

$$\text{Risk}_{\text{tot}} = \sum_i \frac{\text{concentration (by-products)}_i}{\text{threshold (by-products)}_i} \leq 1$$

In principle there are four main cases, when contact with compressed air including its by-products can happen:

- **normal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment within the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **abnormal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment above the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **maintenance:** entering gas compartments after recovery of the compressed air for maintenance, repair or end-of-life treatment;
- **failure:** opening of a gas compartment due to an internal arc or an external fire.

The main difference is the concentration of by-products in the switchgear room. In case of an external fire or an internal arc failure, additional harmful substances might also be generated. These additional substances are not covered by this analysis, as they depend not only on the insulation gas, but also on the other materials used and on their behaviour in case of fire or high energy arcs.

NOTE Depending on the room size the leaked gases might temporarily not be homogeneously distributed in the switchgear room and locally higher concentrations might occur.

C.9.2.2.2 Health effects of arced compressed air

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

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

The total health risk to personnel, due to heavily arced compressed air, is predominantly dependent on the concentration of the by-product NO_2 (O_3 is an unstable molecule with a short lifetime in the atmosphere).

Hydrolysis of NO_2 can occur in the presence of significant concentrations of water, producing HNO_2 and HNO_3 , as reported in C.8.1. For the time being, the TWA value of HNO_3 has been defined to 2 µl/l (ppmv).

C.9.2.2.3 Exposure duration and dilution in air

There are two key elements essential to any evaluation of health risk due to exposure to toxic substances:

- concentration of the substance in the surrounding volume;
- time duration of the exposure.

When a leakage situation is calculated, the TWA value, should be used. An example of a TWA calculation is given in 3.1.28.

Exposure to measurable concentrations of by-products is not expected during normal operation of electric power equipment. Airborne concentrations of by-products are typically well below the TWA value for those substances.

In the event of a sudden release, such as the opening of a pressure relief device, e.g. because of an internal arc fault, personnel should immediately leave the switchgear room, resulting in short-term exposure to measurable concentrations of by-products. By leaving the room it can be avoided that personnel could potentially be exposed to concentrations of by-products above their C values, above their STEL values or above five times their TWA values.

The OELs for NO_2 , NO , O_3 and HNO_3 are given in Table C.11. Moreover, Table C.11 differs between unstable (short lifetime in the atmosphere) and stable molecules (long lifetime in the atmosphere).

Table C.11 – OELs for NO₂, NO, O₃ and HNO₃

OEL	NO ₂	HNO ₃	NO	O ₃
	Stable molecule in ambient air at ambient temperature		Unstable molecule in ambient air at ambient temperature	
TWA (µl/l)	0,2 to 0,5	2	25	0,05 to 0,1
STEL (µl/l)	5	4	not defined	0,3
C (µl/l)	115	67	115	12,6
NOTE 1 Values are according to ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), OSHA (Occupational Safety and Health Administration) or AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals).				
NOTE 2 If no C value is available, the LC50 value is added instead.				

C.9.2.3 Quantitative estimation of gaseous by-products

The production rate of gaseous by-products formed during an electrical arc is generally referred to the energy in Joule dissipated in the gas. Experimental results are generally quoted in mol/J.

Except for circuit-breakers or after internal arc faults, only non-arced and normally arcad compressed air and therefore only very small concentrations of NO₂, NO, O₃ and HNO₃ are to be expected during operation of electric power equipment containing an adequate type and amount of adsorbent materials.

The small concentrations of NO₂, NO and O₃ formed during normal arcing or electrical discharge will be further reduced due to their adsorption by adsorbent materials. The concentration of HNO₃ to be expected is negligible due to the very low concentration of water. Furthermore, adsorbent materials suitable to adsorb HNO₃ will further reduce the maximum concentration of HNO₃.

The estimated concentration of NO₂, NO, O₃ and HNO₃ due to arcing in circuit-breakers should be provided by the electric power equipment manufacturer.

C.9.2.4 Procedures for health risk evaluation

C.9.2.4.1 General

The procedures for the evaluation of the potential effects on health of gaseous by-products in normally or heavily arcad compressed air are based on the following assumptions:

- the switchgear room is completely closed;
- the gas emitted uniformly mixes with the air in the switchgear room in a short time with respect to the working day or exposure duration.

The evaluation of possible concentrations of by-products should be done by the electric power equipment manufacturer, taking into account worst case scenarios, as type tests of switches and end-of-life concentration (for HV gas circuit-breakers also conditions related to defined service intervals) and the results shared with the end-user. Using worst case conditions, the end user is always on the safe side. Actual figures can only be given by adequate gas sample analysis.

C.9.2.4.2 Normal leakage

In IEC 62271-1:2017, 6.16.1, the permissible leakage rate for gases used in switchgear are given. Often, smaller leakage rates are stated by the manufacturer of the electric power equipment and are verified during type tests. These tests cover all three aspects of leakage:

- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of static connections;
- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of dynamic connections, where gas is leaking during operation of translating or rotating shafts;
- permeation of gas through elastomer (for example seal) or thermoplastic material.

The permissible leakage rate is valid at an ambient temperature of 20 °C. For higher temperatures the permitted temporary leakage rate can be up to three times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15). This is mainly driven by the strong temperature dependence of gas permeation. Also, for temperatures below 0 °C the permitted temporary leakage rate can be up to three or six times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15), which is mainly a result of the reduced flexibility of seals in dynamic connections.

To verify that the electric power equipment is free from manufacturing defects resulting in higher leakage rates, a routine tightness test is state of the art. However, this test typically only detects gas leakage between interfaces, due to its short duration (permeation effect can take weeks before becoming detectable). Routine tightness tests are sufficient to detect problems in manufacturing (where leaks at interfaces and not excessive permeation are the dominant cause).

The quantity of the leaked gas and its by-products can be calculated by knowing the leakage rate, the volume of all gas compartments, the total gas pressure and the time. The ventilation of the switchgear room plays an important role. Only at very low ventilation speeds or if there is no ventilation at all, the leaked gas and its by-products will accumulate in the switchgear room.

The permeation of the different components of a gas mixture can be different and depends on the specific permeation coefficient of the gas, which is related to the material and to the partial pressure difference of the gas components inside and outside of the gas compartment.

As permeation is a more or less constant effect over time and distributed on many locations of the gas compartment, a homogeneous mixing of the gas components within the switchgear room can be assumed.

Table C.12 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:

A MV switchgear is chosen, where compressed air is used as a quenching medium and heavily arced compressed air is present.

V_{eq}	Total gas volume of all gas compartments
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of by-product
F_{rel}	Permissible relative leakage rate
t	Time to ventilate the room
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$Q = V_{room} / t$	Room ventilation rate
$R_{tot} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Total absolute leakage rate
$R = R_{tot} \times x$	Absolute leakage rate of by-product
$y = R / Q$	Concentration of by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of by-product

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Table C.12 – Example calculation of a normal leakage

By-product		NO ₂
V_{eq}	[m ³]	5
V_{room}	[m ³]	100
p_{re}	[kPa]	150
p_{am}	[kPa]	100
x	[µl/l (ppmv)]	200
F_{rel}	[%/year]	1
t	[year]	0,005
Q	[m ³ /year]	20 000
R_{tot}	[m ³ /year]	0,075
R	[m ³ /year]	0,000 015
y	[µl/l (ppmv)]	0,000 750
TWA	[µl/l (ppmv)]	0,5
S		0,000 150
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other by-products.		

C.9.2.4.3 Abnormal leakage

Defects are the exception but cannot be entirely excluded. The main type of defect in this context is leakage due to defects in components that are normally gastight. This can be due to a damaged seal or a cracked bushing. These defects can lead to increased leakage rates; in the worst case, the overpressure can decrease to zero within weeks, days or even minutes. In this case, the amount of gas that leaks into the ambient air depends on the overpressure. As modern gas-insulated metal-enclosed switchgear are separated into several gastight gas compartments without gas connections, the amount of gas per gas compartment is limited. In most cases, this type of defect only affects one or two gas compartments.

Also, human error, such as drilling a hole in a gas compartment, accidentally opening a cover, or incorrect operation of a valve can lead to a gas loss and a reduction of the pressure in the gas compartment to ambient pressure.

This effect is a short-term effect and is concentrated at a defined location. The most important risk is of someone being present at this location at the time of the failure. In this case, the local concentration of gas components and by-products will be temporarily higher, but they will also dilute within a short time period within the switchgear room, finally yielding a homogeneous mixture. Simulations have shown that this will take between a few minutes to a few hours.

Electric power equipment, which is affected by an abnormal leakage, leading to a reduction of the pressure of the insulating gas to ambient pressure, should be shut down and earthed as soon as possible. This is to avoid unexpected flashover to earth inside the gas compartment which could generate an internal arc.

Table C.13 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A MV switchgear is chosen, where compressed air is used as a quenching medium and heavily arced compressed air is present.	
This example is a worst case calculation, where all the overpressure inside the largest gas compartment of the electric power equipment is lost into the room within a short time, hence in a time which is much shorter than the time to ventilate the room, and therefore the calculation does not take the time to ventilate the room into account.	
In the case where the leakage rate is abnormal, but still in a measurable range of up to a few percent per day, the ventilation should be taken into account, and a similar calculation as shown in C.9.2.4.2 can be done.	
V_{comp}	Total gas volume of largest gas compartment
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of by-product
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Total leakage volume
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Leakage-volume of by-product
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration of by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of by-product

Table C.13 – Example calculation of an abnormal leakage

By-product		NO ₂
V_{comp}	[m ³]	1
V_{room}	[m ³]	100
p_{re}	[kPa]	150
p_{am}	[kPa]	100
x	[µl/l (ppmv)]	200
V_{tot}	[m ³]	0,5
V_{leak}	[m ³]	0,000 100
y	[µl/l (ppmv)]	1
TWA	[µl/l (ppmv)]	0,5
S		2
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other by-products.		

C.9.2.4.4 Maintenance, service and repair within gas compartments

In case maintenance, service or repair should be performed on the electric power equipment containing non-arced and normally arced compressed air, the gas can be released to the atmosphere and the gas compartments can be opened afterwards by considering safety measures defined in C.2.2.

Prior to opening of a gas compartments containing heavily arced compressed air, the gas should be reclaimed by releasing it to the atmosphere via filters, the gas compartment should be evacuated with a vacuum pump via filters and later flushed with ambient air. When opening the gas compartment, small concentrations of by-products can remain inside. Then, adequate safety equipment and tools should be used (see Table C.4).

Table C.14 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate remaining concentrations of gas components or by-products in the gas compartment after gas recovery. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:

A switchgear is chosen, where compressed air is used as a quenching medium and heavily arced compressed air is present. After the complete recovery of the gas, down to the residual pressure p_{res} , by using a vacuum pump as described in C.6.3, the gas compartment is flooded with ambient air and the concentration of the remaining by-products inside the gas compartment are calculated.

In the case where the compressed air is released to the atmosphere without the use of a vacuum pump and therefore without flooding the gas compartment with ambient air before opening, the concentrations of the by-products inside the gas compartment will remain unchanged and might be well above their TWA-values.

p_{res}	Residual pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of by-product before recovery
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Remaining concentration of gas component or by-product within gas compartment after recovery
$S = c / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table C.14 – Example calculation for maintenance

By-product		NO ₂
p_{res}	[kPa]	0,5
p_{am}	[kPa]	100
x	[µl/l (ppmv)]	200
c	[µl/l (ppmv)]	1
TWA	[µl/l (ppmv)]	0,5
S		2
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $S > 1$: the gas compartment should be cleaned from possible solid by-products, where applicable, and sufficiently ventilated, before approaching it without full protection. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other by-products.		

C.9.2.4.5 Internal arc failure and/or external fire

The worst-case failure scenario that can occur in electric power equipment is an internal arc failure, which is caused by a defect or an operator error and results in an arc between the phases and/or between phase and ground that burns until the arc energy is interrupted by a circuit-breaker. Depending on the network, the released energy can be very high, which leads to a massive pressure increase inside the gas compartment. To avoid the uncontrolled cracking of the gas compartment, pressure relief devices open after a few milliseconds and the plasma produced by the internal arc is guided to the outside in a controlled way. In many cases pressure relief ducts are used to guide the plasma to areas where no direct contact with the operator can occur or even to the outside of the building. An internal arc event is typically limited to a single gas compartment. The entire amount of the heavily arced gas in the affected gas compartment is released. Due to the high temperature of the electric arc (10 000 °C to 20 000 °C), the gas molecules are decomposed, forming a plasma. As it cools down, the plasma created from the gas, evaporated metals, burnt insulation material, ambient air and humidity recombines and new molecules are formed.

External fire is a major failure that can also occur. It is normally not caused by the switchgear itself. The effect depends very much on whether or not the switchgear is energized. If not, the effect is similar to the case described in C.9.2.4.3, but might affect more than one gas compartment. The quantity of released gas and the decomposition rate is highest in case of an external fire. In addition, the temperature rise caused by the external fire might lead to decomposition of the released gas. Due to heating of the gas by the high temperature of the fire, it is also possible that pressure relief devices open and release the contained gas. When the switchgear is energized, the opening of a gas compartment due to thermal overpressure caused by the heat of the fire will lead in a second phase to an internal arc. The effects of the fire and of the internal arc are then superimposed.

Regardless of whether or not the switchgear is energized, the quantity of released gas and the decomposition rate is highest in this scenario. In addition, the pollution of the switchgear room might be dominated by the by-products of burning plastics or evaporated and oxidised metals. Carbon monoxide and carbon dioxide can be present in high concentrations. These additional contaminants are independent of the insulation gas used. In an external fire, materials are burning which are normally not affected by internal arc failures. These can be the secondary equipment including wiring, protection and control equipment, and electronics. The used materials might create harmful by-products when burnt, which are independent of the type of switchgear and insulation gas.

Unlike in the case of the other scenarios, in the case of an internal arc or a fire, it is strongly recommended to leave the area immediately and not to re-enter without personal protection before the area has been sufficiently ventilated.

C.9.2.4.6 TWA values for by-products

The potential effect on health can be best estimated when looking at the TWA values of the by-products and their related concentrations in the room or the area inside the room where personnel is located during the different scenarios described from C.9.2.4.2 to C.9.2.4.5.

TWA values for by-products are listed in Table C.11.

A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

C.9.2.5 Conclusion

The above examples of calculations demonstrate that normal leakage of electric power equipment filled with compressed air cause no health risk due to exposure to by-products. The by-products, formed by arcing inside the electric power equipment, reach negligible concentrations in the workplace.

In the case of abnormal leakage situations, maintenance, service and repair, which are limited to single compartments, and if concentrations of by-products slightly above the TWA-value occur, adequate actions should be taken (e.g. additional ventilation, lower residual pressures, gas dilution, personal protection, etc.).

If an internal fault leads to a sudden release of heavily arced compressed air, significant concentrations of by-products can occur in a switchgear room and it is strongly recommended to leave the switchgear room immediately. Basic safety procedures including evacuation rules are designed to ensure that personnel are exposed to exhausted materials for a time as short as possible. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure that the concentration levels can be reduced within minutes. Re-entering the switchgear room without protection is only possible when the concentration of the by-products has fallen below their TWA value.

For outdoor installations and whatever type of leakage or release, the volume of air into which the heavily arced compressed air escapes is large and prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion.

The safety procedures need to be adapted for each individual installation, taking all aspects mentioned above into account.

C.10 Handling of compressed air

C.10.1 General

The scope of this clause is to address the particularities for handling compressed air during installation, commissioning, after repair or overhaul on site and disposal at the end-of-life of electric power equipment.

C.10.2 Filling gas compartments with compressed air

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 4.2, 4.3 or 4.4 are applicable.

In case tightness inspection with additional tracer gases (e.g. Helium) are performed, the filling procedure or topping-up procedure can differ from 4.2, 4.3 or 4.4 and the procedure given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacture should be followed.

C.10.3 Topping-up gas compartments with compressed air to the filling pressure for insulation and/or switching

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 5.1 is applicable.

C.10.4 Checking the quality of compressed air

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 5.2 is applicable.

C.10.5 Recovery and reclaim of compressed air

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 6.2 or 6.3 are applicable with the following modifications:

- Instead of recovery (see Table 5, step 3 and step 4, and Table 6, step 3 and step 4), used compressed air can be released into the atmosphere.
- In case of non-arced and normally arced compressed air, the gas compartment can be opened as soon as ambient pressure p_{am} is reached (step 4 and step 5 of Table 5 are neglected).
- In case of heavily arced compressed air, the gas is released into the atmosphere via filters (see C.6.2). For evacuation to the residual pressure p_{res} , a vacuum pump is connected to the gas compartment via filters (see C.6.3).

C.11 Specifications for compressed air needed for filling or topping-up electric power equipment

Compressed air to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment is to be topped-up, should comply with the purity classes according to ISO 8573-1 (see 3.4.1). The minimum purity class should be specified by the electric power equipment manufacturer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Annex D (informative)

Natural-origin gases

D.1 Gas properties

D.1.1 General

Natural-origin gases, which are N₂, O₂ and CO₂, and their mixtures have a global warming potential between 0 and 1 and no ozone depletion potential.

D.1.2 Chemical properties

N₂, O₂ and CO₂ are odourless, tasteless, colourless, non-toxic, non-flammable, stable and inert (excluding O₂).

Table D.1 lists the typical chemical characteristics.

Table D.1 – Main chemical characteristics of N₂, O₂ and CO₂

Chemical formula	N ₂	O ₂	CO ₂
CAS number ^a	7727-37-9	7782-44-7	124-38-9
REACH registration number	-	-	-
Molecular weight	28,013 g/mol	31,999 g/mol	44,01 g/mol
Decomposition temperature	≈ 7 000 °C	≈ 4 000 °C	> 2 000 °C
^a The CAS number is assigned by the chemical abstracts service who maintains a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.			

D.1.3 Physical properties

In electric power equipment the typical pressure range of N₂, O₂ and CO₂ is between 100 kPa and 1 500 kPa. Liquefaction of N₂, O₂ and CO₂ does not occur under typical operating pressures and operating temperatures of electric power equipment. Table D.2 lists the main physical characteristics.

Table D.2 – Typical physical characteristics of N₂, O₂ and CO₂

Chemical formula	N ₂	O ₂	CO ₂
Boiling point at 101,3 kPa	-196 °C	-183 °C	-
Freezing point at 101,3 kPa	-210 °C	-219 °C	-
Sublimation point at 101,3 kPa	-	-	-79 °C
Liquid density at boiling point	809 kg/m ³	1 141 kg/m ³	-
Gas density at 20 °C at 100 kPa	1,15 kg/m ³	1,31 kg/m ³	1,82 kg/m ³
Vapour pressure at 20 °C	-	-	5 730 kPa
Critical temperature	-147 °C	-119 °C	+31 °C
Critical pressure	3 399 kPa	5 043 kPa	7 383 kPa
Critical density	314 kg/m ³	436 kg/m ³	468 kg/m ³
Global Warming Potential (GWP ₁₀₀)	0	0	1
Ozone depletion potential (ODP)	0	0	0

D.1.4 Insulating and switching behaviour

The dielectric strength of natural-origin gases depends on the specific mixing ratio. Pure N₂, O₂ or CO₂ have lower dielectric strength than their mixtures. It is a lower dielectric strength than that of SF₆ under the same conditions. See CIGRE Brochure 730 [12].

For example, the dielectric strength of a N₂/O₂ mixture is about 40 % of the dielectric strength of SF₆ under the same conditions, but – because of the electronegative character of O₂ – it is significantly better than the one of pure N₂. O₂ has a weak tendency to bind free electrons forming ions with lower mobility making the development of electron avalanches more difficult.

Compared to SF₆ at the same pressure N₂/O₂ mixtures are a moderate arc quenching media. When an electric arc is cooling in N₂/O₂ mixtures, it remains conductive to a relatively low temperature, thus minimising current chopping before current zero, and thereby avoiding high overvoltages. Better arc quenching properties can be realized if CO₂/O₂ mixtures are used [16] [17] [18].

When CO₂ or the mixture CO₂/N₂ is used as a gas for switching, typically a few percent of O₂ might be added, as specified by the electric power equipment manufacturer, to reduce the possibility of sooting. Sooting can occur because of the separation of the CO₂ atoms within the electric arc or from burning off nozzle or other plastic materials in the vicinity of the arc.

D.2 Safety and first aid

D.2.1 General

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

- switch off and isolate;
- secure against re-closing;
- verify that electric power equipment is de-energised;
- earth and short-circuit the electric power equipment;

- cover or fence off nearby live parts.

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

Table D.3 lists the major issues to consider when working with electric power equipment containing natural-origin gases.

Table D.3 – Measures when working with electric power equipment containing natural-origin gases

Item	Work in the vicinity of electric power equipment (operation of electric power equipment, visual check, room-cleaning)	Filling, topping-up, recovery, evacuation of gas compartments	Opening of gas compartments, work on open gas compartments
Material safety data sheet / operational manuals	Applicable	Applicable	Applicable
Training	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Gas handling equipment	Not required	Applicable ^b	Only for heavily arced natural-origin gases
Cleaning / neutralising equipment	Not required	Not required	Only for heavily arced natural-origin gases
Personal protection equipment	Not required ^c	Only for heavily arced natural-origin gases ^c	Only for heavily arced natural-origin gases ^c
^a General information should be specified according to type of work and installation, according to local safety regulations. ^b Used natural-origin gases can be released to the atmosphere optionally via adequate filters until ambient pressure is reached (local regulations should be considered). Adequate filters should be specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. No evacuation of gas compartments is required for non-arc'd and normally arc'd natural-origin gases. In case a gas mixture with a low O ₂ concentration is released inside a switchgear room the danger of asphyxiation should be regarded. ^c Local regulations can require safety shoes, helmet, and protective goggles to get in the vicinity of the switchgear.			

A notice stating instructions for giving first-aid (see D.2.8) should be displayed while natural-origin gases are being handled in any location.

When a gas compartment containing heavily arced natural-origin gases is opened after the electric power equipment has been in service, personnel should wear suitable protective clothing in order to avoid contact with the fine solid by-products, which can be present. Particular attention should be given to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which can contain arced natural-origin gases should:

- use suitable tools and handling equipment;
- wear suitable protective clothing (see D.2.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their handling equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components which have been in contact with by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues.

D.2.2 Protection of personnel

Safety instructions given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed by personnel handling natural-origin gases. In case a gas mixture with a low O₂ concentration is released inside a switchgear room the danger of asphyxiation should be regarded. The operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed.

Table D.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given as the operator opens or enters the gas compartment.

Table D.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments

	Potential risk	Safety precaution	Safety equipment and tools
Non-arced and normally arced natural-origin gases	Fumes of cleaning substances	Ventilation	Suction ventilator
	Asphyxiation (for gas compartments with a O ₂ concentration smaller than 16 %)	Ventilation Measurement of O ₂ concentration before entering, with the minimum value required for entering = 16 % Wear personal protective equipment	Suction ventilator O ₂ concentration measuring device Self-contained breathing apparatus
	Residual reactive gaseous by-products	Ventilation Wear personal protective equipment Measurement of concentration of residual reactive gaseous by-products	Suction ventilator Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask (filter)
	Solid by-products and adsorber materials	Removal of solid by-products and adsorber materials Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Vacuum cleaner Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask Protective goggles Environmental protection against rain or wind

A concentration greater than 84 % of N₂ in the atmosphere is considered as a potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the O₂ concentration below 16 %, which is usually considered as the threshold for asphyxiation. As a consequence, the O₂ concentration in the gas compartment should be measured after ventilation and prior to accessing it. In addition to that, in case of a big volume of natural-origin gases inside the electric power equipment, the O₂ concentration in the ambient environment should be checked when working in confined spaces. Also, for mixtures containing CO₂ the concentration should be checked, because a concentration greater than 10 % of CO₂ in the atmosphere is considered a potential risk of sudden death. The TWA value of CO₂ is 5 000 µl/l (ppmv).

Eating, drinking and smoking are prohibited when accessing or opening a gas compartment which contained heavily arced natural-origin gases. It is recommended that clothes should be changed, and the skin washed as soon as possible after the work to prevent potential danger of irritation or burns.

CO₂ concentrations above the TWA value can cause circulatory insufficiency, headache, nausea and vomiting, which can lead to unconsciousness or death even when the O₂ concentration is kept at 21 %. In case of a gas leak and because CO₂ gas is heavier than air, it can accumulate in enclosed rooms, particularly if they are below ground level and therefore also lead to asphyxiation.

O₂ concentrations between 16 % and up to 50 % are uncritical. Below 16 % there is the danger of asphyxiation. 21 % of O₂ is the optimal value for human beings. Higher concentrations of O₂, especially for a longer time, can be a danger and should be only applied after medical consultation.

At O₂ concentrations larger than 22 % the flammability of nearby materials can be increased.

D.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

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

Reusable safety equipment and tools should be cleaned, for example washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. The same neutralisation time periods as described in IEC 60480:2019, Table 11, can be used.

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

D.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

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

All equipment and tools used during natural-origin gases handling potentially contain gaseous natural-origin gases under high pressure. They should be handled with care.

D.2.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the electric power equipment containing natural-origin gases itself. Safety shoes, helmet, and protective goggles can be required according to local regulations to get in the vicinity of the switchgear.

In case of sudden release of heavily arced natural-origin gases e.g. due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to D.2.7.

The required protective equipment should be specified in the operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer.

For handling of non-arced or normally arced natural-origin gases, less or no additional personal safety and protective equipment as listed below is needed depending on the design of electric power equipment and local regulations. The required protective equipment should be specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table D.4, workers engaged in handling of heavily arced natural-origin gases are provided with the following personal safety and protective equipment:

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166) [3];
- breathing protective mask: to be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas only;
- full/half face mask: for short-term inspection and work where ventilation can be provided but where the concentration of by-products can exceed the appropriate maximum level, a face mask with changeable active charcoal filter should be used according to local regulations (for example European Standards EN 140 [4], EN 14387 [5] and EN 143 [6] specify masks, gas filters and particle filters, respectively. Combined filters of type A2/B2/E2/K2/P3 or A3/B3/E3/K3/P3 manufactured to these standards are available, in case of NO_x and CO by-products also the combined filter is beneficial);
- single use protective overall: dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap; pocketless, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene) disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;
- self-contained breathing apparatus (respirator): when entering and/or working at indoor applications after an abnormal leakage or a sudden release due to internal arcing when the concentration of CO₂ or the amount of by-products are exceeding TWA values (see D.9.2.4.6), a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136 [7]);
- for natural-origin gas mixtures, that contain less than 16 % of O₂: O₂ concentration measurement device for permanent monitoring of the O₂ concentration;
- CO₂ concentration measurement device for measuring the CO₂ concentration;
- handheld CO meter for CO concentration measurement;
- environmental protection for outdoor work locations: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open;
- vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping according to dust class H (high hazard). Dust classes are specified in Annex AA of IEC 60335-2-69:2021;
- suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment can be portable or permanently installed, depending on the size of the installation.

D.2.6 Facilities and services

Where gas compartments containing heavily arced natural-origin gases are opened (after recovery of the natural-origin gases), adequate washing facilities for workers and a supply of water for preparing cleaning solutions should be available.

D.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of natural-origin gases

In case of sudden release of natural-origin gases due to internal arc or external fire the affected rooms should be left immediately.

After ventilation of the rooms and checking of possible toxic by-products only trained and certified personnel are allowed to re-enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment.

Table D.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions and as well as the safety equipment and tools required.

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

The same rules apply to areas below the floor level at which the release occurred and which are poorly ventilated or unventilated (for example cable trenches, inspection pits, drainage systems). The required ventilation time depends on type and amount of released gas. If the risk of asphyxiation cannot be neglected, a temporarily forced ventilation should be installed.

A second person being in continuous visual and audible contact should be present, when entering areas which might have a low O₂ concentration and/or a high concentration of by-products.

Outdoor equipment needs standard measures for outdoor conditions to be applied (for example rain protection, wind protection).

D.2.8 First aid equipment and treatment

D.2.8.1 General

First aid equipment includes:

- normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution;
- for heavily arced natural-origin gases under the circumstance, that there can be arced fluorinated substances (for example, arced PTFE parts) inside the electric power equipment, calcium gluconate gel (HF antidote gel);
- means for contacting emergency services;
- guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see D.2.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

D.2.8.2 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation after contact with heavily arced natural-origin gases, all personnel should immediately leave the affected area and move into fresh air. Contaminated clothing is removed, and the affected part washed with cool running water. If there is a chance of arced fluorinated substances – apply calcium gluconate gel as a remedy after washing for fluoride acid on skin. Professional medical advice should be sought.

D.2.8.3 Irritation of the eyes

In case of signs of eyes irritation after contact with heavily arced natural-origin gases, all personnel should immediately leave the affected area and move into fresh air. Irrigation of the eye or eyes is carried out immediately and continued until a medical professional advises the patient to stop.

D.2.8.4 Breathing difficulty

All personnel should immediately evacuate the affected area containing heavily arced natural-origin gases and move into the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance should be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration should be immediately commenced by trained and qualified personnel. Automated external defibrillator could be used according to local regulations.

D.3 Environmental impact

D.3.1 General

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

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

D.3.2 Ecotoxicology

D.3.2.1 Definition

Ecotoxicology has been defined as, "the branch of toxicology concerned with the study of toxic effects, caused by natural or synthetic pollutants, to the constituents of ecosystems, animal (including human), vegetable and microbial, in an integral context".

D.3.2.2 Toxicology

Breathing of O₂ at partial pressures below 50 kPa has no toxic effect on the human organism [19]. Anyhow, O₂ concentrations above 22 % can increase the flammability of nearby materials and are therefore not used in electric power equipment. Therefore, no oxygen toxicity can occur.

The TWA value of CO₂ is 5 000 µl/l (ppmv). Breathing of air with a CO₂ concentration above 10 % is considered a potential risk of sudden death. Rooms or areas containing concentrations of CO₂ above the TWA value should not be entered without adequate ventilation or personal protective equipment.

D.3.2.3 Environmental toxology

Natural-origin gases are the main gases of our ecosystem and thus do not harm it. Natural-origin gases have no reported potential to be acute or chronic ecotoxic. They present no danger to surface and ground water or the soil. A biological accumulation in the nutrition cycle has no impact. Moreover, natural-origin gases are:

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

Natural-origin gases do not have to be handled in a closed cycle, to avoid any deliberate release to the environment. If adequate, gas recovery and reuse is not necessary since used gas can be released to the atmosphere, optionally via filters, and replaced by new natural-origin gases either from dedicated containers or filling devices (see D.10.5).

Gas losses do not have to be reported and no specific legal constraints apply to the use of natural-origin gases in electric power equipment.

D.3.3 Ozone depletion

Natural-origin gases and their by-products do not contain either chlorine or bromine and therefore do not affect stratospheric ozone .

D.3.4 Global warming/climate change (greenhouse effect)

Natural-origin gases contribute only slightly to the greenhouse effect and have a global warming potential between zero and one. The global warming potential of CO₂ is defined as 1. The impact on the global warming of CO₂, which is used in electrical switchgear can be neglected, because of the very low quantities used, even if it is released into the atmosphere.

D.3.5 Environmental impact of by-products

Major failures causing release of heavily arced natural-origin gases are rare. The quantities released in such extreme cases are limited by the fact that standard designs of products are compartmented, limiting the fault to the place where it originates. The gas quantities concerned are subsequently small fractions of the total gas banked in an electric power equipment.

By-products can be converted into neutral products. Procedures for their treatment, handling and disposal ensure that they have a negligible impact on the environment.

D.4 Training and certification

D.4.1 General

Non-arced or normally arced natural-origin gases have no negative environmental impact. Thus, operational safety and environmental aspects for electric power equipment containing natural-origin gases are not tightly coupled together and therefore do not have to be treated at the same time.

The operational safety during work on electric power equipment involving gas handling (for example development, manufacturing, testing, erection, commissioning, maintenance, repair, service, and dismantling at the end-of-life) should be assured by following to the safety instructions given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. In particular, safety precautions for handling of pressurized systems should be described.

For safe operation, particularly when heavily arced gas is to be handled, a complementary option is to train personnel by additional trainings which can be performed for example in a special training centre of the user, in the factory or on-site during erection, commissioning and maintenance of installed electric power equipment. Related to the tasks to be completed by trained personnel, the training can be adopted to cover different scopes, ranging from for example basic training to advanced training. The training should be related to a specific design (for example high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage switchgear, etc.) and different designs require different trainings.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the electric power equipment, operating instruction manuals of the handling equipment, safety data sheets (SDS), instrument datasheets, international standards, CIGRE brochures, and the subclauses of Annex D.

D.4.2 Training

Workers, handling natural-origin gases, should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and handling equipment, and procedures to assure the continuity of service and minimize emissions. Special trainings for handling natural-origin gases can be offered by the electrical power equipment manufacturers, because type of electric power equipment and gas mixtures can be different.

The different aspects to be covered by a training can be the following:

- safety and first aid (see Clause D.2), in particular:
 - local regulations, emergency plans and instructions in case of for example asphyxiation, internal arc fault;
 - safety equipment required for personal protection;
 - safety equipment required for working on open gas compartments in relation to the task;
 - safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products;
- basic knowledge of relevant environmental issues;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of natural-origin gases;
- use of natural-origin gases in electric power equipment (insulation, switching);
- existence of local regulations and international standards in relation to the task;
- natural-origin gases handling, hazards and health characteristics;
- design of electric power equipment (properties and application/functionality);
- checking the quality of natural-origin gases;
- the operating instruction manuals given by the electric power equipment manufacturer in relation to the tasks;
- types of gas compartments filled with natural-origin gases;
- instruments and procedures for checking the quality of natural-origin gases;
- procedures of handling of natural-origin gases:
 - topping-up of closed pressure systems;
 - air evacuation and gas filling and topping-up;
 - recovery and reclaim of non-arc'd, normally and heavily arc'd gas; handling, neutralisation and removal of by-products, handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products;
- leak detection methods and repair techniques;
- categories for natural-origin gases (see 3.5);
- storage and transportation of CO₂, O₂, N₂ and/or mixtures (see Clause D.5);
- natural-origin gases handling equipment in relation to the tasks (see Clause D.6);
- procedures for entering the switchgear room in case of abnormal leakage and/or sudden release of natural-origin gases due to fire or internal arc fault (see D.2.7);
- dismantling of electric power equipment and part sorting (see Clause 7);
- operation of tight drilling systems, if necessary (see 7.4).

D.4.3 Certification

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

The following records should be retained:

- the training content;
- the date on which the training was completed.

Restrict the tasks to be performed to personnel who have been certified for the respective skill levels and sustain a high level of expertise.

D.5 Storage and transportation

D.5.1 General

Storage and transportation of natural-origin gases, either in containers or in electric power equipment should always be carried out in accordance with local and international regulations.

D.5.2 Storage of containers filled with natural-origin gases

Generally, natural-origin gases are stored in gaseous state at pressures up to 30 000 kPa, depending on the individual mixture. Gaseous storage has the advantage of reducing the filling times compared to liquid storage. For handling of bigger gas volumes, on-site generation of natural-origin gases for example by dedicated gas mixing and filling devices (see D.6.16) is an alternative way of gas supply. For mixtures with CO₂ it is important to know that at 20 °C pure gaseous storage of CO₂ is possible at a pressure up to about 5 700 kPa. This fact should be regarded when storing natural-origin gases with CO₂ at elevated pressures, because partial liquefaction of CO₂ can occur and therefore the mixing ratio in the remaining gas phase is changed.

Containers containing compressed natural-origin gases should be handled according to the gas manufacturers' instructions. They should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself.

Containers containing oxidizing gas (for example containing more than 22 % O₂) should maintain a minimum distance of several meters to containers containing flammable gas or should be separated by a non-combustible barrier, having a minimum height and a minimum time of fire resistance, according to local regulations. Containers should be refillable and clearly labelled to identify their contents.

When samples of used natural-origin gases are stored for gas analysis off-site, the storage containers should comply with local and international regulations on pressurised containers. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table D.5 gives examples of container types. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table D.5 – Examples of container types required for storage and transportation of natural-origin gases

Gas	Characteristic	Container type
Technical grade natural-origin gases ^a	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8]. (N ₂ – black; CO ₂ – grey; O ₂ – white).
Used natural-origin gases	Compressed gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa.
Used CO ₂	Gaseous or liquefied gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] and specially marked to avoid confusion between used and technical grade CO ₂ .
Used mixture with CO ₂ content	Gaseous or liquefied gas	Suitable for compressed gases up to a pressure of 30 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] and specially marked to avoid confusion between used and technical grade mixtures containing CO ₂ .
^a Avoid any contamination of containers dedicated to natural-origin gases.		

D.5.3 Transportation of containers filled with natural-origin gases

International regulations for shipment of electric power equipment containing natural-origin gases are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of natural-origin gases, containing less than 22 % of O₂, are summarised in Table D.6.

The UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation for normally arced and/or heavily arced natural-origin gases can depend on the design and usage of the electric power equipment and should be defined in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

Table D.6 – International regulations for shipment of natural-origin gases

Fluid / gas	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade natural-origin gases not containing liquefied CO ₂ and Non-arced natural-origin gases not containing liquefied CO ₂	Compressed gas	1A	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. 2.2	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. (nitrogen and/or oxygen and/or carbon-dioxide) 2.2
Technical grade natural-origin gases containing liquefied CO ₂ and Non-arced natural-origin gases containing liquefied CO ₂	Liquefied gas	2A	UN 1058 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 1058 LIQUEFIED GAS N.O.S. (nitrogen and/or oxygen, carbon-dioxide) 2.2
Normally arced natural-origin gases, containing liquefied CO ₂ ^c	Liquefied gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (nitrogen and/or oxygen, carbon-dioxide) 2.2
Heavily arced natural-origin gases, containing liquefied CO ₂ ^d	Liquefied toxic gas ^e	2T	UN 3162 LIQUEFIED TOXIC GAS N.O.S. 2.3	UN 3162 LIQUEFIED TOXIC GAS N.O.S. (nitrogen and/or oxygen, carbon-dioxide, hydrogen fluoride and carbon monoxide) 2.3
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20]. ^b Hazards identification numbers (e.g. H280) are listed in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer. ^c Natural-origin gases that contain small amounts of by-products and have a LC50 value > 5 000 µl/l (ppmv). ^d Natural-origin gases that contain large amounts of by-products, typically after experiencing an internal arc, a failure to interrupt or a last number of short-circuit breaking operations and have a LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). ^e According to UN regulations for transportation, a gas is classified “toxic” when its LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). N.O.S. : “not otherwise specified”.				

D.5.4 Storage and transportation of electrical power equipment containing natural-origin gases

Electric power equipment filled with natural-origin gases should be stored and transported according to local and international regulations.

International regulations for shipment are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation.

According to ADR, RID and IAT transportation codes the filling pressure should not exceed 200 kPa (relative) at 20 °C.

D.5.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising natural-origin gases is responsible for the proper use, transportation, and disposal of the electric power equipment and the gas. No record keeping regarding banked natural-origin gases is required.

D.6 Description of handling equipment

D.6.1 General

D.6.1.1 Overview

This part of the annex gives information about the handling equipment, which might be required for handling natural origin gases. Such handling equipment is required during development, testing, manufacturing, installation, service, repair and end-of-life treatment. Some of the handling equipment can also be used by the end-user of the electric power equipment.

The appropriate type and size of the handling equipment should be chosen according to the quantity of natural origin gases to be handled. Figure D.1 shows a basic functional scheme. The typical functions are as follows:

- evacuation of air from the gas compartment;
- preparation of natural origin gas mixtures;
- filling of natural origin gases in the gas compartment;
- recovery of natural origin gases from the gas compartment;
- storage of natural origin gases;
- controlled release of natural-origin gases from the gas compartment to the atmosphere;
- removal of contaminants;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- container to container transfer.

Not all the listed handling equipment might be available and/or required, depending on the design of the electric power equipment. It is more a theoretical overview on the possible technical solutions.

The following handling equipment is described below:

- vacuum pump;
- main, outlet and vacuum compressor;
- gas mixing unit;
- gas recovery unit;
- used gas storage and transportation devices;
- gas measurement devices;
- gas leakage detectors;
- gas leakage tester;

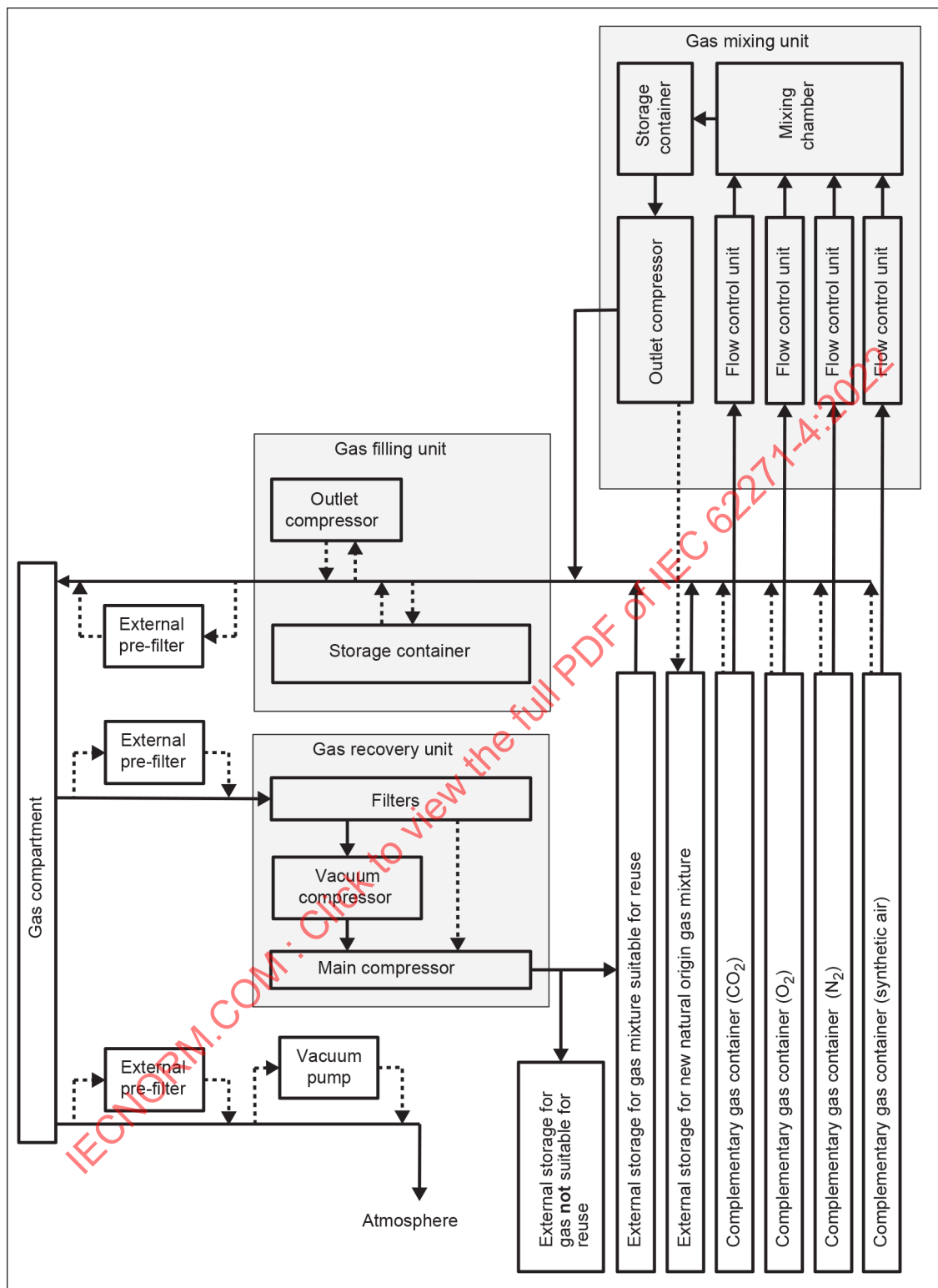
- gas sampling cylinders;
- alarm system detectors.

Some of the above listed handling equipment might be combined for specific tasks.

Depending on the CO₂ and/or O₂ concentrations and the amount of the natural origin gas and the installation site of the gas compartment, like confined indoor or outdoor areas, natural origin gases should be recovered or can be released to the atmosphere (see D.2.2).

When recovering or releasing heavily arced natural-origin gases, filters can be used to absorb possible by-products which can be present in heavily arced natural-origin gases. Indoor release of heavily arced natural-origin gases should be avoided.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022



IEC

Figure D.1 – Schematic view of an example of a handling equipment for natural origin gases

D.6.1.2 Qualification of handling equipment

Before using any handling equipment, it should be ensured that the handling equipment can be used for the intended task. Handling equipment for the same task but intended for another gas and not qualified for natural-origin gases might be damaged, malfunction or give wrong readings and therefore might generate a risk to the operator or the handling equipment or the electric power equipment.

D.6.2 Filters

D.6.2.1 General

Filters are required to remove reactive gaseous by-products, humidity and solid particles or oil droplets before either storing natural-origin gases in a container or releasing heavily arced natural-origin gases to the atmosphere.

Table D.7 shows typical filter types used during release of heavily arced natural-origin gases to the atmosphere which can be the same as for reclaiming of SF₆.

Table D.7 – Typical filter types used during release of natural-origin gases to the atmosphere

Filter type	Tasks	Major characteristics
Particle filter	Removes solid by-products and other particles.	Pore size lower than 1 µm.
Dry filter	Removes reactive gaseous by-products and humidity.	Residual humidity lower than 100 µl/l (ppmv). No residual NO _x and/or CO concentration. OEL values, see Table D.11. Particle retention ability.
Oil filter	Removes oil when required.	Special filter utilising active charcoal.

D.6.2.2 Filter types

D.6.2.2.1 Particle filter

Some by-products, which are generated during switching operations, are made up of fine solid particles (for example metal particles). The inner side of the particle filter consists of paper or suitable bonded fabric able to retain the particles in a range higher than 1 µm. Normally the particle filter is installed at the outlet of the electric power equipment to protect the handling equipment as well as the gas storage container or to avoid the release of particles to the atmosphere, when the natural-origin gases are released to the atmosphere.

D.6.2.2.2 Humidity and gaseous by-products filter (dry filter)

Appropriate filters can adsorb humidity and reactive gaseous by-products like nitrogen oxides (NO_x), ozone (O₃) or carbon monoxide (CO). Molecular sieves with a pore size smaller than 0,5 nm should be used. In case a bigger pore size is used and under certain conditions, thermodynamic exothermal reactions with humidity and/or CO₂ can occur, resulting in filter overheating. Always check the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer if special filter materials are needed for certain natural-origin gas mixtures. Also check the size of the filter, so that it is large enough to achieve the required residual humidity.

D.6.2.2.3 Combined filter

Instead of separate particle filters and humidity and gaseous by-products filters also filters, which combine both filtering principles, can be installed.

D.6.2.2.4 Oil filter

An oil trap containing activated charcoal should be inserted in the natural-origin gases cycle if an oil-lubricated machine is used or if an oil-insulated electric component is included in the electric power equipment utilising natural-origin gases. The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

D.6.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the electric power equipment from air or other gases, which can be released to the atmosphere, but which do not comply with the specifications of the natural-origin gases to be used in the electric power equipment. The vacuum pump is also used to evacuate electric power equipment containing heavily arced natural-origin gases via filters.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 0,1 kPa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 0,01 kPa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 0,1 kPa (recommended value is lower than 0,01 kPa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended.

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

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

D.6.4 Main and vacuum compressors

When the pressure in the gas compartment is higher than the pressure in the storage container, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to recover the gas. As the pressure in the gas compartment can vary within a very wide range, a dual compressor system should be used:

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

NOTE 1 Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination. State of the art compressors can achieve 0,1 kPa pressure at the inlet.

NOTE 2 For example: A 10 000 kPa rated outlet pressure of the compressor is used to store CO₂ or CO₂/O₂ mixtures in a gaseous form. An additional cooling device can be used to speed up the gas recovery.

D.6.5 Outlet compressor

When the pressure in the storage container is higher than the pressure in the gas compartment, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to fill in the gas. The outlet compressor, usually employing a piston type compressor, operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas compartment.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination.

D.6.6 External and internal gas storage container

Gas storage containers are used to store natural-origin gases at an elevated pressure. They are mobile, stationary or installed in the handling equipment. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor, also taking elevated temperatures into account. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

D.6.7 Evaporator and gas storage container heater

If the natural-origin gas is a gas mixture containing CO₂ or is pure CO₂ an evaporator or a gas storage heater can be helpful. If CO₂ is stored in liquid form and used as a gas, thermal losses due to evaporating inside the container cause CO₂ to cool down to a temperature where the evaporation speed is strongly reduced.

In order to fill large volumes rapidly, the handling equipment should be designed to extract liquid CO₂ that is then vaporized inside an evaporator. The evaporator is designed such, that no liquid can reach the gas compartment or the internal storage container.

In addition, gas storage container heaters can be used and should be designed to avoid accidental overheating and not exceeding 60 °C gas temperature.

D.6.8 Gas piping and pipe junctions

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

D.6.9 Control instruments

Control gauges should be provided to show the gas pressure in the gas compartment and in the storage container, the vacuum level, the gas temperature, etc. They should be placed in a position so that they can be observed when filling gas compartments and when releasing natural-origin gases to the atmosphere. Accuracy and resolution of the gauges should be adequate to allow preservation of safe operating conditions.

D.6.10 Safety valves

Safety valves are used in the natural-origin gases cycle for pressure relief. Local safety regulations are followed.

D.6.11 Flexible hose connections

The filter elements, the handling equipment, the gas storage container and the gas compartment are connected via flexible hose connections. For filling operations only, particular care should be exercised to avoid the presence of other compounds than natural-origin gases inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required.

D.6.12 Portable devices for gas measurement

D.6.12.1 General

Table D.8 gives a survey on possible gas measuring devices including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in the technical datasheet.

Table D.8 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
He concentration measuring device (only in case of leakage detection)	He concentration	0 % to 10 %	-10 °C to 40 °C	±0,1 %
CO ₂ concentration measuring device	CO ₂ concentration	0 % to 100 % CO ₂	-10 °C to 40 °C	±0,25 %
O ₂ concentration measuring device	O ₂ concentration	0 % to 25 % O ₂	-10 °C to 40 °C	±0,25 %
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as for example CO, NO, NO ₂	1 µl/l (ppmv) to 25 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±15 % of the full range
Pressure gauge	Pressure	0 kPa to 2 000 kPa	-10 °C to 40 °C	±10 kPa or ±1 % of the full range
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Pressure values are conventionally reported at 20 °C. Either use a temperature compensating pressure gauge or recalculate based on the actual gas temperature during measurement.

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

- humidity concentration in the gas and/or dew point or frost point;
- CO₂ concentration;
- O₂ concentration;
- He concentration (only in case of leakage detection);
- total amount of reactive gaseous by-products.

No pumping back of natural-origin gases after measurement is required if the gas volume for measurement is small compared to the gas volume in the electric power equipment.

D.6.12.2 Frost / dew point meter

The humidity concentration can be measured with different measuring principles and measuring instruments. However, a frost / dew point meter is the most common portable instrument used for this purpose. The instrument measures the frost/dew point of the humidity inside the gas, expressed in °C, and can convert it into a relative volume concentration, expressed in µl/l (ppmv).

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces and corrosive gases;
- permeation resistant pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials;
- calibrated or capable of self-calibration;
- small amounts of gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 5 min.

D.6.12.3 Gas concentration measuring devices

D.6.12.3.1 CO₂ concentration measuring device

Standard CO₂ concentration measuring device use following techniques:

- non-dispersive infrared sensor (NDIR);
- general infrared adsorption measurement devices which can be adjustable to measure the CO₂ concentration (for example Fourier-transform infrared spectroscopy);
- mass-spectrometry;
- measurement of speed of sound, which is an easy way to analyse the concentration in binary mixtures with N₂ or O₂.

D.6.12.3.2 O₂ or He concentration measuring device

O₂ sensors (either portable or fixed installations for laboratory use) are often based for example on electro-chemical sensors, paramagnetic sensors or optical methods. These sensors can be used to check the O₂ concentration of natural-origin gases according to the instruction manual given by the electric power equipment manufacturer.

Helium sensors (either portable or fixed installations for laboratory use) can be required for on-site leakage testing on electric power equipment utilizing natural-origin gases, which is temporarily filled with a certain amount of Helium, to locate abnormal leakage areas. See CIGRE brochure 430 [13]. They are based for example on velocity of sound measurements, mass-spectrometry or thermal conductivity measurements.

The electric power equipment manufacturer should define the maximum allowable concentration of helium that can be left in the electric power equipment for safe operation after the leakage testing has been performed.

D.6.12.4 Analysers of reactive gaseous by-products

Various methods are available to test for reactive gaseous by-products. Common and recommended practice is to test natural-origin gases for the level of nitrogen oxides NO_x, i.e. mainly NO₂ and NO and for the level of carbon monoxide (CO). These tests can be performed using either reaction tubes (reaction tubes change their initial colour if natural-origin gases containing NO_x is fed through them), by using other sensors like an electro-chemical sensor or by sensors which work with infrared absorption principles. Also, mass-spectrometry (MS) or gas-chromatography combined with mass-spectrometry (GC-MS) or thermal conductivity sensors can be used.

Desirable characteristics are:

- known sensitivity to NO_x, CO, ozone, HF;

- connecting pipes resistant to reactive gaseous by-products and utilising self-sealing valve connections.

The use of reaction tubes sensitive to HF is not recommended, as HF reacts very fast with metallic surfaces to form a surface layer of metal fluorides and thus making its detection almost impossible. Such reaction tubes can only be suitable for giving a qualitative indication about the presence of HF in heavily arced natural-origin gases.

D.6.13 Gas leakage tester

In addition to the application of leakage spray, portable helium sensors can be used for on-site leakage testing on electric power equipment utilizing natural-origin gases, which is temporarily filled with a certain amount of Helium, to locate abnormal leakage areas. See CIGRE brochure 430 [13]. Helium sensors are based for example on velocity of sound measurements, mass-spectrometry or thermal conductivity measurements. Other approaches have been reported based on either the cumulative test method (e.g. with CO₂ sensors) or the sniffing method using ozone as tracer gas instead of helium.

D.6.14 Gas concentration alarm systems

Gas concentration alarm systems might be installed to monitor the CO, CO₂ or NO_x concentration in a room. Such alarm systems require detectors with very high long-term stability. Alarm systems incorporating detectors for the above-mentioned substances are generally used only where large volumes of natural-origin gases are contained in electric power equipment housed indoors, such as in gas-insulated metal-enclosed switchgear installations.

D.6.15 Gas sampling cylinders

Stainless steel cylinders with a volume smaller than 1 l are recommended. The gas should be sampled directly from the gas compartment using suitable fittings. If the pressure in the gas compartment exceeds the maximum allowable pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge should be used.

D.6.16 Gas mixing unit

In Figure D.1, top right, a gas mixing unit is shown. It is used to mix different natural origin gases according to a preselected gas ratio during filling or topping-up of an electric power equipment or an external storage container. It is also possible to use premixed carrier gases, such as synthetic air, which is a mixture of 20 % O₂ and 80 % N₂.

The flows of the natural origin gases are controlled by flow control units to fill the storage container with the preselected mixture. The outlet pressure (i.e. the filling pressure in the gas compartment or in the storage container) is controlled by the outlet compressor.

Desirable characteristics are:

- adjustable gas concentrations (mixing ratios) and outlet pressures (i.e. filling pressure);
- maximum outlet pressure at 20 °C: up to 2 000 kPa;
- possibility of mixing small as well as large quantities of gas.

A second practice for providing technical grade natural-origin gases is utilizing pre-filled containers which are available all over the world. In that case, electric power equipment is directly filled from the pre-filled container by utilizing dedicated pressure reducers limiting the pressure to the filling pressure for insulation and/or switching.

D.6.17 Gas filling unit

In the center of Figure D.1 a gas filling unit is shown. It is used to sequentially fill the individual components of the gas mixture into the gas compartment or to fill a premixed gas mixture into the gas compartment (see D.10.2).

D.6.18 Gas recovery unit

In the center of Figure D.1 also a gas recovery unit is shown. Gas recovery devices normally consist of a set of components including a particle filter, dry filter, vacuum compressor, compressor and storage container for used natural-origin gases.

The gas recovery unit is intended to recover natural-origin gases from a gas compartment in case of maintenance, repair or end-of-life.

D.6.19 Used gas storage and transportation devices

Pressure containers or special storage containers for used natural-origin gases are available as gas storage containers. They are mobile or stationary. Only specially approved containers for storage and transportation of used natural-origin gases are allowed. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

When compressing natural-origin gases, that contain CO₂, the contained CO₂ might start to liquefy at a specific pressure and temperature. This should be considered when choosing a compressor and the maximum pressure for the pressure container is defined.

D.7 Reclaiming procedures

D.7.1 General

Non-arced natural-origin gases recovered from electric power equipment can contain humidity and ambient air but do not have an environmental impact. Reclaiming is only needed, when releasing heavily arced natural-origin gases to the atmosphere. In this case filters should be used to absorb possible by-products. Non-arced natural-origin gases can be released into the atmosphere and do not need to be reclaimed. The gas release should be done at a well ventilated, preferably outdoor location and should not be close to basements, working pits or equal, to avoid – if CO₂ is contained in the mixture – local accumulation of CO₂. Local regulations should be taken into account.

Normally arced natural-origin gases can contain small amounts of toxic by-products. It depends on the individual natural-origin gas mixture and on the application which and how much toxic by-products are being produced. Because of the variety of switching application one should consult the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer on how to proceed with normally arced natural-origin gases.

NOTE Typical electric power equipment having normally arced natural-origin gases and their mixtures is: gas-insulated earthing switch (after breaking of small induced currents) and gas-insulated disconnector (after breaking of small currents or bus transfer currents) and medium-voltage load-break switch after making and interruption of rated currents.

Heavily arced natural-origin gases contain toxic by-products, mainly CO and NO₂ or NO, but also other components formed by the combustion of various metals and plastics, which are present inside the electric power equipment. When releasing heavily arced natural-origin gases to the atmosphere, filters should be used to absorb possible by-products. The filter units used for SF₆ are also applicable to filter used natural-origin gases.

The filters should meet the following requirements:

- they should reliably remove the mentioned contaminants;
- the filters should be of cartridge type for safe and easy disposal;
- input and output should be equipped with the same self-sealing couplings;
- changing filters should not require disassembly of any fittings, tubing, or any other connection to reduce or eliminate the possibility of leakage;
- changing the filter is recommended for each reclaiming procedure.

D.7.2 Filtering recommendations

The quality of filtered natural-origin gases should meet the requirements given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer and should be in accordance with local regulations.

All occurring contaminants can be eliminated on-site. Table D.9 lists the type of contamination and the methods recommended for removing the contaminants.

Table D.9 – Exemplary filtering operations

Contamination	Humidity	Gaseous by-products	Solid by-products	Contaminated with mineral oil (if needed)
Filtering method	Adsorption with molecular sieve	Adsorption with activated aluminium oxide or molecular sieve	Retaining with solid filters	Activated charcoal filter

Various types of adsorbent materials are available to remove contaminants from natural-origin gases (see Table D.10). Through the corresponding handling with filter elements, the gas will be filtered and finally released to the atmosphere.

Table D.10 – Typical adsorbents for various contaminants of natural-origin gases

Adsorbent	Contaminants removed
Molecular sieve 4A	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , HNO ₃ , HNO ₂ , CO
Molecular sieve 13X	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , HNO ₃ , HNO ₂ , CO (only adsorbs little natural-origin gases)
Activated aluminium oxide	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , HNO ₃ , HNO ₂
Activated charcoal	Oil vapour

D.7.3 Transport of used natural-origin gases in gas cylinders and containers by road

Transport of used natural-origin gases is not necessary. Only for gas analysis off-site transport is required. For used natural-origin gases, the regulations for road transportation and labelling are the same as for technical grade natural-origin gases (see D.5.3). However, local regulations should be taken into account.

This document does not define a minimum concentration or amount for dangerous by-products. Local regulations or guidelines should be applied if available.

D.8 By-products

D.8.1 General

This subclause describes general aspects on decomposition and characteristics of by-products. The quantities will depend on the gas composition, contaminants and energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer according to IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

D.8.2 Decomposition of natural-origin gases

D.8.2.1 General

When arcing occurs in natural-origin gases different by-products are generated simultaneously in varying quantities. At temperatures above a few 1 000 °C the N_2 , O_2 or CO_2 molecules start to decompose. The decomposition rate is related to the total arc energy. When the temperature drops down again, most of the atoms recombine to form CO, CO_2 , N_2 or O_2 and solid C whilst others combine with humidity and different substances of the electric power equipment, such as vaporised electrode metals, vessel walls, PTFE-nozzle ablation, or other plastics, to form a variety of unstable or stable end products.

Among the toxic by-products, CO and HF (mainly from PTFE-nozzle ablation) are regarded as the most critical ones.

D.8.2.2 Decomposition of natural-origin gases in low current discharges

Whilst operating voltage is applied to electric power equipment containing natural-origin gases, the possibility of low current discharges such as corona, sparking and partial discharges cannot be ruled out. However, the concentrations of by-products resulting from such discharges are very low.

D.8.2.3 Decomposition of natural-origin gases in an electric arc

During load current or fault current switching an electric arc, reaching temperatures in the order of 10 000 °C, is formed. Depending on the composition of the natural-origin gases many different decomposition processes can occur. Among the toxic by-products, which are produced because of an electric arc, CO and HF (in case PTFE or other fluorine containing plastics are used) are regarded as the most critical ones.

D.8.2.4 Decomposition of natural-origin gases due to an internal arc failure

The decomposition mechanisms described in D.8.2.3 are similar in case of an internal arc failure. Additional gaseous by-products as well as solid by-products (e.g. metal oxides) can arise from interaction of the internal arc with different materials present in electric power equipment.

D.8.2.5 Chemical reaction of natural-origin gases with material

In the absence of significant amounts of by-products, corrosion is the only relevant chemical reaction to be regarded when using natural-origin gases for insulation and/or switching. For more details, see D.8.3.

D.8.3 Corrosion behaviour of natural-origin gases and their by-products

In normal operation significant amounts of by-products do not occur and are adsorbed by the adsorbent materials.

Only in case of heavily arced natural-origin gases containing a significant concentration of corrosive by-products (for example in case of internal arc faults), the metals commonly used, such as aluminium, steel, copper and brass, might be attacked leading to corrosion.

N₂ is an inert gas. Therefore, there is no possibility that corrosion will be caused directly by the N₂ itself.

The impact of O₂ in the presence of water on the corrosion behaviour in electric power equipment is well known and considered in relevant standards like IEC 62271-1:2017 or IEC TR 60943 [15]. However, the primary and secondary by-products, in presence of water, can form corrosive nitrous or nitric acids as well as ozone which can lead to damage of some of the material used inside the electric power equipment.

Also, pure CO₂ is non-corrosive, but together with water it can form carbonic acid which can be corrosive. However, the lack of stability of H₂CO₃ will not seriously affect the electric power equipment. Nevertheless, electrical power equipment equipped with an appropriate desiccant will avoid any risk of corrosion.

Some materials such as polymeric materials and the like are more vulnerable to damage by ozone attack. However, the impact of ozone on material properties is very much depending on the specific material utilized in electric power equipment.

It is important that the design and the operating instruction manual of the electric power equipment take the corrosive properties of the O₂ and the by-products into account.

D.8.4 Measures for the removal of by-products

Humidity and by-products inside the electric power equipment can be reduced to acceptable levels by adsorption. Materials such as alumina, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb most gaseous by-products very effectively, and at the same time ensure that the dew point / frost point stays low.

Disposal of by-products removed from electric power equipment is straightforward. The acid components (nitrous and nitric acid) are degraded by means of alkaline compounds, in particular washing soda (Na₂CO₃).

D.8.5 Physiological characteristics of by-products

By-products of natural-origin gases can cause irritation of the skin, eyes and mucous membranes, such as in the respiratory tract, and in high concentrations can cause pulmonary oedema (for example O₃), given sufficient time of exposure.

Heavily arced natural-origin gases containing by-products have an unpleasant bleach or pungent smell that in itself is associated with an irritant effect. The odour threshold values, especially for NO₂ and O₃, are of the same order as the threshold limit values given in Table D.11. Because of these characteristics, even small quantities of gaseous by-products can give rise to unmistakable warning indications within a matter of seconds, before any risk of poisoning can arise.

Where carbon monoxide CO is produced its detection is essential. Carbon monoxide CO is odourless and toxic by inhalation. It causes headaches, nausea, dizziness, unconsciousness and sometimes death. Prolonged or repeated inhalation can cause damage to the heart.

D.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products

D.9.1 General

This subclause suggests procedures for the evaluation of the health risks due to heavily arced natural-origin gases containing a significant amount of by-products released into the local atmosphere by normal or abnormal leakage and in the event of a sudden release due to an internal arc fault or external fire.

Non-arced and normally arced natural-origin gases when captured in gas compartments have no potential effects on health of personnel and are therefore not regarded in this respect.

During normal service natural-origin gases remain inside the electric power equipment and the gaseous by-products formed are present at low concentrations. Natural-origin gases and their by-products can become present in the atmosphere because of leakage or if the gas compartment fails to contain the gas, for example as the result of an internal arc fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal arc fault situations leading to a sudden release of natural-origin gases and their by-products, when evaluating the health risk.

In case of a leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to the gaseous by-products of natural-origin gases. The concentrations of these by-products in the air should remain below their TWA values. The by-products should be captured by adsorbent materials inside the electric power equipment so that leakage conditions combined with normal room ventilation cannot lead to abnormal concentrations of by-products in the environment.

In case of a sudden release of natural-origin gases and their by-products due to an internal arc fault, the emergency procedure required by the local regulation can result in short term exposure. By-product concentrations of higher levels would be tolerable if the exposure time is considerably reduced. In this case all possible sources of toxic emissions should be taken into account, and this requires detailed knowledge of all of the by-products formed. A full analysis should consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to natural-origin gases and their gaseous by-products.

The following subclauses give example calculations for evaluating the risks associated with the presence of by-products in terms of quantity and toxicity due to normal or abnormal leakage into the atmosphere. The quantities will depend on the gas composition, the contaminants and the arc energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

D.9.2 Formation of by-products and health effects

D.9.2.1 Formation of by-products during arcing

During load current and fault current switching in natural-origin gases the arc core reaches temperatures of the order of 10 000 °C. At these temperatures the molecules of the gas are completely broken down into their parent atoms, N, O and C, as reported in Clause D.8. Any contaminants, such as water, are dissociated in a similar manner. The result of this is a localised region containing only single atoms of N, O, C and diverse ions. The heating of the electrodes and the insulating parts by the arc adds vapours of e.g. Ag, Cu, W, C and Al to this atmosphere.

After arc extinction or in regions where cooling commences, these atoms start to bind together again and reform mainly N₂, O₂, CO₂ or CO. However, chemical reactions take place with the contaminations present and in particular with water, giving rise to the additional arc by-products. The quantities formed are directly related to the electrical energy injected into the gas volume.

In case of circuit-breakers, containing natural-origin gases (typically containing a significant amount of CO₂) and that use PTFE parts, also HF can be formed as a critical by-product. As a worst-case scenario, it should be considered that for such an exemplary breaker the two by-products CO and HF are always present when the arced gas is released into the atmosphere.

In case of arcing as well as low energy electrical discharges, the most frequently encountered gaseous by-products are: NO₂ and O₃ and CO.

D.9.2.2 Effects of gas components and by-products on health

D.9.2.2.1 General

If arced natural-origin gases are exhausted into the workplace, the potential health risk will depend on the concentration of each gas component and by-product in the air, and hence on the volume of the room containing the electric power equipment. Toxicity estimations should take into account the concentration of each gas component and by-product in relation to the permissible concentrations for the appropriate exposure time. The formula below should be adopted to calculate the total risk associated to the gas components and by-products (see D.9.2.4 for example calculations, which should be done for every gas component and by-product occurring).

$$Risk_{tot} = \sum_i \frac{\text{concentration (by-products)}_i}{\text{threshold (by-products)}_i} \leq 1$$

In principle there are four main cases, when contact with natural-origin gases including their by-products can happen:

- **normal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment within the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **abnormal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment above the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **maintenance:** entering gas compartments after recovery of the natural-origin gases for maintenance, repair or end-of-life treatment;
- **failure:** opening of a gas compartment due to an internal arc or an external fire.

The main difference is the concentration of by-products in the switchgear room. In case of an external fire or an internal arc failure, additional harmful substances might also be generated. These additional substances are not covered by this analysis, as they depend not only on the insulation gas, but also on the other materials used and on their behaviour in case of fire or high energy arcs.

NOTE Depending on the room size the leaked gases might temporarily not be homogeneously distributed in the switchgear room and locally higher concentrations might occur.

D.9.2.2.2 Health effects of arced natural-origin gases

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

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

The total health risk to personnel, due to heavily arced natural-origin gases, is predominantly dependent on the concentrations of CO₂ and the by-products NO₂ and CO (O₃ is an unstable molecule with a short lifetime in the atmosphere).

Hydrolysis of NO₂ can occur in the presence of significant concentrations of water, producing HNO₂ and HNO₃, as reported in D.8.1. For the time being, the TWA value of HNO₃ has been defined to 2 µl/l (ppmv).

D.9.2.2.3 Exposure duration and dilution in air

There are two key elements essential to any evaluation of health risk due to exposure to toxic substances:

- concentration of the substance in the surrounding volume;
- time duration of the exposure.

When a leakage situation is calculated, the TWA value should be used. An example of a TWA calculation is given in 3.1.28.

Exposure to measurable concentrations of gas components or by-products is not expected during normal operation of electric power equipment. Airborne concentrations of gas components or by-products are typically well below the TWA value for those substances.

In the event of a sudden release, such as the opening of a pressure relief device, e.g. because of an internal arc fault, personnel should immediately leave the switchgear room, resulting in short-term exposure to measurable concentrations of by-products. By leaving the room it can be avoided that personnel could potentially be exposed to concentrations of gas components or by-products above their C values, above their STEL values or above five times their TWA values.

The OELs for NO₂, NO, O₃ and HNO₃ are given in Table D.11. Moreover, Table D.11 differs between unstable (short lifetime in the atmosphere) and stable molecules (long lifetime in the atmosphere).

Table D.11 – OELs for NO₂, NO, O₃, CO and HNO₃

OEL	NO ₂	HNO ₃	CO	NO	O ₃
	Stable molecule in ambient air at ambient temperature			Unstable molecule in ambient air at ambient temperature	
TWA [µl/l (ppmv)]	0,2 to 0,5	2	35 ^a	25	0,05 to 0,1
STEL [µl/l (ppmv)]	5	4	420 ^b	not defined	0,3
C [µl/l (ppmv)]	115	67	200 ^a	115	12,6
NOTE 1 Values are according to ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), OSHA (Occupational Safety and Health Administration) or AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals).					
NOTE 2 If no C value is available, the LC50 value is added instead.					
^a According to USA NIOSH.					
^b According to www.epa.gov – AEGL 2 levels for CO for 10 min.					

D.9.2.3 Quantitative estimation of gaseous by-products

The production rate of gaseous by-products formed during an electrical arc is generally referred to the energy in Joule dissipated in the gas. Experimental results are generally quoted in mol/J.

Except for circuit-breakers or after internal arc faults, only non-arc and normally arc natural-origin gases and therefore only very small concentrations of NO_2 , NO , O_3 , CO and HNO_3 are to be expected during operation of electric power equipment containing an adequate type and amount of adsorbent materials.

The small concentrations of NO_2 , NO , O_3 and CO formed during normal arcing or electrical discharge will be further reduced due to their adsorption by adsorbent materials. The concentration of HNO_3 to be expected is negligible due to the very low concentration of water. Furthermore, adsorbent materials suitable to adsorb HNO_3 will further reduce the maximum concentration of HNO_3 .

The estimated concentration of NO_2 , NO , O_3 , CO and HNO_3 due to arcing in circuit-breakers should be provided by the electric power equipment manufacturer.

D.9.2.4 Procedures for health risk evaluation

D.9.2.4.1 General

The procedures for the evaluation of the potential effects on health of gaseous by-products in normally or heavily natural-origin gases are based on the following assumptions:

- the switchgear room is completely closed;
- the gas emitted uniformly mixes with the air in the switchgear room in a short time with respect to the working day or exposure duration.

The evaluation of possible concentrations of by-products should be done by the electric power equipment manufacturer, taking into account worst case scenarios, as type tests of switches and end-of-life concentration (for HV gas circuit-breakers also conditions related to defined service intervals) and the results shared with the end-user. Using worst case conditions, the end user is always on the safe side. Actual figures can only be given by adequate gas sample analysis.

D.9.2.4.2 Normal leakage

In IEC 62271-1:2017, 6.16.1, the permissible leakage rate for gases used in switchgear are given. Often, smaller leakage rates are stated by the manufacturer of the electric power equipment and are verified during type tests. These tests cover all three aspects of leakage:

- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of static connections;
- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of dynamic connections, where gas is leaking during operation of translating or rotating shafts;
- permeation of gas through elastomer (for example seal) or thermoplastic material.

The permissible leakage rate is valid at an ambient temperature of 20 °C. For higher temperatures the permitted temporary leakage rate can be up to three times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15). This is mainly driven by the strong temperature dependence of gas permeation. Also, for temperatures below 0 °C the permitted temporary leakage rate can be up to three or six times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15), which is mainly a result of the reduced flexibility of seals in dynamic connections.

To verify that the electric power equipment is free from manufacturing defects resulting in higher leakage rates, a routine tightness test is state of the art. However, this test typically only detects gas leakage between interfaces, due to its short duration (permeation effect can take weeks before becoming detectable). Routine tightness tests are sufficient to detect problems in manufacturing (where leaks at interfaces and not excessive permeation are the dominant cause).

The quantity of the leaked gas and its by-products can be calculated by knowing the leakage rate, the volume of all gas compartments, the total gas pressure and the time. The ventilation of the switchgear room plays an important role. Only at very low ventilation speeds or if there is no ventilation at all, the leaked gas and its by-products will accumulate in the switchgear room.

The permeation of the different components of a gas mixture can be different and depends on the specific permeation coefficient of the gas, which is related to the material and to the partial pressure difference of the gas components inside and outside of the gas compartment.

As permeation is a more or less constant effect over time and distributed on many locations of the gas compartment, a homogeneous mixing of the gas components within the switchgear room can be assumed.

Table D.12 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A MV switchgear is chosen, where CO ₂ at a concentration of 90 % is used as a quenching medium and normally arced natural-origin gas is present.	
V_{eq}	Total gas volume of all gas compartments
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
F_{rel}	Permissible relative leakage rate
t	Time to ventilate the room
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$Q = V_{room} / t$	Room ventilation rate
$R_{total} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Total absolute leakage rate
$R = R_{total} \times x$	Absolute leakage rate of gas component or by-product
$y = R / Q$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table D.12 – Example calculation of a normal leakage

Gas component or by-product		CO	CO ₂
V_{eq}	[m ³]	5	5
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	150	150
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[μl/l (ppmv)]	20 000	900 000
F_{rel}	[%/year]	1	1
t	[year]	0,005	0,005
Q	[m ³ /year]	20 000	20 000
R_{total}	[m ³ /year]	0,075	0,075
R	[m ³ /year]	0,001 50	0,067 5
y	[μl/l (ppmv)]	0,075	3,38
TWA	[μl/l (ppmv)]	35	5 000
S		0,002 14	0,000 675
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

D.9.2.4.3 Abnormal leakage

Defects are the exception but cannot be entirely excluded. The main type of defect in this context is leakage due to defects in components that are normally gastight. This can be due to a damaged seal or a cracked bushing. These defects can lead to increased leakage rates; in the worst case, the overpressure can decrease to zero within weeks, days or even minutes. In this case, the amount of gas that leaks into the ambient air depends on the overpressure. As modern gas-insulated metal-enclosed switchgear are separated into several gastight gas compartments without gas connections, the amount of gas per gas compartment is limited. In most cases, this type of defect only affects one or two gas compartments.

Also, human error, such as drilling a hole in a gas compartment, accidentally opening a cover, or incorrect operation of a valve can lead to a gas loss and a reduction of the pressure in the gas compartment to ambient pressure.

This effect is a short-term effect and is concentrated at a defined location. The most important risk is of someone being present at this location at the time of the failure. In this case, the local concentration of gas components and by-products will be temporarily higher, but they will also dilute within a short time period within the switchgear room, finally yielding a homogeneous mixture. Simulations have shown that this will take between a few minutes to a few hours.

Electric power equipment, which is affected by an abnormal leakage, leading to a reduction of the pressure of the insulating gas to ambient pressure, should be shut down and earthed as soon as possible. This is to avoid unexpected flashover to earth inside the gas compartment which could generate an internal arc.

Table D.13 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:

A MV switchgear is chosen, where CO₂ at a concentration of 90 % is used as a quenching medium and normally arced natural-origin gas is present.

This example calculation is a worst case scenario, where all the overpressure inside the largest gas compartment of the electric power equipment is lost into the room within a short time, hence in a time which is much shorter than the time to ventilate the room, and therefore the calculation does not take the time to ventilate the room into account.

In the case where the leakage rate is abnormal, but still in a measurable range of up to a few percent per day, the ventilation should be taken into account, and a similar calculation as shown in D.9.2.4.2 can be done.

V_{comp}	Total gas volume of largest gas compartment
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Total leakage volume
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Leakage volume of gas component or by-product
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table D.13 – Example calculation of an abnormal leakage

Gas component or by-product		CO	CO ₂
V_{comp}	[m ³]	1	1
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	150	150
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	20 000	900 000
V_{tot}	[m ³]	0,5	0,5
V_{leak}	[m ³]	0,010	0,450
y	[µl/l (ppmv)]	100	4 500
TWA	[µl/l (ppmv)]	35	5 000
S		2,86	0,900
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

D.9.2.4.4 Maintenance, service and repair within gas compartments

In case maintenance, service or repair should be performed on the electric power equipment containing non-arcged and normally arcged natural-origin gases, the gas can be released to the atmosphere and the gas compartments can be opened afterwards by considering safety measures defined in D.2.2.

Prior to opening of the gas compartments containing heavily arcged natural-origin gases, the gas should be reclaimed by releasing it to the atmosphere via filters, the gas compartment should be evacuated with a vacuum pump via filters and later flushed with ambient air. When opening the gas compartment, small concentrations of by-products can remain inside. Then, adequate safety equipment and tools should be used (see Table D.4).

Table D.14 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate remaining concentrations of gas components or by-products in the gas compartment after gas recovery. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:

A switchgear is chosen, where CO₂ at a concentration of 90 % is used as a quenching medium and normally arced natural-origin gas is present. After the complete recovery of the gas, down to the residual pressure p_{res} , by using a vacuum pump as described in D.6.3, or a recovery unit as described in D.6.17, the gas compartment is flooded with ambient air and the concentration of the remaining gas components or by-products inside the gas compartment are calculated.

In the case where the natural-origin gas is released to the atmosphere without the use of a vacuum pump or a recovery unit and therefore without flooding the gas compartment with ambient air before opening, the concentrations of the gas components and the by-products inside the gas compartment will remain unchanged and might be well above their TWA-values.

p_{res}	Residual pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product before recovery
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Remaining concentration of gas component or by-product within gas compartment after recovery
$S = c / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table D.14 – Example calculation for maintenance

Gas component or by-product		CO	CO ₂
p_{res}	[kPa]	0,5	0,5
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	20 000	900 000
c	[µl/l (ppmv)]	100	4 500
TWA	[µl/l (ppmv)]	35	5 000
S		2,86	0,900
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $S > 1$: the gas compartment should be cleaned from possible solid by-products, where applicable, and sufficiently ventilated, before approaching it without full protection. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

D.9.2.4.5 Internal arc failure and/or external fire

The worst-case failure scenario that can occur in electric power equipment is an internal arc failure, which is caused by a defect or an operator error and results in an arc between the phases and/or between phase and ground that burns until the arc energy is interrupted by a circuit-breaker. Depending on the network, the released energy can be very high, which leads to a massive pressure increase inside the gas compartment. To avoid the uncontrolled cracking of the gas compartment in such a case, pressure relief devices open after a few milliseconds and the plasma produced by the internal arc is guided to the outside in a controlled way. In many cases pressure relief ducts are used to guide the plasma to areas where no direct contact with the operator can occur or even to the outside of the building. An internal arc event is typically limited to a single gas compartment. The entire amount of the heavily arced gas in the affected gas compartment is released. Due to the high temperature of the electric arc (10 000 °C to 20 000 °C), the gas molecules are decomposed, forming a plasma. As it cools down, the plasma created from the gas, evaporated metals, burnt insulation material, ambient air and humidity recombines and new molecules are formed.

External fire is a major failure that can also occur. It is normally not caused by the switchgear itself. The effect depends very much on whether or not the switchgear is energized. If not, the effect is similar to the case described in D.9.2.4.3 but might affect more than one gas compartment. The quantity of released gas and the decomposition rate is highest in case of an external fire. In addition, the temperature rise caused by the external fire might lead to decomposition of the released gas. Due to heating of the gas by the high temperature of the fire, it is also possible that pressure relief devices open and release the contained gas. When the switchgear is energized, the opening of a gas compartment due to thermal overpressure caused by the heat of the fire will lead in a second phase to an internal arc. The effects of the fire and of the internal arc are then superimposed.

Regardless of whether or not the switchgear is energized, the quantity of released gas and the decomposition rate is highest in this scenario. In addition, the pollution of the switchgear room might be dominated by the by-products of burning plastics or evaporated and oxidised metals. Carbon monoxide and carbon dioxide can be present in high concentrations. These additional contaminants are independent of the insulation gas used. In an external fire, materials are burning which are normally not affected by internal arc failures. These can be the secondary equipment including wiring, protection and control equipment, and electronics. The used materials might create harmful by-products when burnt, which are independent of the type of switchgear and insulation gas.

Unlike in the case of the other scenarios, in the case of an internal arc or a fire, it is strongly recommended to leave the area immediately and not to re-enter without personal protection before the area has been sufficiently ventilated.

D.9.2.4.6 TWA values for gas components and by-products

The potential effect on health can be best estimated when looking at the TWA values of the gas components and the by-products and their related concentrations in the room or the area inside the room where personnel is located during the different scenarios described from D.9.2.4.2 to D.9.2.4.5.

TWA values for by-products are listed in Table D.11.

A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

D.9.2.5 Conclusion

The above examples of calculations demonstrate that normal leakage of electric power equipment filled with natural-origin gases cause no health risk due to exposure to by-products. The by-products, formed by arcing inside the electric power equipment, reach negligible concentrations in the workplace.

In the case of abnormal leakage situations, maintenance, service and repair, which are limited to single compartments, and if concentrations of by-products or CO₂ slightly above the TWA-value occur, adequate actions should be taken (e.g. additional ventilation, lower residual pressures, gas dilution, personal protection, etc.).

If an internal fault leads to a sudden release of heavily arced natural-origin gases, significant concentrations of by-products or CO₂ can occur in a switchgear room and it is strongly recommended to leave the switchgear room immediately. Basic safety procedures including evacuation rules are designed to ensure that personnel are exposed to exhausted materials for a time as short as possible. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure that the concentration levels can be reduced within minutes. Re-entering the switchgear room without protection is only possible when the concentration of the gas and the by-products has fallen below their TWA value.

For outdoor installations and whatever type of leakage or release, the volume of air into which the heavily arced natural-origin gases escape is large and prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion.

The safety procedures need to be adapted for each individual installation, taking all aspects mentioned above into account.

D.10 Handling of natural-origin gases

D.10.1 General

The scope of this subclause is to address the particularities for handling natural-origin gases during installation, commissioning, after repair or overhaul on site and disposal at the end of life of electric power equipment.

D.10.2 Filling gas compartments with natural-origin gases

If not otherwise specified by electric power equipment manufacturer, 4.2 or 4.4 are applicable. If the gas mixture contains O₂ the following additions apply:

- N₂ and/or CO₂ should be filled first in order to avoid high O₂ concentrations in gas compartments usually not designed for this purpose. Connect the N₂ or CO₂ container and fill the gas compartment until the rated N₂ or CO₂ partial filling pressure for insulation and/or switching is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling. The order of filling the gases (N₂ first or CO₂ first) can be individually defined by the manufacturer of the electric power equipment.
- Connect the O₂ container and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.

Alternatively, gas mixing devices or premixed gases can be used to speed up the process and reduce the probability of accidental mistakes.

In case tightness inspection with additional tracer gases (e.g. Helium) are performed, the filling procedure can differ from 4.2 or 4.4 and the procedure given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be followed.

D.10.3 Topping-up gas compartments with natural-origin gases

D.10.3.1 Topping-up gas compartments with one natural-origin gas

Subclauses 4.3 or 5.1 are applicable.

D.10.3.2 Topping-up gas compartments with a binary mixture of natural-origin gases

This subclause applies to gas compartments containing a binary natural-origin gas mixture, containing gas A and gas B. If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, one of the following procedures should be applied:

- If the mixing ratio of the remaining gas is within the specifications given by the manufacturer, topping-up can be done according to 4.3 or 5.1 by using a gas mixture having the specified mixing ratio,
- As a second option the following procedure is possible:
 - Evaluate the intermediate pressure p_{int} as:

$$p_{\text{int}} = x \times p_{\text{re}} + (1-y) \times p_i$$

where

- x is the required concentration of gas A of the natural-origin gas mixture;
- p_{re} is the filling pressure for insulation and/or switching of the binary natural-origin gas mixture;
- y is the actual concentration of gas A of the natural-origin gas mixture in the pre-filled gas compartment;
- p_i is the actual pressure of the binary natural-origin gas mixture in the pre-filled gas compartment.
- Connect the container of gas A and fill the gas compartment until the intermediate pressure p_{int} is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.
- Connect the container of gas B and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching p_{re} .

In order to avoid mistakes, the measurement and calculation of the pressure values p_{int} and p_i as well as the topping-up should be performed at the same temperature, with p_{re} being the filling pressure for insulation and/or switching converted to that same temperature.

D.10.3.3 Topping-up gas compartments with a ternary mixture of natural-origin gases

This subclause applies to gas compartments containing a ternary mixture of natural-origin gases. If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, the following procedure should be applied:

If the mixing ratio of the remaining gas is within the specifications given by the manufacturer, topping-up can be done according to 4.3 or 5.1 by using a gas mixture having the specified mixing ratio.

D.10.4 Checking the quality of natural-origin gases

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 5.2 is applicable.

D.10.5 Recovery and reclaim of natural-origin gases

If not otherwise specified in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer, 6.2 or 6.3 are applicable with the following modifications:

- Instead of recovery (steps 3 and 4), used natural-origin gases can be released into the atmosphere.
- In case of heavily arced natural-origin gases, the gas is released into the atmosphere via filters (see D.6.2). For evacuation to the residual pressure p_{res} , a vacuum pump is connected to the gas compartment via filters (see D.6.3).

D.10.6 Rectifying the composition of natural-origin gas mixtures

D.10.6.1 Rectifying the composition of a gas compartments filled with a binary mixture of natural-origin gases

This subclause applies to gas compartments containing a binary mixture of natural-origin gases whose mixing ratio does not comply with the specifications given in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, either of the following should be applied:

- For rectifying the composition of a binary natural-origin gas mixture, the natural-origin gas mixture with the wrong mixing ratio should be recovered completely and then the gas compartment should be filled with the correct mixing ratio.
- For rectifying the composition of a binary natural-origin gas mixture, containing gas A and gas B, also the following alternative procedure can be applied:
 - evaluate the pressure p_{rec} :

$$\text{for } y \leq x \quad p_{\text{rec}} = p_{\text{re}} \times \frac{1-x}{1-y}$$

$$\text{for } y > x \quad p_{\text{rec}} = p_{\text{re}} \times \frac{x}{y}$$

where:

p_{re} is the filling pressure for insulation and/or switching of the binary natural-origin gas mixture;

x is the required concentration of gas A of the natural-origin gas mixture;

y is the actual concentration of gas A of the natural-origin gas mixture in the gas compartment.

- if the actual pressure of the natural-origin gas mixture in the gas compartment is smaller than p_{rec} , the gas compartment should be topped-up according to the procedure described in D.10.3.2.
- if the actual pressure of the natural-origin gas mixture in the gas compartment is larger than or equal to p_{rec} , recover the natural-origin gas mixture in the gas compartment to the recovery pressure p_{rec} and then top-up the gas compartment as follows:
 - for $y \leq x$, top-up the gas compartment with gas A to the filling pressure for insulation and/or switching of the natural-origin gas mixture;
 - for $y > x$, top-up the gas compartment with gas B to the filling pressure for insulation and/or switching of the natural-origin gas mixture.

D.10.6.2 Rectifying the composition of a gas compartments filled with a ternary mixture of natural-origin gases

This subclause applies to gas compartments containing a ternary mixture of natural-origin gases whose mixing ratio does not comply with the specifications given in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If not otherwise specified in the instruction manual of the electric power equipment manufacturer, the following should be applied:

For rectifying the composition of a ternary natural-origin gas mixture, the natural-origin gas mixture with the wrong mixing ratio should be recovered completely and then the gas compartment should be filled with the correct mixing ratio.

D.11 Specifications for natural-origin gases needed for filling or topping-up electric power equipment

The maximum levels of contaminants for natural-origin gases to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment is to be topped-up, should be specified by the electric power equipment manufacturer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Annex E (informative)

$C_5F_{10}O$ (C5-FK) in mixtures with N_2 , CO_2 , O_2 (C5-FK mixtures)

E.1 Gas properties

E.1.1 General

In the following subclause the gas properties of $C_5F_{10}O$ (for easier reference C5-FK) are presented. In case of a mixture with N_2 and/or O_2 and/or CO_2 (for easier reference C5-FK mixtures), the properties are strongly related to the mixing ratio and can therefore not be presented as absolute numbers. Properties of the carrier gases are not part of this annex, but they are part of Annex D or publicly available, as these are natural-origin gases.

1,1,1,3,4,4,4-heptafluoro-3-(trifluoromethyl)-2-butanone, also described as $CF_3C(O)CF(CF_3)_2$ or $C_5F_{10}O$ is a fluoroketone. For easier naming, reference and identification it is also named C5-FK (FK = fluoroketone) or C5-PFK (PFK = perfluoroketone). It is a synthetic fluid. The structure of the molecule is shown in Figure E.1.

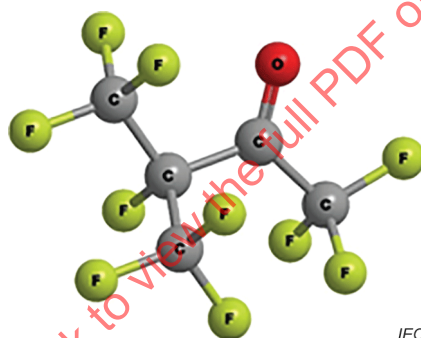


Figure E.1 – Structure of the C5-FK molecule

Due to a boiling point of 26,9 °C, which is above the minimum operating temperature of the electric power equipment, it cannot be used in pure form as an insulation gas for electrical applications, but is used as a mixture with carrier gases to achieve a total gas pressure above ambient pressure. The preferred carrier gases which are mixed with C5-FK depend on the application.

E.1.2 Chemical properties

Pure C5-FK is odourless, tasteless, colourless, non-flammable and stable. Materials to be used with C5-FK in electric power equipment and handling equipment should have a proven material compatibility. It is non-ozone depleting and has a GWP₁₀₀ of less than 1.

Table E.1 lists the main chemical characteristics.

Table E.1 – Main chemical characteristics C5-FK

Chemical formula	$\text{CF}_3\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$ 1,1,1,3,4,4,4-heptafluoro-3-(trifluoromethyl)-2-butanone
CAS number ^a	756-12-7
REACH registration number	01-2120052367-56-0000
Molecular weight	266 g/mol
Decomposition temperature in quartz container	727 °C
^a The CAS number is assigned by the Chemical Abstracts Service who maintains a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.	

E.1.3 Physical properties

C5-FK is a liquid with a boiling point at 26,9 °C. C5-FK evaporates within minutes to hours (depending on temperature and amount) even at temperatures down to -25 °C. It mixes within a few hours with other gases by convection and diffusion, and once it has mixed it does not separate again. Only in the case of condensation by cooling the C5-FK mixture below the related temperature of the C5-FK vapour curve, stratification occurs.

Figure E.2 shows the vapour pressure curve of C5-FK.

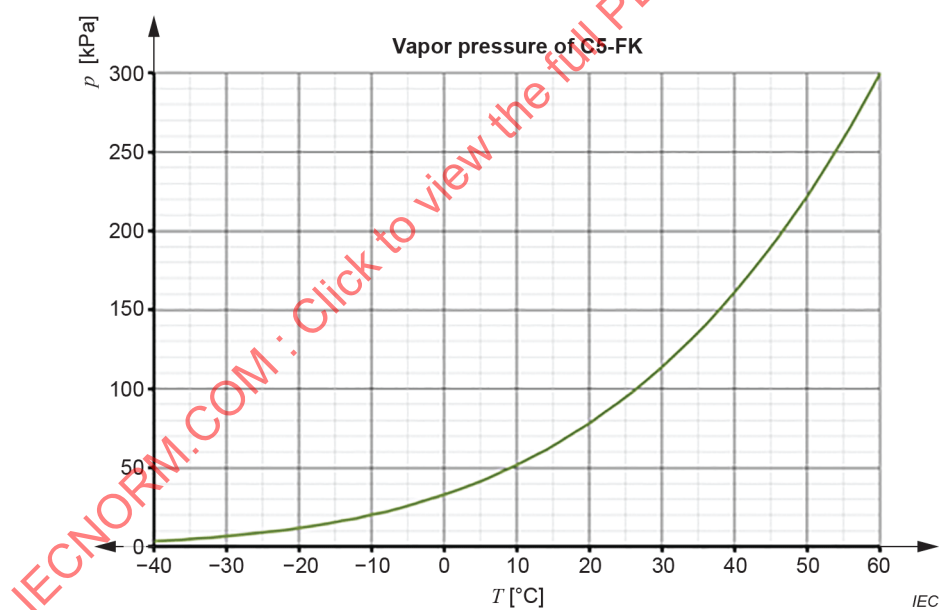
**Figure E.2 – Vapour pressure curve of C5-FK**

Table E.2 lists the main physical characteristics of C5-FK.

Table E.2 – Main physical characteristics of C5-FK

Chemical formula	$\text{CF}_3\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$
Boiling point at 101,3 kPa	26,9 °C
Freezing point at 101,3 kPa	-93 °C
Sublimation point at 101,3 kPa	-
Liquid density at boiling point (at 101,3 kPa)	1 540 kg/m ³
Gas density at 20 °C and 100 kPa	-
Vapour pressure at 20 °C	78,3 kPa
Critical temperature	150,3 °C
Critical pressure	2 350 kPa
Critical density	590 kg/m ³
Global warming potential (GWP ₁₀₀)	< 1
Ozone depletion potential (ODP)	0
Source: data sheet of gas manufacturer	

E.1.4 Insulating and switching behaviour

In electric power equipment C5-FK is used as a C5-FK mixture with O₂ and N₂ or with O₂ and CO₂. As these carrier gases have lower insulation capabilities than C5-FK, the dielectric performance of C5-FK mixtures is lower than that for pure C5-FK at the same total pressure. The insulation performance as well as the switching performance is influenced by each gas mixture component and concentration as well as by the total pressure of the C5-FK mixture. To avoid liquefaction of the C5-FK at any temperature in the operating temperature range of the electric power equipment, the available partial pressure of C5-FK in the mixture should be regarded.

Based on current knowledge the concentration of C5-FK between 1,5 % and 20 % in the C5-FK mixture could be used in electrical applications, at total pressures up to 1 500 kPa.

E.2 Safety and first aid

E.2.1 General

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

- switch off and isolate;
- secure against re-closing;
- verify that electric power equipment is de-energised;
- earth and short-circuit the electric power equipment;
- cover or fence-off nearby live parts.

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

Table E.3 lists the major issues to consider when working with electric power equipment containing C5-FK mixtures.

Table E.3 – Measures when working with electric power equipment containing C5-FK mixtures

Item	Work in the vicinity of electric power equipment (operation of electric power equipment, visual check, room-cleaning)	Filling, topping-up, recovery, evacuation of gas compartments	Opening of gas compartments, work on open gas compartments
Material safety data sheet / operational manuals	Applicable	Applicable	Applicable
Training	Applicable ^a	Applicable	Applicable
C5-FK mixture handling equipment	Not required	Applicable	Applicable
Cleaning / neutralising equipment	Not required	Not required	Applicable ^c
Personal protective equipment	Not required ^{b, d}	Applicable ^b	Applicable
^a General information should be specified according to type of work and installation, according to local safety regulations. ^b Local regulations can require safety shoes, helmet, and protective goggles to get in the vicinity of the switchgear. ^c Only applicable in case of arced C5-FK mixtures. ^d Unless an abnormal leakage is detected by the monitoring system of the electric power equipment.			

A notice stating that open fire, naked flames (for example matches), smoking and welding without special precautions are prohibited because C5-FK starts to decompose at temperatures above 500 °C should be displayed. Instructions for giving first-aid (see E.3.3) should be displayed while C5-FK or C5-FK mixture are being handled in any location.

When a gas compartment is opened after the electric power equipment has been in service, personnel should wear suitable protective clothing in order to avoid contact with fine solid by-products, which can be present. Particular attention should be paid to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which contain normally arced or heavily arced C5-FK mixtures should:

- use suitable tools and handling equipment;
- wear suitable protective clothing (see Table E.4 and E.2.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their handling equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components that have been in contact with solid by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues.

E.2.2 Protection of personnel

C5-FK or C5-FK mixtures should be handled by trained personnel only. The training content is described in detail in Clause E.4.

A specific training covering the recovery of used C5-FK mixtures from a gas compartment, is requested for personnel opening or entering the gas compartment. The operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed.

Prior to opening a gas compartment, the C5-FK mixture should be removed by evacuating the gas compartment to a pressure of $\leq 0,5$ kPa, followed by flushing with ambient air.

Eating, drinking and smoking are prohibited when accessing or opening a gas compartment.

Table E.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given when opening or entering the gas compartment.

Table E.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments

		Potential risk	Safety precaution	Safety equipment and tools
Non-arced C5-FK mixtures	Normally or heavily arced C5-FK mixtures	Fumes of cleaning substances and/or remaining C5-FK and/or remaining CO ₂	Ventilation Measurement of C5-FK concentration Measurement of CO ₂ concentration	Suction ventilator C5-FK concentration measuring device CO ₂ concentration measuring device
		Asphyxiation due to high remaining carrier gas concentration.	Ventilation Measurement of O ₂ concentration before entering, with the minimum value required for entering = 16 % (the measurement is not required when air is used as carrier gas) Wear personal protective equipment	Suction ventilator O ₂ concentration measuring device Self-contained breathing apparatus (respirator)
		Residual reactive gaseous by-products	Ventilation Wear personal protective equipment Measurement of concentration of residual reactive gaseous by-products	Suction ventilator Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask (filter)
		Solid by-products and adsorber materials	Removal of solid by-products and adsorber materials Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Vacuum cleaner Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask Protective goggles Environmental protection against rain or wind

Like any gas but O₂, a concentration greater than 19 % in the air is considered as a potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the O₂ concentration below 16 %, which is usually considered as the threshold for asphyxiation. Depending on the mixing ratio of the C5-FK and the selection and concentration of the carrier gases this can become relevant or not. In case of air as carrier gas and low concentration of C5-FK, the O₂ concentration might always be > 16 %. As soon as no O₂ is part of the carrier gases or the concentration of O₂ in the C5-FK mixture is below 16 %, it might be relevant. All relevant details should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If the gas mixture contains less than 16 % of O₂, it is recommended to measure the O₂ concentration in the gas compartment after ventilation and prior to accessing it. In addition to that, the O₂ concentration in the ambient environment can be checked when working in confined spaces.

C5-FK is not classified as a flammable gas (see 3.1.7). The flammability of C5-FK mixtures is increased if the O₂ concentration of the carrier gas is larger than 22 %.

When handling liquid C5-FK, any leak should be sealed to avoid accumulation of liquid at low areas (typically on the floor).

Due to evaporation near the liquid surface, the C5-FK concentration will be the highest close to the point in a room where it collects (typically on the floor). Mixing with air by convection and diffusion happens within minutes to hours (depending on temperature), and once C5-FK has mixed with air it does not separate again. Therefore, danger of asphyxiation is only possible within minutes to hours after leakage of large quantities of liquid C5-FK. Under normal operating conditions no liquid C5-FK is present in installed electric power equipment. Mixtures are used wherein the C5-FK is homogeneously mixed. Any leak in containers containing this mixture, will release the C5-FK mixture to the environment. This mixture will mix within minutes to hours with the ambient air by convection and diffusion, and once it has mixed it does not separate again. Therefore, C5-FK mixtures will not accumulate in low areas of buildings. In case air (O₂ and N₂) is used as carrier gas, there is no danger of asphyxiation to personnel. In case CO₂ is used as carrier gas, it should be considered that in areas below ground level, in poorly ventilated areas, or in unventilated areas (for example cable ducts, trenches, inspection pits, drainage systems) it is also an asphyxiant and has an effect on breathing beyond simply displacing O₂. Therefore, in the case of C5-FK mixtures with CO₂ (typically used in high-voltage circuit-breakers) asphyxiation is of concern.

NOTE More details on CO₂ are given in Annex D.

Rooms or areas containing concentrations of C5-FK and/or CO₂ above the TWA value should not be entered without adequate ventilation or personal protective equipment.

For details regarding toxicity, refer to E.3.2.

EHS information is based on the used tonnage band, which is a measure for the European REACH certification. REACH can require additional tests to complement EHS information based on other tonnage bands. In areas outside the European Union different registrations might be required. Please contact your electric power equipment manufacturer for further details.

E.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

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

Reusable safety equipment and tools should be cleaned, for example washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. Examples of neutralising solutions are given in IEC 60480:2019, Table 11.

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

E.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

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

All equipment and tools or measuring devices used during C5-FK mixture handling potentially contain gaseous or liquid C5-FK, C5-FK mixtures or carrier gases under high pressure. They should be handled with care.

E.2.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the electric power equipment itself. Safety shoes, helmet, and protective goggles can be required according to local regulations to get in the vicinity of the switchgear.

In case of sudden release of C5-FK mixtures due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to E.2.7.

The required protective equipment should be specified in the operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table E.4, workers engaged in handling C5-FK mixtures are provided with the following personal safety and protective equipment:

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166 [3]);
- breathing protective mask equipped with particle filter class FFP3: to be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas only;
- full / half face mask: for opening and accessing gas compartments for cleaning and removal of solid by-products and adsorber materials;
- single use protective overall, to be used when working on electric power equipment after internal arc failure: dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap, pocketless, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene), disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;
- self-contained breathing apparatus (respirator): when entering and/or working at indoor applications after an abnormal leakage or a sudden release due to internal arcing when the concentration of C5-FK or CO₂ or the amount of by-products are exceeding TWA values (see E.9.2.4.6), a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136 [7]);
- handheld O₂ meter for O₂ concentration measurement;
- handheld CO₂ meter for CO₂ concentration measurement;
- handheld CO meter for CO concentration measurement;
- handheld C5-FK meter for C5-FK concentration measurement;
- environmental protection for outdoor work locations: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open;
- vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping particles according to dust class H (high hazard). Dust classes are specified in Annex AA of IEC 60335-2-69:2021;
- suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment might be portable or permanently installed, depending on the size of the installation.

E.2.6 Facilities and services

Where gas compartments containing used C5-FK mixtures are opened (after recovery of the C5-FK mixture), adequate washing facilities for workers and a supply of water for preparing cleaning solutions should be available.

E.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of C5-FK mixtures

In case of sudden release of C5-FK mixtures due to internal arc or external fire the affected rooms should be left immediately. After ventilation of the rooms and checking of possible toxic by-products, only trained personnel (see E.4.2) are allowed to re-enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment.

Table E.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions and as well as the safety equipment and tools required.

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

The same rules apply to areas below the floor level at which the release occurred and which are poorly ventilated or unventilated (for example cable trenches, inspection pits, drainage systems). The required ventilation time depends on type and amount of released gas. If the risk of asphyxiation cannot be neglected, a temporarily forced ventilation should be installed.

A second person being in continuous visual and audible contact should be present, when entering areas which might have a low O₂ concentration and/or a high concentration of by-products.

Outdoor electric power equipment should apply standard measures for outdoor conditions (for example rain protection, wind protection).

E.2.8 First aid equipment and treatment

E.2.8.1 General

First aid equipment includes:

- normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution;
- calcium gluconate gel (HF antidote gel);
- means for contacting emergency services;
- guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see E.2.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

E.2.8.2 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation, all personnel should immediately leave the affected area and move into the fresh air. Contaminated clothing is removed and the affected part washed with cool running water. Apply calcium gluconate gel as a remedy after washing for fluoride acid on skin. Professional medical advice should be sought.

E.2.8.3 Irritation of the eyes

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

E.2.8.4 Breathing difficulty

In case of breathing difficulty, all personnel should immediately leave the affected area and move to the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance should be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration should be immediately commenced by trained and qualified personnel. Automated external defibrillator could be used according to local regulations.

E.3 Environmental impact

E.3.1 General

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

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

E.3.2 Ecotoxicology

E.3.2.1 Definition

Ecotoxicology has been defined as, "the branch of toxicology concerned with the study of toxic effects, caused by natural or synthetic pollutants, to the constituents of ecosystems, animal (including human), vegetable and microbial, in an integral context".

E.3.2.2 Toxicology

C5-FK has been characterized through a series of toxicological tests and the results recorded on the ECHA website. It has demonstrated low toxicity in acute inhalation studies. The LC50 (4-hour rat) is between 14 000 µl/l (ppmv) and 20 000 µl/l (ppmv). Testing has demonstrated that C5-FK is not a skin irritant, nor a dermal sensitizer nor an eye irritant.

C5-FK is not a bacterial mutagen (Ames assay). In addition, a significant amount of carcinogenic, mutagenic and reprotoxic data exist on C6-FK, a fluid that is chemically very similar to C5-FK. These data indicate that C6-FK is not a carcinogenic, mutagenic and reprotoxic hazard. Based on the experience of the gas manufacturer similar results are expected for C5-FK. See [21] [22].

Based on the results of the 28-day repeat dose inhalation study on rats, a TWA value of 225 µl/l (ppmv) has been established by the manufacturer. Precautions should be taken to control emissions into the work environment. References to the latest, actual toxicological data are documented in the safety data sheet (SDS), available from the gas manufacturer or on the ECHA website. Also refer to CIGRE Brochure 802 [1].

E.3.2.3 Environmental toxicology

Based on the available environmental toxicology test data the C5-FK substance has been classified as "Hazardous to the Aquatic Environment (Chronic), Category 3" (Aquatic Chronic 3) according to 'CLP Regulation' (Reg. (EC) No 1272/2008). Also here the classification has been done for the pure substance which is sold as a liquid. Impact on groundwater and references to the latest, actual toxicological data are documented in the safety data sheet (SDS), available from the gas manufacturer or on the ECHA website. Also refer to CIGRE Brochure 802 [1].

E.3.3 Ozone depletion

C5-FK mixtures and their by-products do not contain either chlorine or bromine and do not affect stratospheric ozone.

E.3.4 Global warming/climate change (greenhouse effect)

Fluoroketones, like C5-FK, have been shown to degrade in UV light, which is part of the natural sunlight in the higher atmosphere (in the lower atmosphere the intensity is significantly reduced). This photolysis process leads to atmospheric lifetimes for fluoroketones, on the order of a few days or weeks. The potential for C5-FK to impact the radiative balance in the atmosphere (i.e., climate change) is limited by this atmospheric lifetime. Using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013 calculation method, the global warming potential (100 yr. ITH) for C5-FK is <1. The GWP₁₀₀ of C5-FK mixtures, also taking the GWP₁₀₀ of the carrier gases (N₂, O₂, CO₂) into account, will be <1, even when using a high concentration of CO₂.

E.3.5 Environmental impact of by-products

Major failures causing release of heavily arced C5-FK mixtures are rare. The quantities released in such extreme cases are limited by the fact that standard designs of products are compartmented, limiting the fault to the place where it originates. The gas quantities concerned are subsequently small fractions of the total gas banked in an electric power equipment.

By-products can be converted into neutral products. Procedures for their treatment, handling and disposal ensure that they have a negligible impact on the environment.

E.3.6 Decomposition by UV-light in the upper atmosphere

C5-FK undergoes direct photolysis in the atmosphere with a half-life of 16 days. Photolysis products are trifluoroacetic acid (CF₃COOH, in a 1:1 ratio with C5-FK), hydrogen fluoride (HF, in a 7:1 ratio with C5-FK) and carbon dioxide (CO₂, in a 3:1 ratio with C5-FK) [23].

NOTE No natural photolysis happens at the installation level of the electric power equipment.

E.4 Training and certification

E.4.1 General

By the nature of the technology used for electric power equipment utilising C5-FK mixtures, operational safety and environmental aspects are intrinsically and tightly coupled together and therefore should be treated at the same time.

The following clauses are focused on training performed to assure that operational safety requirements and environmental aspects are met concerning electric power equipment utilising C5-FK mixtures.

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

Given the specific nature of the electric industry and electric power equipment, safety and continuity of service are very important.

Related to the tasks to be completed by trained personnel, the training can be adopted to cover different scopes, ranging from for example basic training to advanced training. The training should be related to a specific design (for example high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage switchgear, etc.) and different designs require different trainings to be certified.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the electric power equipment, operating instruction manuals of the handling equipment, safety data sheets (SDS), instrument datasheets, international standards, and CIGRE brochures. In some countries certification of natural persons carrying out gas handling procedures for specific gases is mandatory. Release of C5-FK or C5-FK mixtures into the environment during manufacturing, operation, maintenance, and at end-of-life of the electric power equipment should be avoided. Local regulations can exist on this respect.

E.4.2 Training

Workers handling C5-FK or C5-FK mixtures should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and handling equipment, and procedures to assure the continuity of service.

The different aspects to be covered by a training are the following:

- safety and first aid (see Clause E.2), in particular:
 - local regulations, emergency plans and instructions in case of for example asphyxiation, internal arc fault;
 - safety equipment required for personal protection;
 - safety equipment required for working on open gas compartments in relation to the task;
 - safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products;
- basic knowledge of relevant environmental issues;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of C5-FK mixtures;
- use of C5-FK mixtures in electric power equipment (insulation, switching);
- existence of local regulations and international standards in relation to the task;
- C5-FK mixtures handling, hazards and health characteristics;
- design of electric power equipment (properties and application/functionality);
- the operating instruction manuals given by the electric power equipment manufacturer in relation to the tasks;
- types of gas compartments filled with C5-FK mixtures;
- instruments and procedures for checking the quality of C5-FK mixtures;
- procedures of handling of C5-FK, O₂, CO₂, N₂, synthetic air and C5-FK mixtures:
 - topping-up of closed pressure systems;
 - air evacuation and C5-FK mixture filling and topping-up with C5-FK mixture;
 - recovery and reclaim of non-arc, normally and heavily arced C5-FK mixture; handling, neutralisation and removal of by-products, handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products;
- leak detection methods and repair techniques;
- storage and transportation of C5-FK, O₂, CO₂, N₂, synthetic air and C5-FK mixtures (see Clause E.5);
- handling equipment for C5-FK and C5-FK mixtures in relation to the tasks (see Clause E.6);
- procedures for entering the switchgear room in case of abnormal leakage and/or sudden release of C5-FK mixtures due to fire or internal arc fault (see E.2.7);

- transportation of the power electric equipment to the dismantling site, if applicable (see E.5.3);
- dismantling of electric power equipment and part sorting (see Clause 7);
- operation of tight drilling systems, if necessary (see 7.4).

E.4.3 Certification

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

The following records should be retained:

- the training content;
- the date on which the training was completed.

Restrict the tasks to be performed (for example C5-FK mixture topping-up or recovery for a certain design) to personnel who have been certified for the respective skill levels and sustain a high level of expertise.

E.5 Storage and transportation

E.5.1 General

Storage and transportation of C5-FK and C5-FK mixtures, either in containers or in electric power equipment should always be carried out in accordance with local and international regulations.

An empty C5-FK container can still contain a residual amount of C5-FK. It should be stored and transported in the same way as a filled container.

E.5.2 Storage of containers filled with C5-FK or C5-FK mixtures

E.5.2.1 Storage of containers filled with C5-FK

Containers filled with C5-FK typically contain a liquid and a gaseous phase, at a maximum pressure depending on the container temperature. Up to temperatures of 46 °C the pressure in the container is below 200 kPa (see Figure E.2).

Containers should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself. Containers should be clearly labelled to identify their contents. The storage containers should comply with local and international regulations and could be of the type used as for example a refrigerant recovery container with a dip tube. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table E.5 gives an overview of all possible storage methods on which a storage container can be based.

Table E.5 – Methods for storage of C5-FK

Method	Requirements	Features
Liquid	Pressure at room temperature (20 °C) < 100 kPa, up to 46 °C below 200 kPa	The cylinder should be equipped with a dip tube and a gas and a liquid valve. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations.

Container types and labelling required for storage and transportation of C5-FK are shown in Table E.6.

Table E.6 – Examples of container types required for storage / transportation of C5-FK

Gas / fluid	Characteristic	Container type
Technical grade C5-FK	Liquid	For example, a refrigerant recovery container with a dip tube Recommendation: Containers should be painted according to local regulations.

E.5.2.2 Storage of containers filled with C5-FK mixtures

When storing C5-FK mixtures, the mixing ratio, the partial pressure of C5-FK and the minimum storage temperature of the container define the maximum total pressure to which this C5-FK mixture can be compressed without partial liquefaction of the C5-FK.

Containers should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself. Containers should be clearly labelled to identify their contents, including mixing ratio and minimum storage temperature (before liquefaction of C5-FK).

Table E.7 gives an overview of all possible storage methods on which a storage container can be based.

Table E.7 – Methods for storage of C5-FK mixtures

Method	Requirements	Features
Gaseous	Typical pressures between 300 kPa and 1 500 kPa, depending on the mixing ratio, the C5-FK partial pressure and the minimum storage temperature.	As the quantity of the C5-FK mixture is limited due to the low pressure, this storage is not intended for storing large quantities. Main use might be topping-up of gas in case of a gas alarm to return to safe operating conditions.
Liquefied gas	Typical pressures between 1 000 kPa and 5 700 kPa, depending on mixing ratio, the C5-FK partial pressure and the heating temperature of the container.	At storage temperature the C5-FK in the C5-FK mixture is partly liquefied. Before taking the C5-FK mixture from the container and filling it in an electric power equipment, the gas container should be heated for a defined time to a defined temperature, to reach a homogeneous mixing ratio.
Liquefied gas	Typical pressures above 5 700 kPa at 20 °C and depending on the mixing ratio.	At storage temperature the C5-FK and the CO ₂ in the C5-FK mixture are partially liquid. Before taking the C5-FK mixture from the container and filling it in an electric power equipment, the gas container should be heated for a defined time to a defined temperature above the critical temperature of CO ₂ , to reach a homogeneous mixing ratio.

NOTE The pressures refer to a temperature of 20 °C. The vapour pressure of CO₂ at 20 °C is 5 730 kPa.

When samples of used C5-FK mixtures are stored for gas analysis off-site, the storage containers should comply with local and international regulations on pressurised containers. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table E.8 gives examples of container types required for storage and transportation of C5-FK mixtures. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table E.8 – Examples of container types required for storage / transportation of C5-FK mixtures

Fluid / gas	Characteristic	Container type
C5-FK mixtures	Liquefied gas	Suitable for a pressure of 7 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8].

E.5.3 Transportation of containers filled with C5-FK or C5-FK mixtures

E.5.3.1 Transportation of containers filled with C5-FK

International regulations for shipment of C5-FK containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of C5-FK are summarised in Table E.9.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

Table E.9 – International regulations for shipment of C5-FK

Fluid / gas	Characteristic	Class	Final classification	Transport document
Technical grade C5-FK	Liquid	not applicable	Not hazardous for transportation No UN number assigned	not applicable

E.5.3.2 Transportation of containers filled with C5-FK mixtures

International regulations for shipment of C5-FK mixtures containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of C5-FK mixtures are summarised in Table E.10.

The UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation for normally arced and/or heavily arced C5-FK mixtures can depend on the design and usage of the electric power equipment and should be defined in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer.

The classifications listed in Table E.10 are limited to C5-FK mixtures with C5-FK and O₂ concentrations not leading to an increased flammability. Details about maximum concentrations, maximum pressure and maximum temperature should be given in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

Table E.10 – International regulations for shipment of C5-FK mixtures

Fluid / gas	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade C5-FK mixture ^c and Non-arced C5-FK mixture ^c	Compressed gas	1A	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. 2.2	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. (fluoroketone and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Technical grade C5-FK mixture ^c and Non-arced C5-FK mixture ^c	Liquefied gas	2A	UN 1058 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 1058 LIQUEFIED GAS N.O.S. (fluoroketone and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Normally arced C5-FK mixture ^{c, d}	Liquefied gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (fluoroketone and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Heavily arced C5-FK mixture ^{c, e}	Liquefied toxic and corrosive gas ^f	2TC	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. 2.3 + 8	UN 3308 LIQUEFIED TOXIC AND CORROSIVE GAS N.O.S. (fluoroketone and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide with toxic and corrosive by-products) 2.3 + 8
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations. ^b Final classification, including correct UN code and hazards identification numbers (e.g. H280) are listed in the safety data sheet and/or in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^c C5-FK mixtures with C5-FK and O ₂ concentrations not leading to an increased flammability. ^d C5-FK mixtures that contain small amounts of by-products and have a LC50 value > 5 000 µl/l (ppmv). ^e C5-FK mixtures that contain large amounts of by-products, typically after experiencing an internal arc, a failure to interrupt or a last number of short-circuit breaking operations and have a LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). ^f According to UN regulations for transportation, a gas is classified "toxic" when its LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). N.O.S.: "not otherwise specified".				

E.5.4 Storage and transportation of electrical power equipment containing C5-FK mixtures

Electric power equipment filled with C5-FK mixtures should be stored and transported according to local and international regulations.

International regulations for shipment are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation.

According to ADR, RID and IAT transportation codes the filling pressure should not exceed 200 kPa (relative) at 20 °C.

E.5.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising C5-FK mixtures is responsible for the proper use, transportation and disposal of the electric power equipment and the C5-FK mixture.

E.6 Description of handling equipment

E.6.1 General

E.6.1.1 Overview

This subclause gives information about the handling equipment, which might be required for handling of C5-FK or C5-FK mixtures. Such handling equipment is required during development, testing, manufacturing, installation, service, repair and end-of-life treatment. Some of the handling equipment can also be used by the end-user of the electric power equipment.

The appropriate type and size of the handling equipment should be chosen according to the quantity of C5-FK and C5-FK mixture to be handled. Figure E.3 shows a basic functional scheme. The typical functions are as follows:

- evacuation of air from the gas compartment;
- preparation of C5-FK mixtures;
- filling of C5-FK mixtures in the gas compartment;
- recovery of C5-FK mixtures from the gas compartment;
- storage of C5-FK mixtures;
- removal of contaminants;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- container to container transfer.

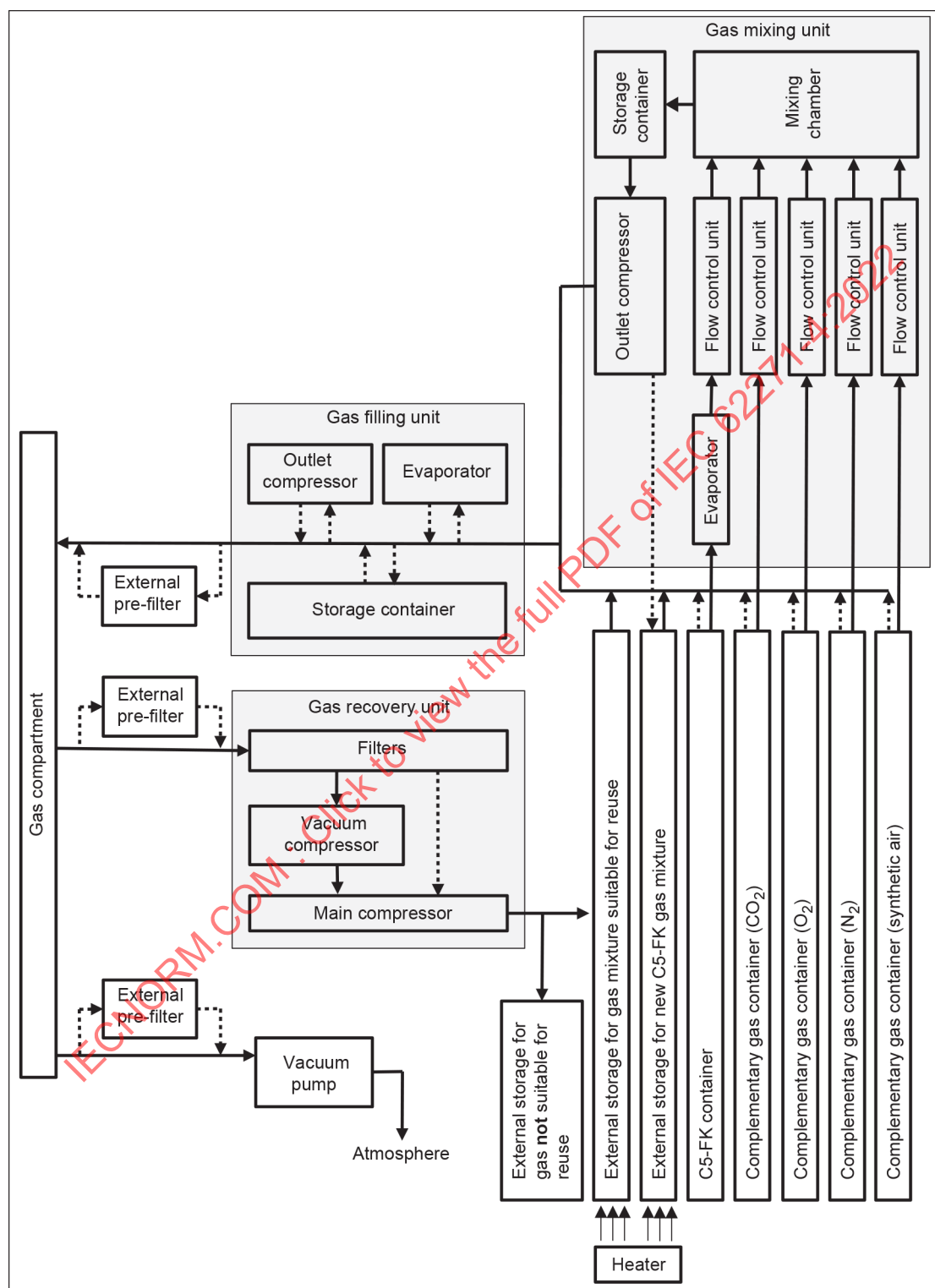
Not all the listed handling equipment might be available and/or required, depending on the design of the electric power equipment. It is more a theoretical overview on the possible technical solutions.

The following handling equipment will be described below:

- vacuum pump;
- main and vacuum compressor;
- gas mixing and filling unit;
- gas filling unit;
- gas recovery unit;
- used gas storage and transportation devices;
- gas measurement devices;
- gas leakage detectors;
- gas leakage tester;
- gas sampling cylinders;

- alarm system detectors.

Some of the above-listed handling equipment might be combined for specific tasks.



IEC

Figure E.3 – Schematic view of an example of a handling equipment for C5-FK mixture

E.6.1.2 Qualification of handling equipment

E.6.1.2.1 General

Before using any handling equipment, it should be ensured that the handling equipment can be used for the intended task (C5-FK or C5-FK mixture handling). This can be done by adequate tests at the handling equipment manufacturer itself or by the manufacturer of the electric power equipment that has proposed this handling equipment for the use with C5-FK or C5-FK mixtures.

Handling equipment for the same task but intended for another gas and not qualified for C5-FK mixtures, might be damaged, malfunction or give wrong readings and therefore might generate a risk to the operator or the handling equipment or the electric power equipment.

The qualification should cover the areas described in E.6.1.2.2 and E.6.1.2.3.

E.6.1.2.2 Prove that the handling equipment fulfils its function using C5-FK or C5-FK mixtures

This should be done by functional tests with C5-FK mixtures within the full gas concentration, pressure and temperature range for which the handling equipment will be used. Either the handling equipment has been especially designed for that use or it has been modified to operate with C5-FK mixture. In some cases, no modification might be required and standard handling equipment, originally designed for other gases, can be used, for example by calibration for the gas.

E.6.1.2.3 Test and verify that the handling equipment is compatible with C5-FK or C5-FK mixtures

All parts of the handling equipment in contact with C5-FK or C5-FK mixtures should be tested and certified by the manufacturer of the gas handling equipment to be compatible with C5-FK or C5-FK mixtures. It should be shown that the handling equipment is not damaged when it comes in contact with the gas or its by-products. For modified handling equipment it might be required, that materials in standard handling equipment are replaced for the use with C5-FK or C5-FK mixtures. In this case a clear differentiation between handling equipment variants that can be used with C5-FK or C5-FK mixtures and those that cannot be used should be done.

As the focus is on the impact of the gas on the handling equipment, care should be taken, that

- the technical functionality is not negatively influenced during the specified lifetime of the handling equipment or during the intervals between maintenance of the handling equipment;
- maintenance intervals are adjusted, if required.

Where applicable, flushing or cleaning procedures should be defined (for example to avoid long term contact with C5-FK mixtures or their by-products before the handling equipment is stored).

E.6.2 Filters

E.6.2.1 General

Filters are required to remove gaseous by-products, humidity and solid particles before storing C5-FK mixtures in a container, hence allowing for its reuse. Filters can be part of the handling equipment or external pre-filters. An external pre-filter might be required to remove particles, excessive levels of humidity and gaseous by-products, which are acidic compounds, and could damage the handling equipment or the gas storage container. The requirements of the external pre-filter are the same as those of the filters installed inside the handling equipment, but the pre-filtering capacity could be considerably higher.

Table E.11 shows typical filter types used as part of the handling equipment.

Table E.11 – Typical filter types

Filter type	Tasks	Major characteristics
Particle filter	Removes solid by-products and other particles.	Pore size lower than 1 µm.
Dry filter	Removes gaseous by-products and humidity.	Residual humidity lower than 100 µl/l (ppmv). Gaseous by-products retention ability. Particle retention ability.
Oil filter	Removes oil when required.	Special filter utilising active charcoal.

E.6.2.2 Filter types

E.6.2.2.1 Particle filter

To protect the handling equipment from damage, due to particles, it might be required to install particle filters. It is preferred that these filters are integral part of the handling equipment and are permanently installed on the inlet side. Source of particles might be for example metal particles from the production of the electric power equipment or generated during switching operations. Especially in heavily arced gas the generation of solid by-products might happen. Design, material and pore size of the filter should be defined by the handling equipment manufacturer. Special care should be taken on the selection of the material to avoid chemical reaction with C5-FK or adsorption of C5-FK.

E.6.2.2.2 Humidity and gaseous by-product filter (dry filter)

Appropriate filters can adsorb humidity and reactive gaseous by-products. Molecular sieves with a pore size smaller or equivalent to 0,5 nm (5 Å) can be used. Bigger pore size leads to thermodynamic exothermal reactions, resulting in severe filter overheating, as the C5-FK might be absorbed.

E.6.2.2.3 Combined filter

Instead of separate particle filters and humidity and gaseous by-products filters also filters, which combine both filtering principles, can be installed.

E.6.2.2.4 Oil filter

An oil trap containing activated charcoal should be inserted in the C5-FK mixtures cycle if an oil lubricated machine is used or if an oil insulated electric component is included in the electric power equipment utilising C5-FK mixtures. The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

E.6.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the gas compartment/container/sample cylinders from gases as air or other natural-origin gases which are permitted to be released to the atmosphere prior to filling with the C5-FK mixture.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 0,1 kPa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 0,01 kPa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 0,1 kPa (recommended value is lower than 0,01 kPa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended. Thermal vacuum sensors are dependent on the gas type and are not recommended.

A valve is required to shut off the connection between the gas compartment and the vacuum pump. The valve should close automatically after having turned off the vacuum pump to avoid oil diffusion into the gas compartment.

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

E.6.4 Main and vacuum compressors

When the C5-FK mixture pressure in the gas compartment is higher than the pressure in the storage container, it is quicker to allow direct gas expansion (for example for sampling). In all other cases, a compressor is required to recover the gas. As the pressure in the gas compartment can vary within a very wide range, a dual compressor system should be used:

- the main compressor, usually employing a piston type compressor, which operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas storage container;
- the vacuum compressor, connected in series when needed, operates between the pressure in the gas compartment and the pressure at the inlet of the main compressor. It is required to empty the gas compartment to residual pressures below 0,5 kPa.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry-running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination. State-of-the-art compressors can achieve 0,1 kPa pressure at the inlet.

E.6.5 Outlet compressor

When the pressure in the storage container is higher than the pressure in the gas compartment, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to fill in the gas. The outlet compressor, usually employing a piston type compressor, operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas compartment.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination.

E.6.6 External and internal gas storage containers

Pressure containers are available as external or internal C5-FK mixture storage containers. They are mobile, stationary or can be installed in the handling equipment. The maximum pressure of the C5-FK mixture storage container should be suitable for the final pressure of the compressor, also taking elevated temperatures into account. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

E.6.7 Evaporator and gas storage container heater

If C5-FK mixtures are stored in partially liquid form, heaters can be used to evaporate the contained liquid before taking C5-FK mixtures from the container. Care should be taken, that the mixture gets sufficient time to become homogenous, before any use.

In order to rapidly fill large volumes, the handling equipment should be designed to extract liquid that is then vaporized inside an evaporator. The evaporator is designed so that no liquid can reach the gas compartment or the internal storage container.

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

E.6.8 Gas piping and pipe junctions

Gas piping and pipe junctions should be designed to avoid leaks and corrosion. The design of both piping and junctions should take vibration into account so that periodical operations such as re-tightening of fittings are not required.

E.6.9 Control instruments

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

E.6.10 Safety valves

Safety valves are used in the high-pressure gas system for pressure relief, to avoid the opening of pressure relief devices of the electric power equipment or to avoid overfilling of the storage container for the safety of the operating personnel. Local safety regulations should be followed.

E.6.11 Flexible hose connections

The handling equipment and the gas storage container or the gas compartment are connected via flexible hose connections. Particular care should be exercised to avoid the presence of air or other compounds inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required. The cross-section and the length should be dimensioned in a way to have a good compromise between speed of operation and banked gas within the system. Hoses made of synthetic rubber have normally a limited lifetime and should be replaced accordingly.

E.6.12 Portable devices for gas measurement

E.6.12.1 General

Table E.12 gives a survey on gas measuring devices including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in the technical datasheet.

Table E.12 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
C5-FK measuring device	C5-FK concentration of the C5-FK mixture	0 % to 20 %	-10 °C to 40 °C	±0,1 %
O ₂ measuring device (optional)	O ₂ concentration of the C5-FK mixture	0 % to 25 %	-10 °C to 40 °C	±0,25 %
CO ₂ measuring device (optional)	CO ₂ concentration of the C5-FK mixture	0 % to 100 %	-10 °C to 40 °C	±2 %
CO measuring device	CO	0 µl/l (ppmv) to 500 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±10 µl/l (ppmv)
Pressure gauge	Pressure	0 kPa to 1 500 kPa (HV) 0 kPa to 200 kPa (MV)	-10 °C to 40 °C	±1 % of the full range
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Pressure values are conventionally reported at 20 °C. Either use a temperature compensated pressure gauge or recalculate the actual pressure measurement to a gas temperature of 20 °C.

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

- humidity concentration in the gas and/or dew point or frost point;
- C5-FK concentration and/or the partial pressure of C5-FK;
- O₂ concentration;
- CO₂ concentration;
- CO concentration.

Preferable handling equipment allows for the simultaneous measurement of all applicable parameters using a single device which is capable of pumping back C5-FK mixtures into the gas compartment. A pressure and temperature measurement are also contained in the handling equipment to calculate for example partial pressure based on concentration and total pressure measurement.

E.6.12.2 Frost / dew point meter

The humidity concentration can be measured with different measuring principles and measuring instruments. It should be proven by the manufacturer of the handling equipment that it can measure the humidity concentration or dew point / frost point in a C5-FK mixture. The electric power equipment manufacturer can recommend approved handling equipment.

The instrument measures the dew point / frost point of the gas, expressed in °C, and can convert it into concentration, for example in µl/l (ppmv), or vice versa, depending on the measurement principle.

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces, C5-FK and C5-FK by-products;
- low cross-sensitivity to C5-FK, carrier gases and C5-FK by-products;
- permeation resistant pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials;
- calibrated or capable of self-calibration;
- minimized gas loss of the handling equipment per measurement (integrated closed gas loop with for example small compressor for gas topping-up after measurement or waste gas cylinder or gas bag);
- less than 1 000 ml gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 15 min.

E.6.12.3 Gas concentration measuring devices – C5-FK concentration measuring devices

There are different physical principles available for C5-FK concentration measurement in C5-FK mixtures. These can be for example optical systems using the absorption of light by the C5-FK molecule.

The readout is the C5-FK concentration expressed in %.

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces, C5-FK and C5-FK by-products;
- calibrated or capable of self-calibration;
- low cross-sensitivity to humidity, carrier gases and C5-FK by-products;
- minimized gas loss of the handling equipment per measurement (integrated closed gas loop with for example small compressor for gas topping-up after measurement or waste gas cylinder or gas bag);
- less than 1 000 ml gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 15 min.

E.6.12.4 Analysers of gaseous by-products

During normal operation including switching operations (normally arced gas) the safety rules for C5-FK mixtures also cover the by-products in the expected concentration. As the concentrations are on a low level, sensitive analysers which combine gas-chromatography and mass-spectrometry (GC-MS) can give accurate values.

E.6.12.5 Portable gas detectors

For fluorinated gases different physical principles can be used for detection. Not all physical principles work for every gas or special adaptation is required. Before using a portable gas detector (sniffer), the handling equipment manufacturer should confirm that the handling equipment can be used for C5-FK mixtures and state its sensitivity.

As the instruments do not detect the complete C5-FK mixture, but only one component of it, the sensitivity is strongly related to the C5-FK concentration.

E.6.13 Gas leakage tester

For leakage testing at a sensitivity down to 1-digit $\mu\text{l/l}$ (ppmv) photoacoustic systems can be used with the adequate filter and calibration for C5-FK. The response time of about 15 s prevents the device from being used for on-site leak localisation and therefore the device is mainly used in the factory after production or during type tests.

E.6.14 Gas concentration alarm systems

Gas concentration alarm systems might be installed to monitor the C5-FK concentration in a room. Alarm systems require detectors with very high long-term stability. Single-zone infrared monitoring system for low level continuous monitoring of CFC, HCFC and HFC refrigerant gases used in most refrigeration systems have been successfully tested to work with C5-FK, when the required parameters have been entered. The handling equipment manufacturer can recommend which device can be used. Sensitivities down to 10 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) can be achieved.

Alarm systems incorporating C5-FK detectors are normally not required in typical areas, where electric power equipment using C5-FK mixtures are installed. Only in cases where C5-FK is stored as a liquid, or where C5-FK is handled, or where the area around the electric power equipment is very small and not ventilated, such handling equipment can be useful to indicate that the actual concentration of C5-FK is below the TWA value.

E.6.15 Gas sampling cylinders

Stainless steel cylinders without coating with a volume of 50 ml to 500 ml are recommended. Valves and caps should also be of stainless steel. The gas should be sampled directly from the gas compartment using suitable fittings. If the pressure in the gas compartment exceeds the maximum permitted pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge should be used.

Before taking a gas sample, the gas sampling cylinder should be evacuated. Any residual gas or air will lead to inaccurate gas analysis. When taking gas samples with gas sampling cylinders, care should be taken that no air contained in hoses or fittings or during the connection of the adapter to the valve is entering the sampling system. It might be required to evacuate the sampling cylinder a second time or to use the two cylinders approach of having one waste gas cylinder and one sample gas cylinder.

E.6.16 Gas mixing unit

In Figure E.3, top right, a gas mixing unit is shown. It is used to mix C5-FK with the different carrier gases O_2 , N_2 , CO_2 , according to a preselected gas ratio during filling or topping-up of an electric power equipment or an external storage container. It is also possible to use premixed carrier gases, such as synthetic air (see 3.5.5).

The flows of the evaporated C5-FK and the carrier gas(es) are controlled by flow control units to fill the storage container with the preselected mixture. The outlet pressure (i.e. the filling pressure in the gas compartment or in the storage container) is controlled by the outlet compressor.

Desirable characteristics are:

- adjustable C5-FK concentration and outlet pressure (i.e. filling pressure);
- gas mixing ratio (i.e. C5-FK concentration): 1,5 % to 20 %;
- maximum outlet pressure at 20 °C: up to 1 500 kPa (up to 200 kPa, if only MV (≤ 52 kV) is covered);
- C5-FK inlet in liquid state;
- possibility of mixing small as well as large quantities of gas.

E.6.17 Gas filling unit

In the center of Figure E.3 a gas filling unit is shown. It is used to sequentially fill the individual components of the C5-FK mixture into the gas compartment (see E.10.2.2), to mix the components during the filling process (see E.10.2.3) or to fill a premixed C5-FK mixture into the gas compartment (see E.10.2.4).

Due to the high boiling point of C5-FK the pre-mixed C5-FK mixture cannot be compressed to high pressures, as this will lead to partial liquefaction of the C5-FK. The gaseous fraction in the gas container will contain less C5-FK than the original mixture.

To avoid this, the maximum pressure can be calculated and defined based on the mixing ratio and the minimum storage temperature of the container.

It is also possible to increase this pressure, by heating the storage container. The handling equipment manufacturer should define how long and to which temperature a container should be heated before using gas from it to ensure evaporation and homogeneous mixing of the gas.

E.6.18 Gas recovery unit

In the center of Figure E.3 also a gas recovery unit is shown. Gas recovery devices normally consist of a set of components including a particle filter, dry filter, vacuum compressor, compressor and storage container for used C5-FK mixtures.

The gas recovery unit is intended to recover C5-FK mixtures from a gas compartment in case of maintenance, repair or end-of-life.

The re-use of used C5-FK mixtures is more complex due to the fact of partial liquefaction of compressed mixtures.

E.6.19 Used gas storage and transportation devices

Pressure containers or special storage containers for used C5-FK mixtures are available as gas storage containers. They are mobile or stationary. Only specially approved containers for storage and transportation of used C5-FK mixtures are allowed. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

When compressing a C5-FK mixture the contained C5-FK will start to liquefy at a specific pressure and temperature. This should be considered when choosing a compressor and the maximum pressure for the pressure container is defined.

E.7 Reclaiming procedures

The reclaiming process is possible and uses a system of compressors and cooling systems for controlled separation of C5-FK and the carrier gases. A further separation of the different carrier gases is very complex and is not economical. Contaminants and by-products can be filtered.

Such reclaimers might be useful for on-site maintenance of closed pressure systems, or in the factory, or for gas handling at the end-of-life of the electric power equipment.

E.8 By-products

E.8.1 General

This subclause describes general aspects on decomposition and characteristics of by-products. The quantities will depend on the gas composition, contaminants and energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer according to IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

E.8.2 Decomposition of C5-FK mixtures

E.8.2.1 General

C5-FK mixtures contain the C5-FK itself ($C_5F_{10}O$) and other gases as N_2 , O_2 or CO_2 . In combination with other materials used in the electric power equipment and/or with electric arcs, the C5-FK molecule can be decomposed.

The production of by-products can be categorized in three groups.

E.8.2.2 Decomposition of C5-FK mixtures in low current discharges

The decomposition of C5-FK mixtures in low energy arcs (for example during switching operations of disconnectors) is negligible and the concentrations of by-products resulting from partial discharges are low. Experiments have shown that the decomposition rate is very small with values below the detection level of standard analysing equipment.

E.8.2.3 Decomposition of C5-FK mixtures in an electric arc

During load current or fault current switching an electric arc reaching temperatures in the order of 10 000 °C is formed.

At temperatures above 500 °C, C5-FK begins to decompose into its constituent parts. During the dissociation process the C5-FK molecules are broken down into molecular fragments or into F, C and O atoms at about 3 000 °C.

The decomposition rate is related to the arc energy. The electric power equipment manufacturer should ensure that the consumption of C5-FK during the lifetime of electric power equipment due to arcing is limited and has no negative impact on the lifetime or performance of the electric power equipment.

Below a temperature of about 1 000 °C, the atoms combine or react with other substances, such as vaporised electrode metal. Unlike to SF₆ the C5-FK molecule does not re-combine. Gaseous and solid by-products can arise, including metal fluorides, of which the most common are CO, HF, CuF₂, AlF₃ and CF₄.

E.8.2.4 Decomposition of C5-FK mixtures due to an internal arc failure

Internal arc failures are also a type of high energy arc, but with different properties. Their duration is significant longer (up to 1 s) than a typical switching arc, and in most cases the gas compartment opens and the plasma can recombine outside the gas compartment in the ambient air, where, for example, the humidity in the air adds H₂O as another substance that can interact with the molecular and atomic fragments as they recombine. In addition, a significant amount of material (steel, copper, aluminium, plastic) is burnt or evaporated and can also influence the chemical reactions that take place. Not all gases, liquids or particles created during internal arc failures are related to the chemistry of the insulation gas. Some, for example, are oxides created by burning of metals or plastics. By-products containing F in the molecule are in most cases the result of decomposition of C5-FK.

The electric power equipment manufacturer should perform tests covering the three above-mentioned causes of decomposition to gain an overview of the main by-products and – in addition – possible toxic by-products.

For one exemplary electric power equipment design, the gaseous by-products after an internal arc failure, shown in Table E.13, have been detected. Other gaseous by-products might be generated if different electric power equipment designs are used.

Table E.13 – OELs and LC50 values for C5-FK mixtures by-products

Detected gas	Chemical formula	TWA	LC50 (4-hour rat)	LC50 (1-hour rat)
		[µl/l (ppmv)]	[µl/l (ppmv)]	[µl/l (ppmv)]
Carbonmonoxide	CO	35 ^a ... 50 ^b	1 807	3 760
Tetrafluoromethane	CF ₄	not established	not established	not established
Hexafluoroethane	C ₂ F ₆	1 000	> 200 000	-
Hydrogenfluoride	HF	0,5 ... 3,0	-	1 276
Octafluoropropane (Perfluoropropane)	C ₃ F ₈	not established	not established	not established
Decafluorobutane (Perfluorobutane)	C ₄ F ₁₀	not established	not established	not established
Heptafluoropropane (HFC-227ea)	C ₃ HF ₇	1 000	> 788 698	-
Hexafluoropropene	C ₃ F ₆	0,1	11 200 mg/m ³	-
NOTE Values are according to ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), OSHA (Occupational Safety and Health Administration) or AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals).				
^a According to USA NIOSH.				
^b OSHA PEL (Permissible Exposure Limit) value.				

E.8.2.5 Chemical reaction of C5-FK mixtures with material

When C5-FK or C5-FK mixtures are in contact with materials used in electric power equipment, chemical reactions might occur. This depends to a high degree on the compatibility level of the materials used. The electric power equipment manufacturer is responsible that the compatibility level of the selected materials limits the decomposition of C5-FK to a level that avoids any negative impact on the materials. As this can only be done for new electric power equipment, the filling of SF₆ switchgear with C5-FK mixtures is not permitted.

E.8.3 Corrosion behaviour of C5-FK mixtures and their by-products

In normal operation significant amounts of by-products do not occur. At least some of the decomposition products might be adsorbed by the adsorbent materials (e.g. installed molecular sieve).

Only in case of heavily arced C5-FK mixtures containing a significant concentration of corrosive by-products, the metals commonly used, such as aluminium, steel, copper and brass, might be attacked leading to corrosion. Corrosion can be significantly reduced by minimization of humidity concentration, by using suitable materials and appropriate adsorbents.

N₂ is an inert gas. Therefore, there is no possibility that corrosion will be caused directly by the N₂ itself.

The impact of O₂ in the presence of water on the corrosion behaviour in electric power equipment is well known and considered in relevant standards like IEC 62271-1:2017 or IEC TR 60943 [15]. However, the primary and secondary by-products, in presence of water, can form corrosive nitrous or nitric acids as well as ozone which can lead to damage of some of the material used inside the electric power equipment.

Also, pure CO₂ is non-corrosive, but together with water it can form carbonic acid which can be corrosive. However, the lack of stability of H₂CO₃ will not seriously affect the electric power equipment. Nevertheless, electrical power equipment equipped with an appropriate desiccant will avoid any risk of corrosion.

Some materials such as polymeric materials and the like are more vulnerable to damage by ozone attack. However, the impact of ozone on material properties is very much depending on the specific material utilized in electric power equipment.

It is important that the design and the operating instruction manual of the electric power equipment takes the corrosive properties of the O₂ and the by-products into account.

E.8.4 Measures for the removal of by-products

Humidity and by-products inside the electric power equipment in service can be reduced to acceptable levels by adsorption. Materials such as alumina, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb most gaseous by-products very effectively, and at the same time ensure that the dew point / frost point stays low.

Disposal of by-products removed from the electric power equipment is straightforward. The acid components (for example hydrogen fluoride) are degraded by means of alkaline compounds.

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

E.8.5 Physiological characteristics of by-products

By-products can cause irritation of the skin, eyes and mucous membranes, such as in the respiratory tract, and in high concentrations can cause pulmonary oedema, given sufficient time of exposure. During normal operation no high concentrations of by-products are reached, and the number of by-products is limited. In heavily arced gas, e.g. due to an internal arc, the number of by-products, their toxicity and concentration is different and significantly higher, also related to involved burnt or evaporated material. According to normal safety rules areas which are exposed to heavily arced gas should be evacuated immediately (see E.9.2.4.5).

Where carbon monoxide CO is produced its detection is essential. CO is odourless and toxic by inhalation. It causes headaches, nausea, dizziness, unconsciousness and sometimes death. Prolonged or repeated inhalation can cause damage to the heart.

E.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products

E.9.1 General

This subclause suggests procedures for the evaluation of the risks to health due to C5-FK mixtures and its gaseous by-products released into the local atmosphere by normal or abnormal leakage and in the event of a sudden release due to an internal arc fault or external fire.

During normal service C5-FK mixtures remain inside the electric power equipment, and the gaseous by-products formed are present at low concentrations and are partly neutralized by molecular sieves. C5-FK mixtures and their gaseous by-products can become present in the atmosphere because of leakage or if a gas compartment fails to contain the gas, for example as the result of an internal arc fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal arc fault situations leading to a sudden release of C5-FK mixtures, when evaluating the health risk.

In case of a leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to C5-FK mixtures and their gaseous by-products. The concentrations of these gases in the air should remain below their TWA values to present no threat to unprotected personnel during a normal working period of, for example, 8 h.

In case of a sudden release of C5-FK mixtures and their gaseous by-products due to an internal arc fault, the emergency procedure required by the local regulation can result in short-term exposure. By-product concentrations of higher levels would be tolerable if the exposure time is considerably reduced. In this case all possible sources of toxic emissions should be taken into account, and this requires detailed knowledge of all of the by-products formed. A full analysis should consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to C5-FK mixtures and their gaseous by-products.

The following subclauses give example calculations for evaluating the risks associated with the presence of by-products in terms of quantity and toxicity due to normal or abnormal leakage into the atmosphere. The quantities will depend on the gas composition, the contaminants and the arc energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

E.9.2 Formation of by-products and health effects

E.9.2.1 Formation of by-products during arcing

As described in detail in E.8 there are different ways in which by-products can be produced. In real electric power equipment, most of these processes happen in parallel, depending on the design and operation of the electric power equipment. For practical reasons the worst-case scenario should consider all produced by-products, independent of the quantity. This might lead to the situation that in some cases, some of the by-products are not produced, but a differentiation between the cases is much too complex.

By-products identified up to now are listed in Table E.13.

E.9.2.2 Effects of gas components and by-products on health

E.9.2.2.1 General

If arced C5-FK mixtures are exhausted into the workplace, the potential health risk will depend on the concentration of each gas component and by-product in the air, and hence on the volume of the room containing the electric power equipment. Toxicity estimations should take into account the concentration of each gas component and by-product in relation to the permissible concentration for the appropriate exposure time. The equation below should be adopted to calculate the total risk associated with the gas components and by-products (see E.9.2.4 for example calculations, which should be done for every gas component and by-product occurring).

$$Risk_{\text{tot}} = \sum_i \frac{\text{concentration (by-products)}_i}{\text{threshold (by-products)}_i} \leq 1$$

In principle there are four main cases, when contact with C5-FK mixtures including their by-products can happen:

- **normal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment within the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **abnormal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment above the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **maintenance:** entering gas compartments after recovery of the C5-FK mixture for maintenance, repair or end-of-life treatment;
- **failure:** opening of a gas compartment due to an internal arc or an external fire.

The main difference is the concentration of C5-FK and by-products in the switchgear room. In case of an external fire or an internal arc failure additional harmful substances might also be generated. These additional substances are not covered by this analysis, as they depend not only on the insulation gas, but also on the other materials used and on their behaviour in case of fire or high energy arcs.

NOTE Depending on the room size the leaked gases might temporarily not be homogeneously distributed in the switchgear room and locally higher concentrations might occur.

E.9.2.2.2 Health effects of arced C5-FK mixtures

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

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

- there is a synergetic effect between components which involves an increase of effects on health.

The total health risk to personnel due to arced C5-FK mixtures depends on the concentrations of each gas component and by-product generated. The quantity of by-products largely depends on the total amount of energy converted in the gas. Only in heavily arced C5-FK mixtures the concentration of by-products are expected to reach a level where precautions should be taken.

E.9.2.2.3 Exposure duration and dilution in air

There are two key elements essential to any evaluation of health risk due to exposure to toxic substances:

- concentration of the substance in the surrounding volume;
- time duration of the exposure.

When a leakage situation is calculated, the TWA value should be used. An example of a TWA calculation is given in 3.1.28.

Exposure to measurable concentrations of gas components or by-products is not expected during normal operation of electric power equipment. Airborne concentrations of gas components or by-products are typically well below the TWA value for those substances.

In the event of a sudden release, such as the opening of a pressure relief device, e.g. because of an internal arc fault, personnel should immediately leave the switchgear room, resulting in short-term exposure to measurable concentrations of by-products. By leaving the room it can be avoided that personnel could potentially be exposed to concentrations of gas components or by-products above their C values, above their STEL values or above five times their TWA values.

Some OELs and LC50 values are given in Table E.13. A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

E.9.2.3 Quantitative estimation of gaseous by-products

The production rate of gaseous by-products formed during an electrical arc is generally referred to the energy in Joule dissipated in the gas. Experimental results are generally quoted in mol/J.

Tests should be performed to identify the production rates under different operating conditions and such, mathematical models can be developed for quantification. The following factors should be taken into account:

- chemical reaction with materials in contact with the gas (material incompatibilities);
- decomposition of the gas by electric arcs upon switching operations or by partial discharge.

Quantitative estimations should be done under worst case conditions, as after several switching operations in short time, and assuming, that the by-products are not adsorbed. In such a case the by-products will leak into the switchgear room with a leakage rate similar to the leakage rate of the original gas. The concentration of the by-products in the switchgear room can then be calculated by taking the same ratio as in the gas compartment into account.

Gas concentration measurements performed during tests on MV electric power equipment could demonstrate, that the total decomposition of C5-FK over the lifetime of the MV electric power equipment is kept at a low level of < 2 % of the total C5-FK concentration used in the mixture. The main by-product, which has been identified during the gas analysis, was heptafluoropropane (C_3HF_7). C_3HF_7 is classified as non-toxic and no TWA value is defined. Other by-products (see Table E.13) were found at levels below 100 µl/l (ppmv).

E.9.2.4 Procedures for health risk evaluation

E.9.2.4.1 General

The procedures for the evaluation of the potential effects on health of C5-FK mixtures and their gaseous by-products in normally or heavily arced C5-FK mixtures are based on the following assumptions:

- the switchgear room is completely closed;
- the gas emitted uniformly mixes with the air in the switchgear room in a short time with respect to the working day or exposure duration.

The evaluation of possible concentrations of by-products should be done by the electric power equipment manufacturer, taking into account worst case scenarios, as type tests of switches and end-of-life concentration (for HV gas circuit-breakers also conditions related to defined service intervals) and the results shared with the end-user. Using worst case conditions, the end user is always on the safe side. Actual figures can only be given by adequate gas sample analysis.

E.9.2.4.2 Normal leakage

In IEC 62271-1:2017, 6.16.1, the permissible leakage rate for gases used in switchgear are given. Often, smaller leakage rates are stated by the manufacturer of the electric power equipment and are verified during type tests. These tests cover all three aspects of leakage:

- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of static connections;
- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of dynamic connections, where gas is leaking during operation of translating or rotating shafts;
- permeation of gas through elastomer (for example seal) or thermoplastic material.

The permissible leakage rate is valid at an ambient temperature of 20 °C. For higher temperatures the permitted temporary leakage rate can be up to three times (see IEC 62271-1:2017, Table 15). This is mainly driven by the strong temperature dependence of gas permeation. Also, for temperatures below 0 °C the permitted temporary leakage rate can be up to three or six times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15), which is mainly a result of the reduced flexibility of seals in dynamic connections.

To verify that the electric power equipment is free from manufacturing defects resulting in higher leakage rates, a routine tightness test is state of the art. However, this test typically only detects gas leakage between interfaces, due to its short duration (permeation effect can take weeks before becoming detectable). Routine tightness tests are sufficient to detect problems in manufacturing (where leaks at interfaces and not excessive permeation are the dominant cause).

The quantity of the leaked gas and its by-products can be calculated by knowing the leakage rate, the gas compartment volume, the total gas pressure and the time. The ventilation of the switchgear room plays an important role. Only at very low ventilation speeds or if there is no ventilation at all, the leaked gas and its by-products will accumulate in the switchgear room.

The permeation of the different components of a gas mixture can be different and depends on the specific permeation coefficient of the gas, which is related to the material and to the partial pressure difference of the gas components inside and outside of the gas compartment.

As permeation is a more or less constant effect over time and distributed on many locations of the gas compartment, a homogeneous mixing of the gas components within the switchgear room can be assumed.

Table E.14 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A MV switchgear is chosen, where a C5-FK mixture with a C5-FK concentration of 13,6 % is used.	
V_{eq}	Total gas volume of all gas compartments
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
F_{rel}	Permissible relative leakage rate
t	Time to ventilate the room
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$Q = V_{room} / t$	Room ventilation rate
$R_{total} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Total absolute leakage rate
$R = R_{total} \times x$	Absolute leakage rate of gas component or by-product
$y = R / Q$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table E.14 – Example calculation of a normal leakage

Gas component or by-product		C5-FK	C ₃ F ₆
V_{eq}	[m ³]	5	5
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	130	130
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	136 000	15
F_{rel}	[%/year]	1	1
t	[year]	0,005	0,005
Q	[m ³ /year]	20 000	20 000
R_{total}	[m ³ /year]	0,065	0,065
R	[m ³ /year]	0,008 84	0,000 000 975
y	[µl/l (ppmv)]	0,442	0,000 048 8
TWA	[µl/l (ppmv)]	225	0,1
S		0,001 96	0,000 488
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

E.9.2.4.3 Abnormal leakage

Defects are the exception but cannot be entirely excluded. The main type of defect in this context is leakage due to defects in components that are normally gastight. This can be due to a damaged seal or a cracked bushing. These defects can lead to increased leakage rates; in the worst case, the overpressure can decrease to zero within weeks, days or even minutes. In this case, the amount of gas that leaks into the ambient air depends on the overpressure. As modern gas-insulated metal-enclosed switchgear are separated into several gastight gas compartments without gas connections, the amount of gas per gas compartment is limited. In most cases, this type of defect only affects one or two gas compartments.

Also, human error, such as drilling a hole in a gas compartment, accidentally opening a cover, or incorrect operation of a valve can lead to a gas loss and a reduction of the pressure in the gas compartment to ambient pressure.

This effect is a short-term effect and is concentrated at a defined location. The most important risk is of someone being present at this location at the time of the failure. In this case, the local concentration of gas components and by-products will be temporarily higher, but they will also dilute within a short time period within the switchgear room, finally yielding a homogeneous mixture. Simulations have shown that this will take between a few minutes to a few hours.

Electric power equipment, which is affected by an abnormal leakage, leading to a reduction of the pressure of the insulating gas to ambient pressure, should be shut down and earthed as soon as possible. This is to avoid unexpected flashover to earth inside the gas compartment which could generate an internal arc.

Table E.15 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A MV switchgear is chosen, where a C5-FK mixture with a C5-FK concentration of 13,6 % is used.	
This example is a worst case calculation, where all the overpressure inside the largest gas compartment of the electric power equipment is lost into the room within a very short time, hence in a time which is much shorter than the time to ventilate the room, and therefore the calculation does not take the time to ventilate the room into account.	
In the case where the leakage rate is abnormal, but still in a measurable range of up to a few percent per day, the ventilation should be taken into account, and a similar calculation as shown in E.9.2.4.2 can be done.	
V_{comp}	Total gas volume of largest gas compartment
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Total leakage volume
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Leakage-volume of gas component or by-product
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table E.15 – Example calculation of an abnormal leakage

Gas component or by-product		C5-FK	C ₃ F ₆
V_{comp}	[m ³]	1	1
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	130	130
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	136 000	15
V_{tot}	[m ³]	0,3	0,3
V_{leak}	[m ³]	0,040 8	0,000 004 50
y	[µl/l (ppmv)]	408	0,045
TWA	[µl/l (ppmv)]	225	0,1
S		1,81	0,450
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

E.9.2.4.4 Maintenance, service and repair within gas compartments

In case maintenance, service or repair should be performed on the electric power equipment containing C5-FK mixtures, the gas can contain gaseous by-products. Prior to opening of the gas compartments, the C5-FK mixture should be recovered, and the gas compartment flushed with ambient air. When opening the gas compartment, small concentrations of C5-FK and its by-products remain inside. The concentration depends on the pressure level that has been reached during recovery and on the concentration of the C5-FK and the by-products in the C5-FK mixture that have been recovered.

Table E.16 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate remaining concentrations of gas components or by-products in the gas compartment after gas recovery. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:

A switchgear is chosen, where a C5-FK mixture with a C5-FK concentration of 13,6 % is used. After the complete recovery of the gas, down to the residual pressure p_{res} , by using a recovery unit as described in E.6.18, the gas compartment is flooded with ambient air and the concentration of the remaining gas components or by-products inside the gas compartment are calculated.

p_{res}	Residual pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product before recovery
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Remaining concentration of gas component or by-product within gas compartment after recovery
$S = c / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table E.16 – Example calculation for maintenance

Gas component or by-product		C5-FK	C ₃ F ₆
p_{res}	[kPa]	0,5	0,5
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	136 000	15
c	[µl/l (ppmv)]	680	0,075
TWA	[µl/l (ppmv)]	225	0,1
S		3,02	0,75
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $S > 1$: the gas compartment should be cleaned from possible solid by-products, where applicable, and sufficiently ventilated, before approaching it without full protection. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

E.9.2.4.5 Internal arc failure and/or external fire

The worst-case failure scenario that can occur in electric power equipment is an internal arc failure, which is caused by a defect or an operator error and results in an arc between the phases and/or between phase and ground that burns until the arc energy is interrupted by a circuit-breaker. Depending on the network, the released energy can be very high, which leads to a massive pressure increase inside the gas compartment. To avoid the uncontrolled cracking of the gas compartment, pressure relief devices open after a few milliseconds and the plasma produced by the internal arc is guided to the outside in a controlled way. In many cases pressure relief ducts are used to guide the plasma to areas where no direct contact with the operator can occur or even to the outside of the building. An internal arc event is typically limited to a single gas compartment. The entire amount of gas in the affected gas compartment is released. Due to the high temperature of the electric arc (10 000 °C to 20 000 °C), the gas molecules are decomposed, forming a plasma. As it cools down, the plasma created from the gas, evaporated metals, burnt insulation material, ambient air and humidity recombines and new molecules are formed.

External fire is a major failure that can also occur; it is normally not caused by the switchgear itself. The effect depends very much on whether or not the switchgear is energized. If not, the effect is similar to the case described in E.9.2.4.3, but might affect more than one gas compartment. In addition, the temperature rise caused by the external fire might lead to decomposition of the released gas. Due to heating of the gas by the high temperature of the fire, it is also possible that pressure relief devices open and release the contained gas. When the switchgear is energized, the opening of a gas compartment due to thermal overpressure caused by the heat of the fire will lead in a second phase to an internal arc. The effects of the fire and of the internal arc are then superimposed.

Regardless of whether or not the switchgear is energized, the quantity of released gas and the decomposition rate is highest in this scenario. In addition, the pollution of the switchgear room might be dominated by the by-products of burning plastics or evaporated and oxidised metals. Carbon monoxide and carbon dioxide will be present in high concentrations. These additional contaminants are independent of the insulation gas used. In an external fire also materials are burning which are normally not affected by internal arc failures. These can be the secondary equipment including wiring and protection and control equipment and electronics. The used materials might create harmful by-products when burnt, which are independent of the type of switchgear and insulation gas.

Unlike in the case of the other scenarios, in the case of an internal arc or a fire, it is strongly recommended to leave the area immediately and not to enter it without personal protection before the area has been sufficiently ventilated.

E.9.2.4.6 TWA values for gas components and by-products

The potential effect on health can be best estimated when looking at the TWA values of the gas components and the by-products and their related concentrations in the room or the area inside the room where personnel is located during the different scenarios described from E.9.2.4.2 to E.9.2.4.5.

TWA values of gas components are listed in Table E.17. TWA values of by-products are listed in Table E.13.

Table E.17 – TWA values of gas components

Gas component	Chemical formula	TWA [$\mu\text{l/l}$ (ppmv)]
C5-FK	$\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$	225
Carbondioxide	CO_2	5 000

A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

E.9.2.5 Conclusion

The above examples of calculations demonstrate that normal leakage of electric power equipment using C5-FK mixtures cause no health risk due to exposure to by-products and to pure C5-FK or the carrier gases. The by-products, formed by arcing inside the electric power equipment, reach negligible concentrations in the workplace.

In the case of abnormal leakage situations, maintenance, service and repair, which are limited to single compartments, and if concentrations of by-products or pure C5-FK or carrier gases slightly above the TWA-value occur, adequate actions should be taken (e.g. additional ventilation, lower residual pressures, gas dilution, personal protection, etc.).

However, if an internal fault leads to a sudden release of heavily arced C5-FK mixtures, significant concentrations of by-products or pure C5-FK or carrier gases can occur in a switchgear room and it is strongly recommended to leave the switchgear room immediately. Basic safety procedures including evacuation rules are designed to ensure that personnel are exposed to exhausted materials for a time as short as possible. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure that the concentration levels can be reduced within minutes. Re-entering the switchgear room without protection is only possible when the concentration of the gas and the by-products has fallen below their TWA value.

For outdoor installations and whatever type of leakage or release, the volume of air into which the heavily arced C5-FK mixture leaks is large and prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion.

The safety procedures need to be adapted for each individual installation, taking all aspects mentioned above into account.

E.10 Handling of C5-FK mixtures

E.10.1 General

The scope of this clause is to address the particularities for handling of C5-FK mixtures during installation, commissioning, after repair or overhaul on site of electric power equipment.

C5-FK mixtures are used in electric power equipment for different voltage ranges and temperature ranges. Therefore, different mixing ratios, carrier gases and total pressures are used. The C5-FK concentration is typically between 1,5 % and 20 %.

The mixing ratio should be kept within the tolerances given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer in order to guarantee the insulation and/or switching properties. See CIGRE Brochure 802 [1].

E.10.2 Filling gas compartments with C5-FK mixtures

E.10.2.1 General

Basically, three different procedures can be used for filling.

E.10.2.2 Sequential filling

The sequential filling procedure of a gas compartment with a C5-FK mixture is the following.

- Use the procedure as described in 4.2 to fill the gas compartment until the partial C5-FK filling pressure for insulation and/or switching is reached. Due to the low vapour pressure, C5-FK should be filled in first. Use a calibrated gauge for accurate measuring.
- Connect the carrier gas container and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.

NOTE 1 Unless otherwise specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual, the vacuum duration can be prolonged in order to better remove humidity, when for example the ambient temperature is freezing.

NOTE 2 In case of more than one carrier gas, topping-up to the related partial filling pressure for insulation and/or switching added to the total pressure of the already contained gases is repeated for all gases.

NOTE 3 Depending on the compartment design and dimension, temperature, filling pressure and mixing ratio, it can take significant time for homogenisation of the mixture. This is considered before energizing.

E.10.2.3 Filling with a mixing device

As a second option and to reduce the probability of accidental mistakes, an automated gas mixing device can be used (see E.6.16).

E.10.2.4 Filling a premixed C5-FK mixture

As a third option, having a lower probability of accidental mistakes than the sequential filling method, premixed gases can be used (see E.6.17).

NOTE 1 If the mixture is partly liquefied, pre-heating of the container and adequate time for homogenisation are considered.

NOTE 2 The C5-FK concentration and the concentration of the carrier gas(es) according to the electric power equipment manufacturer documentation are used for the preparation of the premixed gas.

NOTE 3 Premixed gases can be obtained from the electric power equipment manufacturer.

E.10.3 Topping-up gas compartments with C5-FK mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching

Topping-up procedures should be defined in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If not otherwise specified, the following procedure is recommended:

- Check if the mixing ratio of the gas in the electric power equipment is within the specifications given by the manufacturer,
- Topping-up according to 4.3 by using a gas mixing and filling device or a C5-FK mixture having the specified mixing ratio.

NOTE Premixed gases can be obtained from the electric power equipment manufacturer.

In case the mixing ratio of the gas in the electric power equipment is not within the specifications given by the manufacturer, either the C5-FK mixture should be replaced by a new C5-FK mixture or the mixture should be rectified according E.10.6.

E.10.4 Checking the quality of C5-FK mixtures

E.10.4.1 General

4.2 is applicable.

During quality checking the electric power equipment should be inside the specified temperature range for operation given by the electric power equipment manufacturer to avoid partial liquefaction of the C5-FK, which would lead to wrong results in measuring the C5-FK concentration.

E.10.4.2 Long term variation of the composition of C5-FK mixtures

The composition of a C5-FK mixture in a gas compartment might vary slightly over time due to the combination of the following causes:

- different permeation rates of C5-FK and the carrier gas(es);
- different decomposition rates of C5-FK and the carrier gas(es) due to chemical reaction, for example with materials;
- different decomposition rates of C5-FK and the carrier gas(es) due to electric arcs.

The manufacturer of the electric power equipment should take care that the variation of the composition is inside the specification of the composition for the entire lifetime of the electric power equipment or in case scheduled maintenance of the electric power equipment is required for the entire time between two overhauls.

E.10.4.3 Tolerance on the composition of C5-FK mixtures

The tolerance on the composition of a C5-FK mixture should be specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual.

E.10.5 Recovery and reclaim of C5-FK mixtures

The recovery of C5-FK mixtures is using handling equipment very similar to the ones known from SF₆ recovery. The manufacturer of such handling equipment can give advice about qualified handling equipment. The main difference is the fact, that at a specific pressure the C5-FK part of the C5-FK mixture starts to liquefy. As the carrier gases will not liquefy, the mixing ratio in the gaseous phase inside the storage container is different to the mixing ratio in the electric power equipment. This has an impact on the maximum permitted pressure for the recovery and reclaiming system (compressor and storage container). The values depend on the mixing ratio of the original C5-FK mixture and can be given by the electric power equipment manufacturer.

Normally arced C5-FK mixtures might be re-used, when the gas analysis has shown, that the C5-FK mixture is according the specification of the manufacturer of the electric power equipment. Care should be taken that the mixing ratio is correct, especially when the C5-FK has been liquefied. Evaporation and homogenisation prior to filling should be guaranteed.

The reclaiming process of normally arced C5-FK-mixtures, which no longer meet the requirements of the manufacturer of the electric power equipment, is more complex compared to SF₆ reclaiming. In a first step the C5-FK should be separated in liquid form by using compressors and cooling systems. In a second step the quality of the C5-FK should be measured. Additional steps of reclaiming might be required to reach the purity needed for the reuse of the C5-FK. In a third step the remaining carrier gases should be filtered to remove by-products and can then be released into the ambient air, as they are natural-origin gases.

Heavily arced C5-FK mixtures are typically disposed by specialised companies and new C5-FK mixtures are used to refill the electric power equipment.

E.10.6 Rectifying the composition of C5-FK mixtures

The procedure for rectifying the composition of C5-FK mixtures with a carrier gas in a concentration not complying with the specifications given by the electric power equipment manufacturer should be described in the operating instruction manual. If not otherwise specified, the following should be applied:

For rectifying the composition of a C5-FK mixture, the C5-FK mixture with the wrong mixing ratio should be recovered completely and then the gas compartment should be filled with the correct mixing ratio.

NOTE The method described in B.10.6 or D.10.6.1 for binary gas mixtures cannot always be used for C5-FK mixtures, because the maximum vapour pressure of the C5-FK could be below the pressure in the gas compartment.

E.11 Specifications for C5-FK mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment

The maximum level of contaminants for C5-FK mixtures to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment should be topped-up, should be specified by the electric power equipment manufacturer.

Annex F (informative)

C₄F₇N (C4-FN) in mixtures with N₂, CO₂, O₂ (C4-FN mixtures)

F.1 Gas properties

F.1.1 General

In the following subclauses the gas properties of C₄F₇N (for easier reference C4-FN) are presented. In case of a mixture with N₂ and/or O₂ and/or CO₂ (for easier reference C4-FN mixtures), the properties are strongly related to the mixing ratio and can therefore not be presented as absolute numbers. Properties of the carrier gases are not part of this annex, but are part of Annex D.

2,3,3,3-tetrafluoro-2-(trifluoromethyl) propanenitrile, also described as (CF₃)₂CFCN or C₄F₇N is a fluoronitrile. For easier naming, reference and identification it is also named C4-FN (FN = fluoronitrile). It is a synthetic fluid. The structure of the molecule is shown in Figure F.1.

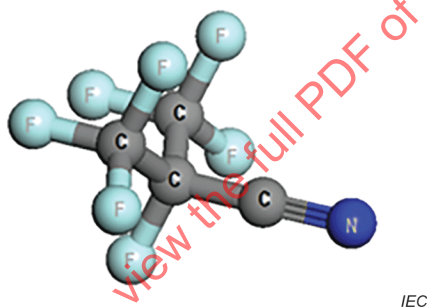


Figure F.1 – Structure of the C4-FN molecule

Due to its boiling point of -4,7 °C it cannot be used in technical grade form as an insulation and/or switching gas for electrical applications but is used as a mixture with carrier gases to achieve a total gas pressure above ambient pressure. The preferred carrier gases are mixed with the C4-FN depending on the application.

F.1.2 Chemical properties

Technical grade C4-FN is odourless, tasteless, colourless, non-flammable and stable. Materials used in electric power equipment and handling equipment should have a proven material compatibility. It is non-ozone depleting and has a GWP₁₀₀ of 2 100 (see F.3.4).

Table F.1 lists the main chemical characteristics.

Table F.1 – Main chemical characteristics C4-FN

Chemical formula	(CF ₃) ₂ CFCN 2,3,3,3-tetrafluoro-2-(trifluoromethyl) propanenitrile
CAS number ^a	42532-60-5
REACH registration number	01-2120046668-46-0000
Molecular weight	195 g/mol
Decomposition temperature in quartz container	Above 700 °C
^a The CAS number is assigned by the Chemical Abstracts Service who maintain a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.	

F.1.3 Physical properties

C4-FN is a gas heavier than air with a boiling point at -4,7 °C. C4-FN evaporates within minutes to hours (depending on temperature and amount) even at temperatures down to -40 °C. It mixes within a few hours with other gases by convection and diffusion, and once it has mixed it does not separate again. Only in the case of condensation by cooling the C4-FN mixture below the related temperature of the C4-FN vapour curve, stratification occurs.

Figure F.2 shows the vapour pressure curve of C4-FN.

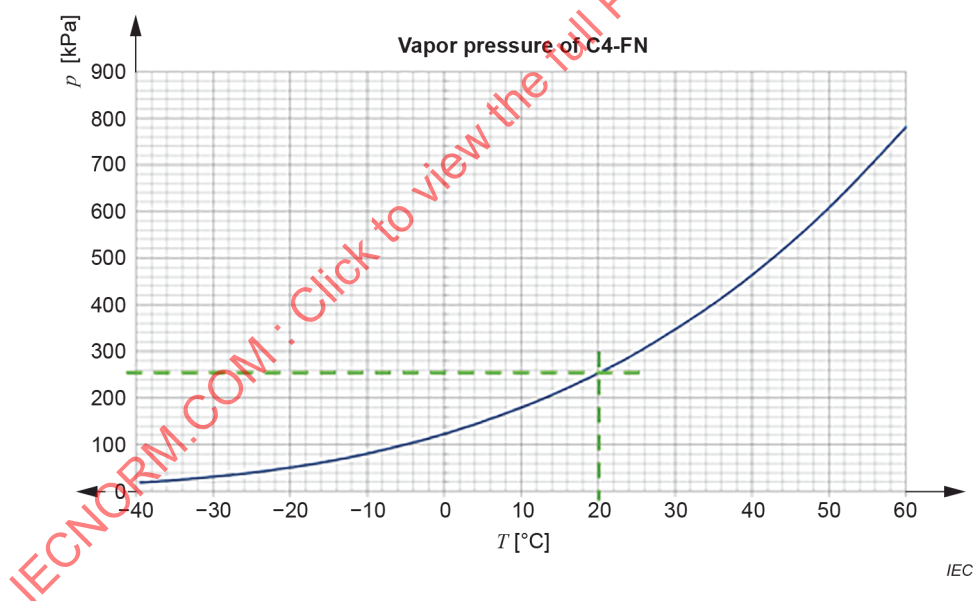
**Figure F.2 – Vapour pressure curve of C4-FN**

Table F.2 lists the main physical characteristics of C4-FN.

Table F.2 – Main physical characteristics of C4-FN

Chemical formula	$(\text{CF}_3)_2\text{CFCN}$
Boiling point at 101,3 kPa	-4,7 °C
Freezing point at 101,3 kPa	-118 °C
Sublimation point at 101,3 kPa	-
Liquid density at boiling point (at 101,3 kPa)	1 480 kg/m ³
Gas density at 20 °C and 100 kPa	8,2 kg/m ³
Vapour pressure at 20 °C	254 kPa
Critical temperature	108 °C
Critical pressure	2 502 kPa
Critical density	513 kg/m ³
Global warming potential (GWP ₁₀₀)	2 100
Ozone depletion potential (ODP)	0

Source: data sheet of gas manufacturer

F.1.4 Insulating and switching behaviour

In electric power equipment C4-FN is used as a C4-FN mixture with N₂ and/or O₂ and/or CO₂. As these carrier gases have lower insulation capabilities than C4-FN, the dielectric performance of C4-FN mixtures is lower than that for technical grade C4-FN at the same total pressure. The insulation performance as well as the switching performance is influenced by each C4-FN mixture component and concentration as well as by the total pressure of the C4-FN mixture. To avoid liquefaction of the C4-FN at any temperature in the operating temperature range of the electric power equipment, the available partial pressure of C4-FN in the mixture is limited.

Based on current knowledge the concentration of technical grade C4-FN between 2 % and 20 % in the C4-FN mixture could be used in electrical applications, at total pressures up to 1 500 kPa.

F.2 Safety and first aid

F.2.1 General

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

- switch off and isolate;
- secure against re-closing;
- verify that electric power equipment is de-energised;
- earth and short-circuit the electric power equipment;
- cover or fence-off nearby live parts.

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

Table F.3 lists the major issues to consider when working with electric power equipment containing C4-FN mixtures.

Table F.3 – Measures when working with electric power equipment containing C4-FN mixtures

Item	Work in the vicinity of electric power equipment (operation of electric power equipment, visual check, room cleaning)	Filling, topping-up, recovery, evacuation of gas compartments	Opening of gas compartments, work on open gas compartments
Material safety data sheet / operational manuals	Applicable	Applicable	Applicable
Training	Applicable ^a	Applicable	Applicable
C4-FN mixture handling equipment	Not required	Applicable	Applicable
Cleaning / neutralising equipment	Not required	Not required	Applicable
Personal protective equipment	Not required ^b	Applicable	Applicable
^a General information should be specified according to type of work and installation, according to local safety regulations. ^b Unless an abnormal leakage is detected by the density monitor of the electric power equipment or the room.			

A notice stating that open fire, naked flames (for example matches), smoking, use of heat engines, heating to more than 600 °C and welding without special precautions are prohibited and instructions for giving first-aid (see F.2.8) should be displayed while C4-FN or C4-FN mixture are handled in any location.

When a gas compartment is opened after the electric power equipment has been in service, personnel should wear suitable protective clothing in order to avoid contact with any solid by-products, which can be present. Particular attention should be paid to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which contain normally arced or heavily arced C4-FN mixtures should:

- use suitable tools and handling equipment;
- wear suitable protective clothing (see Table F.4 and F.2.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their handling equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components that have been in contact with solid by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues, with an additional and suitable tag.

F.2.2 Protection of personnel

C4-FN or C4-FN mixtures should be handled by trained personnel only. The training content is described in detail in Clause F.4.

A specific training covering the recovery of used C4-FN mixtures from a gas compartment is requested for personnel opening or entering the gas compartment. The operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer should be strictly followed.

Prior to opening a gas compartment, the C4-FN mixture should be recovered to $\leq 0,5$ kPa, followed by flushing with ambient air or N₂.

Eating, drinking and smoking are prohibited when accessing or opening a gas compartment.

Table F.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given as the operator opens or enters the gas compartment.

Table F.4 – Safety measures when opening or accessing gas compartments

		Potential risk	Safety precaution	Safety equipment and tools
Non-arced C4-FN mixtures	Normally or heavily arced C4-FN mixtures	Fumes of cleaning substances C4-FN abnormally released Asphyxiation	- Ventilation - Measurement of O₂ concentration before entering, with the minimum value required for entering = 16 % (the measurement is not required, when air is used as carrier gas) - Wear personal protective equipment	- Suction ventilator - O₂ concentration measuring device - C4-FN concentration measuring device - CO₂ concentration measuring device
		Residual reactive gaseous by-products Solid by-products and adsorber materials	- Removal of solid by-products and adsorber materials - Wear personal protective equipment - Measurement of concentration of residual reactive gaseous by-products	- CO concentration measuring device - Suction ventilator or vacuum cleaner - Single use protective clothes, shoe covers, hair cap, acid-proof gloves - Full face mask and self-contained breathing apparatus (preferred) or, at least, breathing protective mask (filter) - Environmental protection against rain or wind

Like any gas but O₂, a concentration greater than 19 % in the air is considered as a potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the O₂ concentration below 16 %, which is usually considered as the threshold for asphyxiation. Depending on the mixing ratio of the C4-FN and the selection and concentration of the carrier gases this can become relevant or not. In case of air as carrier gas and low concentration of C4-FN, the O₂ concentration might always be >16 %. As soon as no O₂ is part of the carrier gases or the concentration of O₂ in the C4-FN mixture is below 16 %, it might be relevant. All relevant details should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

When relevant as a consequence it is recommended that the O₂ concentration in the gas compartment be measured after ventilation and prior to accessing it. In addition to that, the O₂ concentration in the ambient environment can be checked when working in confined spaces.

C4-FN is not classified as a flammable gas (see 3.1.7). The flammability of C4-FN mixtures is increased if the O₂ concentration of the carrier gas is larger than 22 %.

Under normal operating conditions C4-FN is present as a gas. Mixtures are used wherein the C4-FN is homogeneously mixed. Any leak in containers containing this mixture, will release the C4-FN mixture to the environment. This mixture will rapidly mix with the ambient air by convection and diffusion, and once it has mixed it does not separate again. Therefore, C4-FN mixtures will not accumulate in low areas of buildings. In case air (O₂ and N₂) is used as carrier gas, there is no danger of asphyxiation to personnel. In case CO₂ is used as carrier gas, it should be considered that in areas below ground level, in poorly ventilated areas, or in unventilated areas (for example cable ducts, trenches, inspection pits, drainage systems) it is also an asphyxiant and has an effect on breathing beyond simply displacing O₂. Therefore, in the case of C4-FN mixtures with CO₂ asphyxiation is of concern.

NOTE More details on CO₂ are given in Annex D.

Rooms or areas containing concentrations of C4-FN and/or CO₂ above the TWA value should not be entered without adequate ventilation or personal protective equipment.

C4-FN has been characterized through a variety of toxicological studies (see F.3.2.2)

EHS information is based on the used tonnage band, which is a measure for European REACH certification. REACH can require additional tests to complement EHS information based on other tonnage bands. In areas outside the European Union different registrations might be required. Please contact your electric power equipment manufacturer for further details.

F.2.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

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

Reusable safety equipment and tools should be cleaned, for example washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. Examples of neutralising solutions are given in IEC 60480:2019, Table 11.

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

F.2.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

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

All equipment and tools used during C4-FN mixture handling potentially contain gaseous C4-FN, C4-FN mixtures or carrier gases under high pressure. They should be handled with care.

F.2.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the electric power equipment itself. Safety shoes, helmet, and protective goggles can be required according to local regulations to get in the vicinity of the switchgear.

In case of sudden release of C4-FN mixtures due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to F.2.7.

The required protective equipment should be specified in the operating instruction manuals of the electric power equipment manufacturer.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table F.4, workers engaged in handling of C4-FN mixtures are provided with the following personal safety and protective equipment:

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166 [3]);

- breathing protective mask: should be equipped with particle filter Class FFP3. To be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas only;
- full / half face mask: for opening and accessing gas compartments for cleaning and removal of solid by-products and adsorber materials;
- single use protective overall: to be used when working on electric power equipment after internal arc failure. Dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap, pocketless, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene) disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;
- respirator: when entering and/or working at indoor applications after an abnormal leakage or a sudden release due to internal arcing when the concentration of C4-FN or CO₂ or the amount of by-products are exceeding TWA values (see F.9.2.4.6), a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136 [7]);
- environmental protection for outdoor work locations: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open;
- vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping particles according to dust class H (high hazard). Dust classes are specified in Annex AA of IEC 60335-2-69:2021;
- suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment might be portable or permanently installed, depending on the size of the installation;
- handheld O₂ meter for O₂ concentration measurement;
- handheld CO₂ meter for CO₂ concentration measurement;
- handheld CO meter for CO concentration measurement;
- handheld C4-FN concentration measurement.

F.2.6 Facilities and services

Where gas compartments containing used C4-FN mixtures are opened (after recovery of the C4-FN mixture), adequate washing facilities for workers and a supply of water for preparing cleaning solutions should be available.

F.2.7 Additional safety measures in case of sudden release of C4-FN mixtures

In case of sudden release of C4-FN mixtures due to internal arc or external fire the affected rooms should be left immediately. Under these circumstances, only trained personnel (see F.4.2) are allowed to enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment. Table F.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as the safety equipment and tools required.

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

The same rules apply to areas below the floor level at which the release occurred and which are poorly ventilated or unventilated (for example cable trenches, inspection pits, drainage systems). The required ventilation time depends on type and amount of released gas. If the risk of asphyxiation cannot be neglected, a temporarily forced ventilation should be installed.

A second person being in continuous visual and audible contact should be present, when entering areas which might have a low O₂ concentration and/or a high concentration of by-products.

Outdoor electric power equipment should apply standard measures for outdoor conditions (for example rain protection, wind protection).

F.2.8 First aid equipment and treatment

F.2.8.1 General

First aid equipment includes:

- normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution,
- means for contacting emergency services;
- guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see F.2.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

F.2.8.2 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation, all personnel should immediately leave the affected area and move into the fresh air. Contaminated clothing is removed, and the affected part washed with cool running water. Apply calcium gluconate gel as a remedy after washing for fluoride acid on skin. Professional medical advice should be sought.

F.2.8.3 Irritation of the eyes

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

F.2.8.4 Breathing difficulty

In case of breathing difficulty, all personnel should immediately leave the affected area and move to the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance should be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration should be immediately commenced by trained and qualified personnel. Automated external defibrillator could be used according to local regulations.

F.3 Environmental impact

F.3.1 General

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

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

F.3.2 Ecotoxicology

F.3.2.1 Definition

Ecotoxicology has been defined as, "the branch of toxicology concerned with the study of toxic effects, caused by natural or synthetic pollutants, to the constituents of ecosystems, animal (including human), vegetable and microbial, in an integral context".

F.3.2.2 Toxicology

C4-FN gas has been characterized through a series of toxicological tests and the results recorded on the ECHA website. The compound has demonstrated low toxicity in acute inhalation studies and is classified acute toxicity class 4, H332. The LC₅₀ (4-hour rat) is > 10 000 µl/l (ppmv). Based on the results of a number of tests including a 28-day repeat dose inhalation study, C4-FN fluid was found to also be low in repeat dose inhalation.

C4-FN fluid showed no mutagenic hazard in a bacterial reverse mutation assay. In micronucleus and comet genotoxicity studies, performed in rats, no mutagenic hazard was indicated. A reproductive and developmental toxicity study demonstrated no adverse effects to reproduction or fetal development.

Considering the results of all toxicological studies, a TWA value of 65 µl/l (ppmv) has been established by the gas manufacturers. Precautions should be taken to control emissions into the work environment. References to the latest, actual toxicological data are documented in the safety data sheet (SDS), available from the gas manufacturer or on the ECHA website. Also refer to CIGRE Brochure 802 [1].

F.3.2.3 Environmental toxicology

Based on the available environmental toxicology test data the C4-FN substance was found to be non-hazardous to the aquatic environment. References to the latest, actual toxicological data are documented in the safety data sheet (SDS), available from the gas manufacturer or on the ECHA website. Also refer to CIGRE Brochure 802 [1].

F.3.3 Ozone depletion

C4-FN mixtures and their by-products do not contain either chlorine or bromine and therefore do not affect stratospheric ozone.

F.3.4 Global warming/climate change (greenhouse effect)

A study conducted by the C4-FN gas manufacturer examining the atmospheric loss mechanisms for C4-FN fluid determined that this compound does not directly photolyze but does show measurable reactivity with hydroxyl radicals. This rate of decomposition corresponds to an atmospheric lifetime of approximately 30 years. Using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013 [28] calculation method, the global warming potential (100 yr. ITH) for C4-FN fluid is 2 100. The GWP₁₀₀ of typical C4-FN mixtures used today (see F.1.4), also taking the GWP₁₀₀ of the carrier gases (N₂, O₂, CO₂) into account and using the calculation method as given in the European regulation 514/2014 [27] on fluorinated greenhouse gases, Annex IV, is <1 000.

F.3.5 Environmental impact of by-products

Major failures causing release of heavily arced C4-FN mixtures are rare. The quantities released in such extreme cases are limited by the fact that standard designs of products are compartmented, limiting the fault to the place where it originates. The gas quantities concerned are subsequently small fractions of the total gas banked in an electric power equipment.

By-products can be converted into neutral products. Procedures for their treatment, handling and disposal ensure that they have a negligible impact on the environment.

F.3.6 Decomposition by UV-light in the upper atmosphere

C4-FN undergoes indirect photolysis in the atmosphere via reaction with hydroxyl radical. The degradation products resulting from this oxidation mechanism are HF in a 4:1 ratio with C4-FN, CO₂ in a 2:1 ratio and both NO and CF₃COOH in a 1:1 ratio. A scientific study concluded that regarding the levels anticipated in the environment, none of the primary or secondary degradation products will have any significant impact on the environment [24].

NOTE No natural photolysis happens at the installation level of the electric power equipment.

F.4 Training and certification

F.4.1 General

By the nature of the technology used for electric power equipment utilising C4-FN mixtures, operational safety and environmental aspects are intrinsically and tightly coupled together and therefore should be treated at the same time.

The following clauses are focused on training performed to assure that operational safety requirements and environmental aspects are met concerning electric power equipment utilising C4-FN mixtures.

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

Given the specific nature of the electric industry and electric power equipment, safety and continuity of service are very important.

Related to the tasks to be completed by trained personnel, the training can be adopted to cover different scopes, ranging from for example awareness training to advanced training. The training should be related to a specific design (for example high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage gas-insulated metal-enclosed switchgear, instrument transformers, gas-insulated lines, etc.) and different designs require different trainings to be certified.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the electric power equipment, operating instruction manuals of the handling equipment, safety data sheets (SDS), instrument datasheets, international standards, and CIGRE brochures. In some countries certification of natural persons carrying out gas handling procedures for specific gases is mandatory. Release of C4-FN or C4-FN mixtures into the environment during manufacturing, operation, maintenance, and at end-of-life of the electric power equipment should be avoided. Local regulations exist on this respect.

F.4.2 Training

Workers handling C4-FN or C4-FN mixtures shall should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and handling equipment, and procedures to assure the continuity of service.

The different aspects to be covered by a training are the following:

- safety and first aid (see Clause F.2), in particular:
 - local regulations, emergency plans and instructions in case of for example asphyxiation, internal arc fault;
 - safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products;
- basic knowledge of relevant environmental issues;
- physical, chemical and insulating and switching characteristics of C4-FN mixtures;
- use of C4-FN mixtures in electric power equipment (insulation, switching);
- existence of local regulations and international standards in relation to the task;
- C4-FN mixtures handling, hazards and health characteristics;
- design of electric power equipment (properties and application/functionality);
- the operating instruction manuals given by the electric power equipment manufacturer in relation to the tasks;
- types of gas compartments filled with C4-FN mixtures;
- instruments and procedures for checking the quality of C4-FN and C4-FN mixtures;
- procedures of handling of C4-FN, O₂, CO₂, N₂ and C4-FN mixtures:
 - C4-FN mixture filling and topping-up with C4-FN mixture;
 - recovery and reclaim of non-arced C4-FN mixture, recovery and reclaim of normally and heavily arced C4-FN mixture; handling, neutralisation and removal of by-products, handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products;
- leak detection methods and repair techniques;
- storage and transportation of C4-FN, O₂, CO₂, N₂ and C4-FN mixtures (see Clause F.5);
- handling equipment for C4-FN and C4-FN mixtures in relation to the tasks (see Clause F.6);
- procedures for entering the switchgear room in case of abnormal leakage and/or sudden release of C4-FN mixtures due to fire or internal arc fault (see F.2.7);
- transportation of the power electric equipment to the dismantling site, if applicable (see F.5.4);
- dismantling of electric power equipment and part sorting (see Clause 7).

F.4.3 Certification

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

The following records should be retained:

- the training content;
- the date on which the training was completed.

Restrict the tasks to be performed (for example C4-FN mixture topping-up or recovery for a certain design) to personnel who have been certified for the respective skill levels and sustain a high level of expertise.

F.5 Storage and transportation

F.5.1 General

Storage and transportation of C4-FN and C4-FN mixtures, either in containers or in electric power equipment should always be carried out in accordance with local and international regulations.

An empty C4-FN container can still contain a residual amount of C4-FN. It should be stored and transported in the same way as a filled container.

F.5.2 Storage of containers filled with C4-FN or C4-FN mixtures

F.5.2.1 Storage of containers filled with C4-FN

Containers filled with technical grade C4-FN typically contain a liquid and a gaseous phase, at a maximum pressure depending on the container temperature. At 20 °C, the maximum pressure in the container is 254 kPa (see Figure F.2).

Containers should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself. Containers should be clearly labelled to identify their contents. The storage containers should comply with local and international regulations and could be of the type used as for example a refrigerant recovery container with a dip tube. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table F.5 gives an overview of all possible storage methods on which a storage container can be based.

Table F.5 – Methods for storage of C4-FN

Method	Requirements	Features
Liquefied gas	Pressure at 20 °C = 254 kPa	The container should be equipped with a dip tube and a gas and a liquid valve.

Table F.6 gives examples of container types and required labelling. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table F.6 – Examples of container types required for storage / transportation of C4-FN

Gas / fluid	Characteristic	Container type
Technical grade C4-FN	Liquefied gas	For example, a refrigerant recovery container with a dip tube Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8] (bright green shoulder).

F.5.2.2 Storage of containers filled with C4-FN mixtures

When storing C4-FN mixtures as pressurized gas, the mixing ratio or the partial pressures of C4-FN, CO₂, N₂ and O₂ and the minimum storage temperature of the container define the maximum total pressure to which this C4-FN mixture can be compressed without partial liquefaction of the C4-FN.

At higher pressures and/or lower storage temperatures C4-FN and CO₂ start to partially liquefy. C4-FN and CO₂ have different liquefaction temperatures, whereas at typical storage temperatures N₂ and O₂ will not liquefy. Therefore, the gas composition of the liquid phase and the gas phase will be different. Special care should be taken before using the gas from such a container in electric power equipment to homogenize the two phases. Depending on the concentration of C4-FN and CO₂, heating the container to a temperature and a pressure above the critical point of CO₂ might be sufficient. The critical temperature and pressure of CO₂ are 31 °C and 7 380 kPa respectively.

Containers should be handled carefully and stored in a cool, dry, well-ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself. Containers should be clearly labelled to identify their contents, including mixing ratio and minimum storage temperature (before liquefaction of C4-FN).

Table F.7 gives an overview of all possible storage methods for C4-FN mixtures on which a storage container can be based.

Table F.7 – Methods for storage of C4-FN mixtures

Method	Requirements	Features
Gaseous	Typical pressures between 300 kPa and 2 000 kPa, depending on the mixing ratio, the C4-FN partial pressure and the minimum storage temperature.	As the quantity of the C4-FN mixture is limited due to the low pressure, this storage is not intended for storing large quantities. Main use might be topping-up of gas in case of a gas alarm to return to safe operating conditions.
Liquefied gas	Typical pressures between 2 000 kPa and 5 700 kPa, depending on the mixing ratio, the C4-FN partial pressure and the heating temperature of the container.	At storage temperature the C4-FN in the C4-FN mixture is partially liquefied. Before taking the C4-FN mixture from the container and filling it in an electric power equipment, the gas container should be heated for a defined time to a defined temperature, to reach a homogeneous mixing ratio.
Liquefied gas	Typical pressures above 5 700 kPa at 20 °C and depending on the mixing ratio.	At storage temperature the C4-FN and the CO ₂ in the C4-FN mixture are partially liquid. Before taking the C4-FN mixture from the container and filling it in an electric power equipment, the gas container should be heated for a defined time to a defined temperature above the critical temperature of CO ₂ , to reach a homogeneous mixing ratio.
NOTE The pressures refer to a temperature of 20 °C. The vapour pressure of CO ₂ at 20 °C is 5 730 kPa.		

When samples of used C4-FN mixtures are stored for gas analysis off-site, the storage containers should comply with local and international regulations on pressurised containers. Container labelling should also comply with local and international regulations.

Table F.8 gives examples of container types required for storage and transportation of C4-FN mixtures. It is recommended to use transportable storage containers, wherever possible for practical reasons.

Table F.8 – Examples of container types required for storage and transportation of C4-FN mixtures

Fluid / gas	Characteristic	Container type
C4-FN mixtures	Gaseous or liquefied gas	Suitable for gas up to a pressure of 20 000 kPa. Recommendation: Containers should be painted according to local regulations, e.g. EN 1089-3 [8].

F.5.3 Transportation of containers filled with C4-FN or C4-FN mixtures**F.5.3.1 Transportation of containers filled with C4-FN**

International regulations for shipment of C4-FN containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of C4-FN are summarised in Table F.9.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

Table F.9 – International regulations for shipment of C4-FN

Fluid / gas	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade C4-FN	Liquefied gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (fluoronitrile) 2.2
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20].				
^b Hazards identification numbers (e.g. H280) are listed in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer or gas manufacturer.				
N.O.S.: “not otherwise specified”.				

F.5.3.2 Transportation of containers filled with C4-FN mixtures

International regulations for shipment of C4-FN mixtures containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

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

The international regulations for shipment of C4-FN mixtures are summarised in Table F.10.

The UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation for normally arced and/or heavily arced C4-FN mixtures can depend on the design and usage of the electric power equipment and should be defined in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer.

The classifications listed in Table F.10 are limited to C4-FN mixtures with C4-FN and O₂ concentrations not leading to an increased flammability. Details about maximum concentrations, maximum pressure and maximum temperature should be given in the safety data sheet of the electric power equipment manufacturer.

NOTE Information on UN numbering, classification, danger labelling, final classification and transport documentation is given in [20].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Table F.10 – International regulations for shipment of C4-FN mixtures

Gas	Characteristic	Class	Final classification ^{a, b}	Transport document ^a
Technical grade C4-FN mixture ^c and Non-arced C4-FN mixture ^c	Compressed gas	1A	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. 2.2	UN 1956 COMPRESSED GAS N.O.S. (fluoronitrile and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Technical grade C4-FN mixture ^c and Non-arced C4-FN mixture ^c	Liquefied gas	2A	UN 1058 or UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 1058 or UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (fluoronitrile and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Normally arced C4-FN mixture ^{c, d}	Liquefied gas	2A	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. 2.2	UN 3163 LIQUEFIED GAS N.O.S. (fluoronitrile and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide) 2.2
Heavily arced C4-FN mixture ^{c, e}	Liquefied toxic gas ^f	2T	UN 3162 LIQUEFIED TOXIC GAS N.O.S. 2.3	UN 3162 LIQUEFIED TOXIC GAS N.O.S. (fluoronitrile and oxygen and/or nitrogen and/or carbon dioxide with toxic by-products) 2.3
^a UN numbers are assigned by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations [20]. ^b Final classification, including correct UN code and hazards identification numbers (e.g. H280), are listed in the safety data sheet and/or in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer. ^c C4-FN mixtures with C4-FN and O ₂ concentrations not leading to an increased flammability. ^d C4-FN mixtures that contain small amounts of by-products and have a LC50 value > 5 000 µl/l (ppmv). ^e C4-FN mixtures that contain large amounts of by-products, typically after experiencing an internal arc, a failure to interrupt or a last number of short-circuit breaking operations and have a LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). ^f According to UN regulations for transportation, a gas is classified "toxic" when its LC50 value < 5 000 µl/l (ppmv). N.O.S.: "not otherwise specified".				

F.5.4 Storage and transportation of electrical power equipment containing C4-FN mixtures

Electric power equipment filled with C4-FN mixtures should be stored and transported according to local and international regulations.

International regulations for shipment are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation.

According to ADR, RID and IAT transportation codes the filling pressure should not exceed 200 kPa (relative) at 20 °C.

F.5.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising C4-FN mixtures is responsible for the proper use, transportation and disposal of the electric power equipment and the C4-FN mixture.

F.6 Description of handling equipment

F.6.1 General

F.6.1.1 Overview

This part of the annex gives information about the handling equipment, which might be required for handling of C4-FN or C4-FN mixtures. Such handling equipment is required during development, testing, manufacturing, installation, service, repair and end-of-life treatment. Some of the handling equipment can also be used by the end-user of the electric power equipment.

The appropriate type and size of the handling equipment should be chosen according to the quantity of C4-FN and C4-FN mixture to be handled. Figure F.3 shows a basic functional scheme. The typical functions are as follows:

- evacuation of air from the gas compartment;
- preparation of C4-FN mixtures;
- filling of C4-FN mixtures in the gas compartment;
- recovery of C4-FN mixtures from the gas compartment;
- storage of C4-FN mixtures;
- removal of contaminants;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- container to container transfer.

Not all of the listed handling equipment might be available and/or required, depending on the design of the electric power equipment. It is more a theoretical overview on the possible technical solutions.

The following handling equipment is described below:

- vacuum pump;
- main and vacuum compressor;
- gas mixing unit;
- gas filling unit
- gas recovery unit;
- used gas storage and transportation devices;
- gas measurement devices;
- gas leakage detectors;
- gas leakage tester;
- gas sampling cylinders;
- alarm system detectors.

Some of the above listed handling equipment might be combined for specific tasks.



Figure F.3 – Schematic view of an example of a handling equipment for C4-FN mixture

F.6.1.2 Qualification of handling equipment

F.6.1.2.1 General

Before using any handling equipment, it should be ensured that the handling equipment can be used for the intended task (C4-FN or C4-FN mixture handling). This can be done by adequate tests at the handling equipment manufacturer itself or by the manufacturer of the electric power equipment that has proposed this handling equipment for use with C4-FN or C4-FN mixtures.

Handling equipment for the same task but intended for another gas and not qualified for C4-FN mixtures, might be damaged, malfunction or give wrong readings and therefore might generate a risk to the operator or the handling equipment or the electric power equipment.

The qualification should cover the following areas:

F.6.1.2.2 Prove that the handling equipment fulfils its function using C4-FN or C4-FN mixtures

This should be done by functional tests with C4-FN mixtures within the full gas concentration, pressure and temperature range for which the handling equipment will be used. Either the handling equipment has been especially designed for that use or it has been modified to operate with C4-FN mixture. In some cases, it has been demonstrated that no modification is required and standard handling equipment, originally designed for other gases, can be used.

F.6.1.2.3 Test and verify that the handling equipment is compatible with C4-FN or C4-FN mixtures

All parts of the handling equipment in contact with C4-FN or C4-FN mixtures should be tested and certified by the manufacturer of the gas handling equipment to be compatible with C4-FN or C4-FN mixtures. It should be shown that the handling equipment is not damaged when it comes in contact with the gas or its by-products. For modified handling equipment it might be required that materials in standard handling equipment are replaced for the use with C4-FN or C4-FN mixtures. In this case a clear differentiation between handling equipment variants that can be used with C4-FN or C4-FN mixtures and those that cannot be used should be done.

As the focus is on the impact of the gas on the handling equipment, care should be taken that

- the technical functionality is not negatively influenced during the specified lifetime of the handling equipment or during the intervals between maintenance of the handling equipment;
- maintenance intervals are adjusted, if required.

Where applicable, flushing or cleaning procedures should be defined (for example to avoid long term contact with C4-FN mixtures or their by-products before handling equipment is stored).

F.6.2 Filters

F.6.2.1 General

Filters are required to remove gaseous by-products, humidity and solid particles before storing C4-FN mixtures in a container, hence allowing for its reuse. Filters can be part of the handling equipment or external pre-filters. An external pre-filter might be required to remove particles, excessive levels of humidity and gaseous by-products, which are acidic compounds, and could damage the handling equipment or the storage container. The requirements of the external pre-filter are the same as those of the filters installed inside the handling equipment, but the pre-filtering capacity could be considerably higher.

Table F.11 shows typical filter types used as part of the handling equipment.

Table F.11 – Typical filter types

Filter type	Tasks	Major characteristics
Particle filter	Removes solid by-products and other particles.	Pore size lower than 1 µm.
Dry filter	Removes gaseous by-products and humidity.	Residual humidity lower than 100 µl/l (ppmv). Gaseous by-products retention ability. Particle retention ability.
Oil filter	Removes oil when required.	Special filter utilising active charcoal.

F.6.2.2 Filter types

F.6.2.2.1 Particle filter

To protect the handling equipment from damage, due to particles, it might be required to install particle filters. It is preferred that these filters are integral part of the handling equipment and are permanently installed on the inlet side. Source of particles might be for example metal particles from the production of the electric power equipment or generated during switching operations. Especially in heavily arced gas the generation of solid by-products might happen. Design, material and pore size of the filter should be defined by the handling equipment manufacturer. Special care should be taken on the selection of the material to avoid chemical reaction with C4-FN or adsorption of C4-FN.

F.6.2.2.2 Humidity and gaseous by-product filter (dry filter)

Appropriate filters can adsorb humidity and reactive gaseous by-products. Molecular sieves with a pore size smaller than 0,5 nm (5 Å) can be used. Bigger pore size can lead to thermodynamic exothermal reactions, resulting in severe filter overheating, as the C4-FN might be absorbed.

F.6.2.2.3 Combined filter

Instead of separate particle filters and humidity and gaseous by-products filters also filters, which combine both filtering principles, can be installed.

F.6.2.2.4 Oil filter

An oil trap containing activated charcoal should be inserted in the C4-FN mixtures cycle if an oil lubricated machine is used or if an oil-insulated electric component is included in the electric power equipment utilising C4-FN mixtures. The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

F.6.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the gas compartment/container/sample cylinders from gases as air or other natural-origin gases which are permitted to be released to the atmosphere prior to any filling with the C4-FN mixture.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 0,1 kPa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 0,01 kPa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 0,1 kPa (recommended value is lower than 0,01 kPa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended. Thermal vacuum sensors are dependent on the gas type and are not recommended.

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

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

F.6.4 Main and vacuum compressors

When the C4-FN mixture pressure in the gas compartment is higher than the pressure in the storage container, it is quicker to allow direct gas expansion (for example for sampling). In all other cases, a compressor is required to recover the gas. As the pressure in the gas compartment can vary within a very wide range, a dual compressor system should be used:

- the main compressor, usually employing a piston type compressor, which operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas storage container;
- the vacuum compressor, connected in series when needed, operates between the pressure in the gas compartment and the pressure at the inlet of the main compressor. It is required to empty the gas compartment to residual pressures below 0,5 kPa.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry-running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination. State-of-the-art compressors can achieve 0,1 kPa pressure at the inlet.

F.6.5 Outlet compressor

When the pressure in the storage container is higher than the pressure in the gas compartment, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to fill in the gas. The outlet compressor, usually employing a piston type compressor, operates between a gas inlet pressure of about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas compartment.

NOTE Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry running are preferred to eliminate the possibility of oil contamination.

F.6.6 External and internal gas storage containers

Pressure containers are available as external or internal C4-FN mixture storage containers. They are mobile, stationary or can be installed in the handling equipment. The maximum pressure of the C4-FN mixture storage container should be suitable for the final pressure of the compressor, also taking elevated temperatures into account. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

F.6.7 Evaporator and gas storage container heater

If C4-FN mixtures are stored in partially liquid form, heaters can be used to evaporate the contained liquid before taking C4-FN mixtures from the container. Care should be taken, that the mixture gets sufficient time to become homogenous, before any use.

In order to rapidly fill large volumes, the handling equipment should be designed to extract liquid that is then vaporized inside an evaporator. The evaporator is designed so that no liquid can reach the gas compartment or the internal storage container.

The gas storage container heaters should be designed to avoid accidental overheating and not exceeding 60 °C C4-FN mixture temperature.

F.6.8 Gas piping and pipe junctions

Gas piping and pipe junctions should be designed to avoid leaks and corrosion. The design of both piping and junctions should take vibration into account so that periodical operations such as re-tightening of fittings are not required.

F.6.9 Control instruments

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

F.6.10 Safety valves

Safety valves are used in the high-pressure gas system for pressure relief, to avoid the opening of pressure relief devices of the electric power equipment or to avoid overfilling of the storage container for the safety of the operating personnel. Local safety regulations should be followed.

F.6.11 Flexible hose connections

The handling equipment and the gas storage container or the gas compartment are connected via flexible hose connections. Particular care should be exercised to avoid the presence of air or other compounds inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required. The cross-section and the length should be dimensioned in a way to have a good compromise between speed of operation and banked gas within the system. Hoses made of synthetic rubber have normally a limited lifetime and should be replaced accordingly.

F.6.12 Portable devices for gas measurement

F.6.12.1 General

Table F.12 gives a survey on gas measuring devices including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in the technical datasheet.

Table F.12 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Hygrometer (frost/dew point meter)	Humidity (frost/dew point)	40 µl/l (ppmv) to 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C to 0 °C)	-10 °C to 40 °C	(±2 °C)
C4-FN measuring device	C4-FN concentration of the C4-FN mixture	0 % to 20 %	-10 °C to 40 °C	±0,2 %
O ₂ measuring device (optional)	O ₂ concentration of the C4-FN mixture	0 % to 25 %	-10 °C to 40 °C	±0,25 %
CO ₂ measuring device (optional)	CO ₂ concentration of the C4-FN mixture	0 % to 100 %	-10 °C to 40 °C	±2 %
CO measuring device	CO	0 µl/l (ppmv) to 500 µl/l (ppmv)	-10 °C to 40 °C	±10 µl/l (ppmv)
Pressure gauge	Pressure	0 kPa to 1 500 kPa (HV) 0 kPa to 200 kPa (MV)	-10 °C to 40 °C	±1 % of the full range
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Pressure values are conventionally reported at 20 °C. Either use a temperature compensated pressure gauge or recalculate the actual pressure measurement to a gas temperature of 20 °C.

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

- humidity concentration in the gas and/or dew point or frost point;
- C4-FN concentration and/or the partial pressure of C4-FN;
- O₂ concentration;
- CO₂ concentration;
- CO concentration.

Preferable handling equipment allows for the simultaneous measurement of all applicable parameters using a single device which is capable of pumping back C4-FN mixtures into the gas compartment. A pressure and temperature measurement are also contained in the handling equipment to calculate for example partial pressure based on concentration and total pressure measurement.

F.6.12.2 Frost / dew point meter

The humidity concentration can be measured with different measuring principles and measuring instruments. It should be proven by the manufacturer of the measuring equipment that it can measure the humidity concentration or dew point / frost point in a C4-FN mixture. The electric power equipment manufacturer can recommend approved handling equipment.

The instrument measures the dew point / frost point of the gas, expressed in °C, and can convert it into concentration, for example in µl/l (ppmv), or vice versa, depending on the measurement principle.

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces, C4-FN and C4-FN by-products;
- low cross-sensitivity to C4-FN, carrier gases and C4-FN by-products;
- permeation resistant pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials;
- calibrated or capable of self-calibration;
- minimized gas loss of the handling equipment per measurement (integrated closed gas loop with for example small compressor for gas topping-up after measurement or waste gas cylinder or gas bag);
- less than 1 000 ml gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 15 min.

F.6.12.3 Gas concentration measuring devices – C4-FN concentration measuring devices

There are different physical principles available for C4-FN concentration measurement in C4-FN mixtures. These can be for example speed of sound measurement, or optical systems using the absorption of IR or UV light by the C4-FN molecule. Also, combined handling equipment that also measures the concentration of other new insulation gases is expected.

The readout is the C4-FN concentration expressed in %.

Desirable characteristics are:

- sensor resistant to oil traces, C4-FN and C4-FN by-products;
- calibrated or capable of self-calibration;
- low cross-sensitivity to humidity, carrier gases and C4-FN by-products;
- minimized gas loss of the handling equipment per measurement (integrated closed gas loop with for example small compressor for gas topping-up after measurement or waste gas cylinder or gas bag);
- less than 1 000 ml gas used per measurement;
- average time to obtain the readout less than 15 min.

F.6.12.4 Analysers of gaseous by-products

During normal operation including switching operations (normally arced gas) the safety rules for C4-FN mixtures also cover the by-products in the expected concentration. As the concentrations are on a low level, sensitive analysers which combine gas-chromatography and mass-spectrometry (GC-MS) can give accurate values.

F.6.12.5 Portable gas detectors

For fluorinated gases different physical principles can be used for detection. Not all physical principles work for every gas or special adaptation is required. Before using a sniffer, the handling equipment manufacturer should confirm that the handling equipment can be used for C4-FN mixtures and state its sensitivity.

As the instruments do not detect the complete C4-FN mixture, but only one component of it, the sensitivity is strongly related to the C4-FN concentration.

F.6.13 Gas leakage tester

For leakage testing at a sensitivity down to 1-digit $\mu\text{l/l}$ (ppmv) photoacoustic systems can be modified by using the adequate filter and calibration for C4-FN. The response time of about 15 s prevents the device from being used for on-site leak localisation and therefore the device is mainly used in the factory after production or during type tests.

F.6.14 Gas concentration alarm systems

Gas concentration alarm systems might be installed to monitor the C4-FN concentration in a room. Alarm systems require detectors with very high long-term stability. The infrared absorption characteristic of C4-FN is used as the basis. Single-zone infrared monitoring system for low level continuous monitoring of CFC, HCFC and HFC refrigerant gases used in most refrigeration systems have been successfully tested to work with C4-FN, when the required parameters have been entered. The handling equipment manufacturer can recommend which device can be used. Sensitivities down to 1 $\mu\text{l/l}$ (ppmv) can be achieved.

Alarm systems incorporating C4-FN detectors are normally not required in typical areas, where electric power equipment using C4-FN mixtures are installed. Only in cases where C4-FN is stored as a liquid, or where C4-FN is handled or where the area around the electric power equipment is very small and not ventilated, such handling equipment can be useful to indicate that the actual concentration of C4-FN is below the TWA value of 65 $\mu\text{l/l}$ (ppmv).

F.6.15 Gas sampling cylinder

Stainless steel cylinders without coating with a volume of 50 ml to 500 ml are recommended. Valves and caps should also be of stainless steel. The gas should be sampled directly from the gas compartment using suitable fittings. If the pressure in the gas compartment exceeds the maximum permitted pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge should be used.

Before taking a gas sample, the gas sampling cylinder should be evacuated. Any residual gas or air will lead to inaccurate gas analysis. When taking gas samples with gas sampling cylinders, care should be taken that no air contained in hoses or fittings or during the connection of the adapter to the valve is entering the sampling system. It might be required to evacuate the sampling cylinder a second time or to use the two cylinders approach of having one waste gas cylinder and one sample gas cylinder.

F.6.16 Gas mixing unit

In Figure F.3, top right, a schematic view of a gas mixing unit is shown. It is used to mix C4-FN with the different carrier gases O₂, N₂, CO₂, according to a preselected gas ratio during filling or topping-up of electric power equipment or an external storage container. It is also possible to use premixed carrier gases, such as synthetic air (see 3.5.5).

The flows of the evaporated C4-FN and the carrier gas(es) are controlled by flow control units to fill the storage container with the preselected mixture. The outlet pressure (i.e. the filling pressure in the gas compartment or in the storage container) is controlled by the outlet compressor.

Desirable characteristics are:

- adjustable C4-FN concentration and outlet pressure (i.e. filling pressure);
- gas mixing ratio (i.e. C4-FN concentration): 2 % to 20 %;
- maximum outlet pressure at 20 °C: up to 1 500 kPa;
- C4-FN inlet in liquid state;
- possibility of mixing small as well as large quantities of gas.

F.6.17 Gas filling unit

In the center of Figure F.3 a gas filling unit is shown. It is used to sequentially fill the individual components of the C4-FN mixture into the gas compartment (see F.10.2.2), to mix the components during the filling process (see F.10.2.3) or to fill a premixed C4-FN mixture into the gas compartment (see F.10.2.4).

Due to the high boiling point of C4-FN the pre-mixed C4-FN mixture cannot be compressed to high pressures, as this will lead to partial liquefaction of the C4-FN. The gaseous fraction in the gas container will contain less C4-FN than the original mixture.

To avoid this, the maximum pressure can be calculated and defined based on the mixing ratio and the minimum storage temperature of the container.

It is also possible to increase this pressure, by heating the storage container. The handling equipment manufacturer should define how long and to which temperature a container should be heated before using gas from it to ensure evaporation and homogeneous mixing of the gas.

F.6.18 Gas recovery unit

In the center of Figure F.3 also a gas recovery unit is shown. Gas recovery devices normally consists of a set of components including a particle filter, dry filter, vacuum compressor, main compressor and storage container for used C4-FN mixtures.

The gas recovery unit is intended to recover C4-FN mixtures from a gas compartment in case of maintenance, repair or end-of-life.

The re-use of used C4-FN mixtures is more complex due to the fact of partial liquefaction of compressed mixtures.

F.6.19 Used gas storage and transportation devices

Pressure containers or special storage containers for used C4-FN mixtures are available as gas storage containers. They are mobile or stationary. Only specially approved containers for storage and transportation of used C4-FN mixtures are allowed. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor. The local regulations for the operation of pressure containers should be observed.

When compressing a C4-FN mixture the contained C4-FN will start to liquefy at a specific pressure and temperature. This should be considered when choosing a compressor and the maximum pressure for the pressure container is defined.

F.7 Reclaiming procedures

The reclaiming process is possible and uses a system of compressors and cooling systems for controlled separation of C4-FN and the carrier gases. A further separation of the different carrier gases is very complex and is not economical. Contaminants and by-products can be filtered.

Such reclaimers might be useful for on-site maintenance of closed pressure systems, or in the factory, or for gas handling at the end-of-life of the electric power equipment.

F.8 By-products

F.8.1 General

This subclause describes general aspects on decomposition and characteristics of by-products. The quantities will depend on the gas composition, contaminants and energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer according to IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

F.8.2 Decomposition of C4-FN mixtures

F.8.2.1 General

C4-FN mixtures contain the C4-FN itself (C_4F_7N) and other gases as N_2 , O_2 or CO_2 . In combination with other materials used in the electric power equipment and/or with electric arcs, the C4-FN molecule can be decomposed.

The production of by-products can be categorized in three groups.

F.8.2.2 Decomposition of C4-FN mixtures in low current discharges

The decomposition of C4-FN mixtures in low energy arcs (for example during switching operations of disconnectors) is negligible and the concentrations of by-products resulting from partial discharges are low.

F.8.2.3 Decomposition of C4-FN mixtures in an electric arc

During load current or fault current switching an electric arc reaching temperatures in the order of 10 000 °C is formed.

Beginning at temperatures of 600 °C, C4-FN begins to decompose into its constituent parts. Above 800 °C, fluorinated species such as COF_2 , C_2F_5CN , CF_3CN and C_2F_6 are detected. However, all of these compounds decrease in concentration as the temperature approaches 1 000 °C. During the dissociation process the C4-FN molecules are broken down into molecular fragments or into F, C and O atoms at about 3 000 °C.

The decomposition rate is related to the arc energy. The electric power equipment manufacturer should ensure that the consumption of C4-FN during the lifetime of electric power equipment due to arcing is limited and has no negative impact on the lifetime or performance of the electric power equipment.

Below a temperature of about 1 000 °C, the atoms combine or react with other substances, such as vaporised electrode metal. Unlike to SF₆ the C4-FN molecule does not re-combine. Gaseous and solid by-products can arise, including metal fluorides, of which the most common are CO, HF, CuF₂, AlF₃ and CF₄.

F.8.2.4 Decomposition of C4-FN due to an internal arc failure

Internal arc failures are also a type of high energy arc, but with different properties. Their duration is significant longer (up to 1 s) than a typical switching arc, and in most cases the gas compartment opens and the plasma can recombine outside the gas compartment in the ambient air, where, for example, the humidity in the air adds H₂O as another substance that can interact with the molecular and atomic fragments as they recombine. In addition, a significant amount of material (steel, copper, aluminium, plastic) is burnt or evaporated and can also influence the chemical reactions that take place. Not all gases, liquids or particles created during internal arc failures are related to the chemistry of the insulation gas. Some, for example, are oxides created by burning of metals or plastics. By-products containing F in the molecule are in most cases the result of decomposition of C4-FN.

The electric power equipment manufacturer should perform tests covering the three above-mentioned causes of decomposition to gain an overview of the main by-products and – in addition – possible toxic by-products.

As published in [25] the main by-products are carbon monoxide (CO) from the decomposition of CO₂ and perfluoroacrylonitrile (CF₂=CFCN) from the decomposition of C4-FN. The case of internal arc failures has been investigated on an exemplary electric power equipment design. The results are listed in Table F.13. Other gaseous by-products might be generated if different electric power equipment designs are used.

Table F.13 – OELs and LC50 values for C4-FN mixtures by-products

Detected gas	Chemical formula	TWA [μl/l (ppmv)]	LC50 (4-hour rat) [μl/l (ppmv)]	LC50 (1-hour rat) [μl/l (ppmv)]
Carbonmonoxide	CO	35 ^a ... 50 ^b	1 807	3 760
Pentafluoropropionitrile	CF ₃ -CF ₂ -CN	not established	2 710	-
Trifluoroacetoneitrile	CF ₃ -CN	not established	242	-
Carbonylfluoride	COF ₂	2 (STEL = 5)	-	360
Perfluoroacrylonitrile	CF ₂ =CFCN	not established	not established	not established
Ethandinitride	CN-CN	10	175	350

NOTE Values are according to ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), OSHA (Occupational Safety and Health Administration) or AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals).

^a According to USA NIOSH.

^b OSHA PEL (Permissible Exposure Limit) value.

F.8.2.5 Chemical reaction of C4-FN with material

When C4-FN or C4-FN mixtures are in contact with materials used in electric power equipment, chemical reactions might occur. This depends to a high degree on the compatibility level of the materials used. The electric power equipment manufacturer is responsible that the compatibility level of the selected materials limits the decomposition of C4-FN to a level that avoids any negative impact on the materials. As this can only be shown for new electric power equipment, the filling of SF₆ switchgear with C4-FN mixtures is not permitted.

F.8.3 Corrosion behaviour of C4-FN mixtures and their by-products

In normal operation significant amounts of by-products do not occur and are adsorbed by the adsorbent materials.

Only in case of heavily arced C4-FN mixtures containing a significant concentration of corrosive by-products, the metals commonly used, such as aluminium, steel, copper and brass, might be attacked leading to corrosion. Corrosion can be significantly reduced by minimization of humidity concentration, by using suitable materials and appropriate adsorbents.

N₂ is an inert gas. Therefore, there is no possibility that corrosion will be caused directly by the N₂ itself.

The impact of O₂ in the presence of water on the corrosion behaviour in electric power equipment is well known and considered in relevant standards like IEC 62271-1:2017 or IEC TR 60943 [15]. However, the primary and secondary by-products, in presence of water, can form corrosive nitrous or nitric acids as well as ozone which can lead to damage of some of the material used inside the electric power equipment.

Also, pure CO₂ is non-corrosive, but together with water it can form carbonic acid which can be corrosive. However, the lack of stability of H₂CO₃ will not seriously affect the electric power equipment. Nevertheless, electrical power equipment equipped with an appropriate desiccant will avoid any risk of corrosion.

Some materials such as polymeric materials and the like are more vulnerable to damage by ozone attack. However, the impact of ozone on material properties is very much depending on the specific material utilized in electric power equipment.

It is important that the design and the operating instruction manual of the electric power equipment takes the corrosive properties of the O₂ and the by-products into account.

F.8.4 Measures for the removal of by-products

Humidity and by-products inside the electric power equipment in service can be reduced to acceptable levels by adsorption. Materials such as alumina, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb most gaseous by-products very effectively, and at the same time ensure that the dew point / frost point stays low.

Disposal of by-products removed from electric power equipment is straightforward. The acid components (for example hydrogen fluoride) are degraded by means of alkaline compounds.

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

F.8.5 Physiological characteristics of by-products

By-products can cause irritation of the skin, eyes and mucous membranes, such as in the respiratory tract, and in high concentrations can cause pulmonary oedema, given sufficient time of exposure. During normal operation no high concentrations of by-products are reached, and the number of by-products is limited. In heavily arced gas, e.g. due to an internal arc, the number of by-products, their toxicity and concentration is different and significantly higher, also related to involved burnt or evaporated material. According to normal safety rules, areas which are exposed to heavily arced gas should be evacuated immediately (see F.9.2.4.5).

Where carbon monoxide CO is produced its detection is essential. Carbon monoxide CO is odourless and toxic by inhalation. It causes headaches, nausea, dizziness, unconsciousness and sometimes death. Prolonged or repeated inhalation can cause damage to the heart.

F.9 Procedure to evaluate the potential effects on health of gas components and by-products

F.9.1 General

This subclause suggests procedures for the evaluation of the risks to health due to C4-FN mixtures and its gaseous by-products released into the local atmosphere by normal or abnormal leakage and in the event of a sudden release due to an internal arc fault or external fire.

During normal service C4-FN mixtures remain inside the electric power equipment, and the gaseous by-products formed are present at low concentrations and are partly neutralized by molecular sieves. C4-FN mixtures and their gaseous by-products can become present in the atmosphere because of leakage or if a gas compartment fails to contain the gas, for example as the result of an internal arc fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal arc fault situations leading to a sudden release of C4-FN mixtures and its gaseous by-products when evaluating health risk.

In case of leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to C4-FN mixtures and their gaseous by-products of C4-FN. The concentrations of these gases in the air should remain below their TWA values to present no threat to unprotected personnel during a normal working period of, for example, 8 h.

In case of a sudden release of C4-FN mixtures and their gaseous by-products due to an internal arc fault, the emergency procedure required by the local regulation can result in short-term exposure. By-product concentrations of higher levels would be tolerable if the exposure time is considerably reduced. In this case all possible sources of toxic emissions should be taken into account, and this requires detailed knowledge of all of the by-products formed. A full analysis should consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to C4-FN mixtures and their gaseous by-products.

The following subclauses give example calculations for evaluating the risks associated with the presence of by-products in terms of quantity and toxicity due to normal or abnormal leakage into the atmosphere. The quantities will depend on the gas composition, the contaminants and the arc energy introduced. More details and specific aspects should be described in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

F.9.2 Formation of by-products and health effects

F.9.2.1 Formation of by-products during arcing

As described in detail in Clause F.8 there are different ways in which by-products can be produced. In real electric power equipment, most of these processes happen in parallel, depending on the design and operation of the electric power equipment. For practical reasons the worst-case scenario should consider all produced by-products, independent of the quantity. This might lead to the situation that in some cases, some of the by-products are not produced, but a differentiation between the cases is much too complex. The by-products identified up to now are listed in Table F.13.

F.9.2.2 Effects of gas components and by-products on health

F.9.2.2.1 General

If arced C4-FN mixtures are exhausted into the workplace, the potential health risk will depend on the concentration of each gas component and by-product in the air, and hence on the volume of the room containing the electric power equipment. Toxicity estimations should take into account the concentration of each gas component and by-product in relation to the permissible concentration for the appropriate exposure time. The equation below should be adopted to calculate the total risk associated with the gas components and by-products (see F.9.2.4 for example calculations, which should be done for every gas component and by-product occurring).

$$Risk_{tot} = \sum_i \frac{\text{concentration (by-products)}_i}{\text{threshold (by-products)}_i} \leq 1$$

In principle there are four main cases, when contact with C4-FN mixtures including their by-products can happen:

- **normal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment within the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **abnormal leakage:** leaking of gases from the electric power equipment above the permissible leakage rates of for example 0,5 %/a or 0,1 %/a;
- **maintenance:** entering gas compartments after recovery of the C4-FN mixture for maintenance, repair or end-of-life treatment;
- **failure:** opening of a gas compartment due to an internal arc or an external fire.

The main difference is the concentration of C4-FN and by-products in the switchgear room. In case of an external fire or an internal arc failure, additional harmful substances might also be generated. These additional substances are not covered by this analysis, as they depend not only on the insulation gas, but also on the other materials used and on their behaviour in case of fire or high energy arcs.

NOTE Depending on the room size the leaked gases might temporarily not be homogeneously distributed in the switchgear room and locally higher concentrations might occur.

F.9.2.2.2 Health effects of arced C4-FN mixtures

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

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

- there is a synergetic effect between components which involves an increase of effects on health.

The total health risk to personnel, due to arced C4-FN mixtures, depends on the concentrations of each gas component and by-product generated. The quantity of by-products largely depends on the total amount of energy converted in the gas. Only in heavily arced C4-FN mixtures the concentration of by-products are expected to reach a level where precautions should be taken.

F.9.2.2.3 Exposure duration and dilution in air

There are two key elements essential to any evaluation of health risk to due to exposure to toxic substances:

- concentration of the substance in the surrounding volume;
- time duration of the exposure.

When a leakage situation is calculated, the TWA value should be used. An example of a TWA calculation is given in 3.1.28.

Exposure to measurable concentrations of gas components or by-products is not expected during normal operation of electric power equipment. Airborne concentrations of gas components or by-products are typically well below the TWA value for those substances.

In the event of a sudden release, such as the opening of a pressure relief device, e.g. because of an internal arc fault, personnel should immediately leave the switchgear room, resulting in short-term exposure to measurable concentrations of by-products. By leaving the room it can be avoided that personnel could potentially be exposed to concentrations of gas components or by-products above their C values, above their STEL values or above five times their TWA values.

Some OELs and LC50 values are given in Table F.13. A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

F.9.2.3 Quantitative estimation of gaseous by-products

The production rate of gaseous by-products formed during an electrical arc is generally referred to the energy in Joule dissipated in the gas. Experimental results are generally quoted in mol/J.

Tests should be performed to identify the production rates under different operating conditions and such, mathematical models can be developed for quantification. The following factors should be taken into account:

- chemical reaction with materials in contact with the gas (material incompatibilities);
- decomposition of the gas by electric arcs upon switching operations or by partial discharge.

Quantitative estimations should be done under worst case conditions, as after several switching operations in short time, and assuming, that the by-products are not adsorbed. In such a case the by-products will leak into the switchgear room with a leakage rate similar to the leakage rate of the original gas. The concentration of the by-products in the switchgear room can then be calculated by taking the same ratio as in the gas compartment into account.

Quantitative estimations done for electric power equipment which are not affected by short-circuit current switching have shown, that the concentration of any by-product in the switchgear room can be neglected.

The estimated concentration of by-products due to arcing in circuit-breakers should be provided by the electric power equipment manufacturer.

F.9.2.4 Procedures for health risk evaluation

F.9.2.4.1 General

The procedures for the evaluation of the potential effects on health of C4-FN mixtures and their gaseous by-products in normally or heavily arced C4-FN mixtures are based on the following assumptions:

- the switchgear room is completely closed;
- the gas emitted uniformly mixes with the air in the switchgear room in a short time with respect to the working day or exposure duration.

The evaluation of possible concentrations of by-products should be done by the electric power equipment manufacturer, taking into account worst case scenarios, as type tests of switches and end-of-life concentration (for HV gas circuit-breakers also conditions related to defined service intervals) and the results shared with the end-user. Using worst case conditions, the end user is always on the safe side. Actual figures can only be given by adequate gas sample analysis.

F.9.2.4.2 Normal leakage

In IEC 62271-1:2017, 6.16.1, the permissible leakage rate for gases used in switchgear are given. Often, smaller leakage rates are stated by the manufacturer of the electric power equipment and are verified during type tests. These tests cover all three aspects of leakage:

- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of static connections;
- gas leakage between interface surfaces (for example between seal and sealing surface) of dynamic connections, where gas is leaking during operation of translating or rotating shafts;
- permeation of gas through elastomer (for example seal) or thermoplastic material.

The permissible leakage rate is valid at an ambient temperature of 20 °C. For higher temperatures the permitted temporary leakage rate can be up to three times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15). This is mainly driven by the strong temperature dependence of gas permeation. Also, for temperatures below 0 °C, the permitted temporary leakage rate can be up to three or six times higher (see IEC 62271-1:2017, Table 15), which is mainly a result of the reduced flexibility of seals in dynamic connections.

To verify that the electric power equipment is free from manufacturing defects resulting in higher leakage rates, a routine tightness test is state of the art. However, this test typically only detects gas leakage between interfaces, due to its short duration (permeation effect can take weeks before becoming detectable). Routine tightness tests are sufficient to detect problems in manufacturing (where leaks at interfaces and not excessive permeation are the dominant cause).

The quantity of the leaked gas and its by-products can be calculated by knowing the leakage rate, the gas compartment volume, the total gas pressure and the time. The ventilation of the switchgear room plays an important role. Only at very low ventilation speeds or if there is no ventilation at all, the leaked gas and its by-products will accumulate in the switchgear room.

The permeation of the different components of a gas mixture can be different and depends on the specific permeation coefficient of the gas, which is related to the material and to the partial pressure difference of the gas components inside and outside of the gas compartment. For C4-FN gas mixtures the permeation of the different components is of the same order of magnitude for all components of the mixtures typically used. There is a tendency for small molecules to have higher permeation rates than large, complex molecules.

As permeation is a more or less constant effect over time and distributed on many locations of the gas compartment, a homogeneous mixing of the gas components within the switchgear room can be assumed.

Table F.14 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A switchgear is chosen, where a C4-FN mixture with a C4-FN concentration of 5 % is used as a quenching medium for making and breaking and therefore, normally arced C4-FN mixture is present.	
V_{eq}	Total gas volume of all gas compartments
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
F_{rel}	Permissible relative leakage rate
t	Time to ventilate the room
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$Q = V_{room} / t$	Room ventilation rate
$R_{total} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Total absolute leakage rate
$R = R_{total} \times x$	Absolute leakage rate of gas component or by-product
$y = R / Q$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table F.14 – Example calculation of a normal leakage

Gas component or by-product		C4-FN	CO
V_{eq}	[m ³]	39	39
V_{room}	[m ³]	1 700	1 700
p_{re}	[kPa]	850	850
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	50 000	10 000
F_{rel}	[%/year]	0,5	0,5
t	[year]	0,001	0,001
Q	[m ³ /year]	1 700 000	1 700 000
R_{total}	[m ³ /year]	1,66	1,66
R	[m ³ /year]	0,082 9	0,016 6
y	[µl/l (ppmv)]	0,048 8	0,009 75
TWA	[µl/l (ppmv)]	65	35
S		0,000 75	0,000 279
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

F.9.2.4.3 Abnormal leakage

Defects are the exception but cannot be entirely excluded. The main type of defect in this context is leakage due to defects in components that are normally gastight. This can be due to a damaged seal or a cracked bushing. These defects can lead to increased leakage rates; in the worst case, the overpressure can decrease to zero within weeks, days or even minutes. In this case, the amount of gas that leaks into the ambient air depends on the overpressure. As modern gas-insulated metal-enclosed switchgear are separated into several gastight gas compartments without gas connections, the amount of gas per gas compartment is limited. In most cases, this type of defect only affects one or two gas compartments.

Also, human error, such as drilling a hole in a gas compartment, accidentally opening a cover, or incorrect operation of a valve can lead to a gas loss and a reduction of the pressure in the gas compartment to ambient pressure.

This effect is a short-term effect and is concentrated at a defined location. The most important risk is of someone being present at this location at the time of the failure. In this case, the local concentration of gas components and by-products will be temporarily higher, but they will also dilute within a short time period within the switchgear room, finally yielding a homogeneous mixture. Simulations have shown that this will take between a few minutes to a few hours.

Electric power equipment, which is affected by an abnormal leakage, leading to a reduction of the pressure of the insulating gas to ambient pressure, should be shut down and earthed as soon as possible. This is to avoid unexpected flashover to earth inside the gas compartment which could generate an internal arc.

Table F.15 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate concentrations of gas components or by-products in the surrounding area. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A switchgear is chosen, where a C4-FN mixture with a C4-FN concentration of 5 % is used as a quenching medium for making and breaking and therefore, normally arced C4-FN mixture is present.	
This example is a worst case calculation, where all the overpressure inside the largest gas compartment of the electric power equipment is lost into the room within a short time, hence in a time which is much shorter than the time to ventilate the room, and therefore the calculation does not take the time to ventilate the room into account.	
In the case where the leakage rate is abnormal, but still in a measurable range of up to a few percent per day, the ventilation should be taken into account, and a similar calculation as shown in F.9.2.4.2 can be done.	
V_{comp}	Total gas volume of largest gas compartment
V_{room}	Total room volume
p_{re}	Filling pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Total leakage volume
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Leakage-volume of gas component or by-product
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration of gas component or by-product in the room
$S = y / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table F.15 – Example calculation of an abnormal leakage

Gas component or by-product		C4-FN	CO
V_{comp}	[m ³]	1,2	1,2
V_{room}	[m ³]	1 700	1 700
p_{re}	[kPa]	850	850
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	50 000	10 000
V_{tot}	[m ³]	9	9
V_{leak}	[m ³]	0,45	0,09
y	[µl/l (ppmv)]	264	52,9
TWA	[µl/l (ppmv)]	65	35
S		4,07	1,51
If $S \leq 1$: no action should be taken. If $1 < S \leq 3$: switchgear room should be left within 30 min. If $S > 3$: switchgear room should be left immediately. NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

F.9.2.4.4 Maintenance, service and repair within gas compartments

In case maintenance, service or repair should be performed on the electric power equipment containing C4-FN mixtures, the gas can contain gaseous by-products. Prior to opening of the gas compartments, the C4-FN mixture should be recovered, and the gas compartment flushed with ambient air. When opening the gas compartment, small concentrations of C4-FN and its by-products remain inside. The concentration depends on the pressure level that has been reached during recovery and on the concentration of the C4-FN and the by-products in the C4-FN mixture that have been recovered.

Table F.16 shows the results of an example calculation. The example calculation shows the systematic way on how to calculate remaining concentrations of gas components or by-products in the gas compartment after gas recovery. The results depend on various parameters and should be regarded separately for real installations.

Example calculation:	
A switchgear is chosen, where a C4-FN mixture with a C4-FN concentration of 5 % is used as a quenching medium for making and breaking and therefore, normally arced C4-FN mixture is present. After the complete recovery of the gas, down to the residual pressure p_{res} , by using a recovery unit as described in F.6.18, the gas compartment is flooded with ambient air and the concentration of the remaining gas components or by-products inside the gas compartment are calculated.	
p_{res}	Residual pressure
p_{am}	Ambient pressure
x	Concentration of gas component or by-product before recovery
TWA	TWA-value
Calculation steps:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Remaining concentration of gas component or by-product within gas compartment after recovery
$S = c / TWA$	Safety factor of gas component or by-product

Table F.16 – Example calculation for maintenance

Gas component or by-product		C4-FN	CO
p_{res}	[kPa]	0,5	0,5
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	50 000	10 000
c	[µl/l (ppmv)]	250	50
TWA	[µl/l (ppmv)]	65	35
S		3,85	1,43
If $S \leq 1$: no action should be taken.			
If $S > 1$: the gas compartment should be cleaned from possible solid by-products, where applicable, and sufficiently ventilated, before approaching it without full protection.			
NOTE The calculation method of this example can also be used to calculate leakage rates and concentrations of other gas components or by-products.			

F.9.2.4.5 Internal arc failure and/or external fire

The worst-case failure scenario that can occur in electric power equipment is an internal arc failure, which is caused by a defect or an operator error and results in an arc between the phases and/or between phase and ground that burns until the arc energy is interrupted by a circuit-breaker. Depending on the network, the released energy can be very high, which leads to a massive pressure increase inside the gas compartment. To avoid the uncontrolled cracking of the gas compartment, pressure relief devices open after a few milliseconds and the plasma produced by the internal arc is guided to the outside in a controlled way. In many cases pressure relief ducts are used to guide the plasma to areas where no direct contact with the operator can occur or even to the outside of the building. An internal arc event is typically limited to a single gas compartment. The entire amount of gas in the affected gas compartment is released. Due to the high temperature of the electric arc (10 000 °C to 20 000 °C), the gas molecules are decomposed, forming a plasma. As it cools down, the plasma created from the gas, evaporated metals, burnt insulation material, ambient air and humidity recombines and new molecules are formed.

External fire is a major failure that can also occur; it is normally not caused by the switchgear itself. The effect depends very much on whether or not the switchgear is energized. If not, the effect is similar to the case described in F.9.2.4.3, but might affect more than one gas compartment. In addition, the temperature rise caused by the external fire might lead to decomposition of the released gas. Due to heating of the gas by the high temperature of the fire, it is also possible that pressure relief devices open and release the contained gas. When the switchgear is energized, the opening of a gas compartment due to thermal overpressure caused by the heat of the fire will lead in a second phase to an internal arc. The effects of the fire and of the internal arc are then superimposed.

Regardless of whether or not the switchgear is energized, the quantity of released gas and the decomposition rate is highest in this scenario. In addition, the pollution of the switchgear room might be dominated by the by-products of burning plastics or evaporated and oxidised metals. Carbon monoxide and carbon dioxide will be present in high concentrations. These additional contaminants are independent of the insulation gas used. In an external fire also, materials are burning which are normally not affected by internal arc failures. These can be the secondary equipment including wiring and protection and control equipment and electronics. The used materials might create harmful by-products when burnt, which are independent of the type of switchgear and insulation gas.

Unlike in the case of the other scenarios, in the case of an internal arc or a fire, it is strongly recommended to leave the area immediately and not to enter it without personal protection and before the area has been sufficiently ventilated.

F.9.2.4.6 TWA values for gas components and by-products

The potential effect on health can be best estimated when looking at the TWA values of the gas components and the by-products and their related concentrations in the room or the area inside the room where personnel is located during the different scenarios described from F.9.2.4.2 to F.9.2.4.5.

TWA values of gas components are listed in Table F.17. TWA values of by-products are listed in Table F.13.

Table F.17 – TWA values of gas components

Gas component	Chemical formula	TWA [μl/l (ppmv)]
C4-FN	C ₄ F ₇ N	65
Carbondioxide	CO ₂	5 000

A general quantification cannot be given, due to the strong dependence on the switchgear design and the materials used. Additional by-products cannot be excluded for the same reason.

By-products with a low TWA value and a high concentration in the used gas call for careful attention and appropriate safety precautions.

F.9.2.5 Conclusion

The above examples of calculations demonstrate that normal leakage of electric power equipment using C4-FN mixtures cause no health risk due to exposure to by-products and to pure C4-FN or the carrier gases. The by-products, formed by arcing inside the electric power equipment, reach negligible concentrations in the workplace.

In the case of abnormal leakage situations, maintenance, service and repair, which are limited to single compartments, and if concentrations of by-products or pure C4-FN or carrier gases slightly above the TWA-value occur, adequate actions should be taken (e.g. additional ventilation, lower residual pressures, gas dilution, personal protection, etc.).

However, if an internal fault leads to a sudden release of heavily arced C4-FN mixtures, significant concentrations of by-products or pure C4-FN or carrier gases can occur in a switchgear room and it is strongly recommended to leave the switchgear room immediately. Basic safety procedures including evacuation rules are designed to ensure that personnel are exposed to exhausted materials for a time as short as possible. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure that the concentration levels can be reduced within minutes. Re-entering the switchgear room without protection is only possible when the concentration of the gas mixture and the by-products has fallen below their TWA value.

For outdoor installations and whatever type of leakage or release, the volume of air into which the heavily arced C4-FN mixture leaks is large and prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion.

The safety procedures need to be adapted for each individual installation, taking all aspects mentioned above into account.

F.10 Handling of C4-FN mixtures

F.10.1 General

The scope of this subclause is to address the particularities for handling of C4-FN mixtures during installation, commissioning, after repair or overhaul on site of electric power equipment.

C4-FN mixtures are used in electric power equipment for different voltage ranges and temperature ranges. Therefore, different mixing ratios, carrier gases and total pressures are used. The C4-FN concentration is typically between 2 % and 20 %.

The mixing ratio should be kept within the tolerances given in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer in order to guarantee the insulation and/or switching properties. See CIGRE Brochure 802 [1].

F.10.2 Filling gas compartments with C4-FN mixtures

F.10.2.1 General

Basically, three different procedures can be used for filling.

F.10.2.2 Sequential filling

The sequential filling procedure of a gas compartment with a C4-FN mixture is the following:

- Use the procedure as described in 4.2 to fill the gas compartment until the partial C4-FN filling pressure for insulation and/or switching is reached. Use a calibrated gauge for accurate measuring.
- Connect the carrier gas container and top-up the gas compartment to the filling pressure for insulation and/or switching. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling.

NOTE 1 Unless otherwise specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual, the vacuum duration can be prolonged in order to better remove humidity, when for example the ambient temperature is freezing.

NOTE 2 In case of more than one carrier gas, topping-up to the related partial filling pressure for insulation and/or switching added to the total pressure of the already contained gases is repeated for all gases.

NOTE 3 Due to the low vapour pressure, C4-FN is filled in first.

NOTE 4 Depending on the compartment design and dimension, temperature, filling pressure and mixing ratio it can take significant time for homogenisation of the mixture. This is considered before energizing.

F.10.2.3 Filling with a mixing device

As a second option and to reduce the probability of accidental mistakes, a gas mixing device can be used (see F.6.16).

F.10.2.4 Filling a premixed C4-FN mixture

As a third option, having a lower probability of accidental mistakes than the sequential filling method, premixed gases can be used (see F.6.17).

NOTE 1 If the mixture is partly liquefied, pre-heating of the container and adequate time for homogenisation are considered.

NOTE 2 The C4-FN concentration and the concentration of the carrier gas(es) according to the electric power equipment manufacturer documentation are used for the preparation of the premixed gas.

NOTE 3 Premixed gases can be obtained from the electric power equipment manufacturer.

F.10.3 Topping-up gas compartments with C4-FN mixtures to the filling pressure for insulation and/or switching

Topping-up procedures should be defined in the operating instruction manual of the electric power equipment manufacturer.

If not otherwise specified, the following procedure is recommended:

- check if the mixing ratio of the gas in the electric power equipment is within the specifications given by the manufacturer,
- topping-up according to 4.3 by using a gas mixing and filling device or a C4-FN mixture having the specified mixing ratio.

NOTE Premixed gases can be obtained from the electric power equipment manufacturer.

In case the mixing ratio of the gas in the electric power equipment is not within the specifications given by the manufacturer, either the C4-FN mixture should be replaced by a new C4-FN mixture or the mixture might be rectified according to F.10.6.

F.10.4 Checking the quality of C4-FN mixtures

F.10.4.1 General

4.2 is applicable.

During quality checking the electric power equipment should be inside the specified temperature range for operation given by the electric power equipment manufacturer to avoid partial liquefaction of the C4-FN, which would lead to wrong results in measuring the C4-FN concentration.

F.10.4.2 Long term variation of the composition of C4-FN mixtures

The composition of a C4-FN mixture in a gas compartment might vary slightly over time due to the combination of the following causes:

- different permeation rates of C4-FN and the carrier gas(es);
- different decomposition rates of C4-FN and the carrier gas(es) due to chemical reaction, for example with materials;
- different decomposition rates of C4-FN and the carrier gas(es) due to electric arcs.

The manufacturer of the electric power equipment should take care that the variation of the composition is inside the specification of the composition for the entire lifetime of the electric power equipment or in case scheduled maintenance of the electric power equipment is required for the entire time between two overhauls.

F.10.4.3 Tolerance on the composition of C4-FN mixtures

The tolerance on the composition of a C4-FN mixture should be specified by the electric power equipment manufacturer in the operating instruction manual.

F.10.5 Recovery and reclaim of C4-FN mixtures

Clause F.7 is applicable.

F.10.6 Rectifying the composition of C4-FN mixtures

The procedure for rectifying the composition of C4-FN mixtures with a carrier gas in a concentration not complying with the specifications given by the electric power equipment manufacturer should be described in the operating instruction manual. If not otherwise specified, the following should be applied:

For rectifying the composition of a C4-FN mixture, the C4-FN mixture with the wrong mixing ratio should be recovered completely and then the gas compartment should be filled with the correct mixing ratio.

NOTE The method described in B.10.6 or D.10.6.1 for binary gas mixtures cannot always be used for C4-FN mixtures, because the maximum vapour pressure of the C4-FN could be below the pressure in the gas compartment.

F.11 Specifications for C4-FN mixtures needed for filling or topping-up electric power equipment

The maximum level of contaminants for C4-FN mixtures to be filled in electric power equipment or with which electric power equipment should be topped-up, should be specified by the electric power equipment manufacturer.

Bibliography

- [1] CIGRE Brochure 802. (2020). Application of non-SF₆ gases or gas-mixtures in medium and high voltage gas-insulated switchgear. CIGRE WG B3.45
- [2] SOLVAY FLUOR GMBH. *Sulphur Hexafluoride Brochure*. 2006
- [3] EN 166:2001, *Personal eye-protection – Specifications*
- [4] EN 140:1999, *Respiratory protective devices – Half masks and quarter masks – Requirements, testing, marking*
- [5] EN 14387:2021, *Respiratory protective devices – Gas filter(s) and combined filter(s) – Requirements, testing, marking*
- [6] EN 143:2021, *Respiratory protective devices – Particle filters – Requirements, testing, marking*
- [7] EN 136:1998, *Respiratory protective devices – Full face masks – Requirements, testing, marking*
- [8] Regulation (EU) No 517/2014 of the european parliament and of the council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing regulation (EC) No 842/2006
- [9] Commission implementing regulation (EU) 2015/2066 of 17 November 2015 establishing, pursuant to regulation (EU) No 517/2014 of the european parliament and of the council, minimum requirements and the conditions for mutual recognition for the certification of natural persons carrying out installation, servicing, maintenance, repair or decommissioning of electrical switchgear containing fluorinated greenhouse gases or recovery of fluorinated greenhouse gases from stationary electrical switchgear
- [10] EN 1089-3:2011, *Transportable gas cylinders – Gas cylinder identification (excluding LPG) – Part 3: Colour coding*
- [11] CIGRE Brochure 163. (2000, March). Guide for SF₆ gas mixtures. CIGRE WG 23.02
- [12] CIGRE Brochure 730. (2018, June). Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated systems. CIGRE WG D1.51
- [13] CIGRE Brochure 430. (2010). SF₆ tightness guide
- [14] IEC/IEEE 82079-1:2019, *Preparation of information for use (instructions for use) of products – part 1: principles and general requirements*
- [15] IEC TR 60943, *Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals*
- [16] STOLLER, SEEGER, IORDANIDIS, NAIDIS. CO₂ as an Arc Interruption Medium in Gas Circuit Breakers. IEEE Transactions on Plasma Science. 2013, Vol. 41, No. 8, 2359-2369
- [17] UCHII, KAWANO, NAKAMOTO, MIZOGUCHI. Fundamental Properties of CO₂ Gas as an Arc Quenching Medium and Thermal Interruption Performance of Full-Scale GCB Model. IEEE Transactions on Power and Energy. 2004, Vol. 124, No. 3, 469-475

- [18] UCHIL, et. al. *Thermal Interruption Capabilities of CO₂ Gas and CO₂-Based Gas Mixtures*. 18th international Conference on Gas Discharges and their Applications, (pp. 78-81). 2010
- [19] *Extension of oxygen tolerance. Symposium in honor of Christian J. Lambertsen, MD. Philadelphia, Pennsylvania, May 26, 1987. Proceedings*
- [20] United Nations, 2017, *ADR, European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*. Available at: <https://unece.org/transportdangerous-goods/adr-2017-files>
- [21] 3M. *3M Novec 5110 Insulating Gas, Application of read-across techniques*. Health & Safety Bulletin. December, 2019. Available at: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1812232O/3m-novec-5110-health-safety-bulletin.pdf>
- [22] ECHA. *Assessing read-across – how ECHA does it*. 2015. Available at: <https://echa.europa.eu/de/-/assessing-read-across-how-echa-does-it>
- [23] REN, BERNARD, DAELE, MELLOUKI. *Atmospheric Fate and Impact of Perfluorinated Butanone and Pentanone*. Environmental Science and Technology. 2019, 8862-8871
- [24] BLAZQUEZ, ANTINOLO, NIELSEN, ALBALADEJO, JIMENEZ. *Reaction kinetics of (CF₃)₂CFCN with OH radicals as a function of temperature (278–358 K): A good replacement for greenhouse SF₆?* Chemical Physics Letters. 2017, 687, 297-302
- [25] KIEFFEL, BIQUEZ, VIGOUROUX, PONCHON, SCHLERNITZAUER, MAGOUS, CROS, OWENS. *Characteristics of g³ – an alternative to SF₆*. 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow. 2017
- [26] IEC 62474:2018, Material declaration for products of and for the electrotechnical industry
IEC 62474:2018/AMD1:2020
- [27] *European regulation 514*, 2014: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0517&qid=1608306002561>
- [28] *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 2013: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	253
INTRODUCTION.....	255
1 Domaine d'application	256
2 Références normatives	256
3 Termes et définitions	257
3.1 Termes généraux et définitions	257
3.2 Termes et définitions pour SF ₆	262
3.3 Termes et définitions pour les mélanges de SF ₆	263
3.4 Termes et définitions pour l'air comprimé	264
3.5 Termes et définitions pour les gaz d'origine naturelle	265
3.6 Termes et définitions pour le C ₅ F ₁₀ O (C5-FK) dans les mélanges avec N ₂ , CO ₂ , O ₂ (mélanges C5-FK)	266
3.7 Termes et définitions pour le C ₄ F ₇ N (C4-FN) dans les mélanges avec N ₂ , CO ₂ , O ₂ (mélanges C4-FN)	267
4 Manipulation du gaz au cours de l'installation, la mise en service et après la réparation ou la révision sur site	268
4.1 Généralités	268
4.2 Évacuation, remplissage et vérification de la qualité	269
4.3 Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	272
4.4 Remplissage des systèmes à pression scellé	274
5 Manipulation du gaz pendant la durée de vie normale	274
5.1 Remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	274
5.2 Vérification de la qualité du gaz	276
5.2.1 Généralités	276
5.2.2 Mesurage sur site de la qualité des gaz au moyen d'appareils de mesure portables	276
5.2.3 Échantillonnage et transport du gaz pour une analyse hors site	277
5.3 Rectification de la composition d'un mélange de gaz	278
6 Récupération et régénération des gaz au cours des opérations de maintenance, de réparation, de révision ou de démontage sur site	278
6.1 Généralités	278
6.2 Récupération et régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz	279
6.3 Récupération et régénération depuis un quelconque compartiment sous gaz contenant un gaz fortement décomposé	281
7 Fin de vie de l'appareillage électrique	283
7.1 Généralités	283
7.2 Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue	284
7.3 Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés	284
7.4 Récupération et régénération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés	285
7.5 Démontage de l'appareillage électrique (informative)	289
Annexe A (informative) Hexafluorure de soufre (SF ₆)	291
A.1 Propriétés gazeuses	291
A.2 Sécurité et premiers soins	291

A.2.1	Généralités	291
A.2.2	Protection du personnel	293
A.2.3	Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	294
A.2.4	Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression	294
A.2.5	Équipement de sécurité et de protection du personnel	294
A.2.6	Équipements et services	295
A.2.7	Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de SF ₆	295
A.2.8	Équipements et traitement de premiers soins	296
A.3	Impact sur l'environnement	297
A.4	Formation et certification	297
A.4.1	Généralités	297
A.4.2	Formation	297
A.4.3	Certification	299
A.5	Stockage et transport	299
A.5.1	Généralités	299
A.5.2	Stockage des récipients remplis de SF ₆	299
A.5.3	Transport des récipients remplis de SF ₆	300
A.5.4	Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du SF ₆	301
A.5.5	Responsabilités	302
A.6	Description des appareils de manipulation	302
A.6.1	Généralités	302
A.6.2	Filtres	303
A.6.3	Pompe à vide	304
A.6.4	Compresseur principal et à vide	305
A.6.5	Compresseur de sortie	305
A.6.6	Récipients de stockage de gaz externes et internes	305
A.6.7	Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz	305
A.6.8	Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	306
A.6.9	Instruments de contrôle	306
A.6.10	Soupapes de sûreté	306
A.6.11	Connexions de tuyaux flexibles	306
A.6.12	Dispositifs portables de mesure de gaz	306
A.6.13	Contrôleur de fuite de gaz	309
A.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	309
A.6.15	Bouteilles d'échantillonnage de gaz	309
A.7	Procédures de régénération	309
A.8	Produits de décomposition	309
A.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé	310
A.10	Manipulation du SF ₆	310
A.10.1	Généralités	310
A.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec du SF ₆	310
A.10.3	Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec du SF ₆ à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	310
A.10.4	Vérification de la qualité du SF ₆	310
A.10.5	Récupération et régénération du SF ₆	310

A.11	Spécifications du SF ₆ nécessaire au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique.....	310
Annexe B	(informative) Mélanges de SF ₆	311
B.1	Propriétés gazeuses	311
B.1.1	Généralités	311
B.1.2	Propriétés chimiques	311
B.1.3	Propriétés physiques	312
B.1.4	Comportement d'isolation et de commutation.....	312
B.2	Sécurité et premiers soins	313
B.2.1	Généralités	313
B.2.2	Protection du personnel.....	313
B.2.3	Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	313
B.2.4	Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression.....	313
B.2.5	Équipement de sécurité et de protection du personnel.....	313
B.2.6	Équipements et services.....	313
B.2.7	Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de mélanges de SF ₆	313
B.2.8	Équipements et traitement de premiers soins	313
B.3	Impact sur l'environnement	313
B.4	Formation et certification	314
B.4.1	Généralités	314
B.4.2	Formation	314
B.4.3	Certification	314
B.5	Stockage et transport.....	314
B.5.1	Généralités	314
B.5.2	Stockage des récipients remplis de mélange de SF ₆	315
B.5.3	Transport des récipients remplis de mélange de SF ₆	317
B.5.4	Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du mélange de SF ₆	319
B.5.5	Responsabilités	319
B.6	Description des appareils de manipulation	319
B.6.1	Généralités	319
B.6.2	Filtres	321
B.6.3	Pompe à vide	321
B.6.4	Compresseur principal et à vide.....	321
B.6.5	Compresseur de sortie	321
B.6.6	Récipients de stockage de gaz externes et internes	321
B.6.7	Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz.....	321
B.6.8	Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	321
B.6.9	Instruments de contrôle	321
B.6.10	Soupapes de sûreté.....	321
B.6.11	Connexions de tuyaux flexibles.....	321
B.6.12	Dispositifs portables de mesure de gaz	321
B.6.13	Contrôleur de fuite de gaz	322
B.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	323
B.6.15	Bouteilles d'échantillonnage de gaz	323
B.6.16	Unité de mélange de gaz	323
B.7	Procédures de régénération	323

B.8	Produits de décomposition	323
B.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé	323
B.10	Manipulation des mélanges de SF ₆	324
B.10.1	Généralités	324
B.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec du mélange de SF ₆	324
B.10.3	Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec des mélanges de SF ₆ à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	325
B.10.4	Vérification de la qualité des mélanges de SF ₆	325
B.10.5	Récupération et régénération des mélanges de SF ₆	326
B.10.6	Rectification de la composition des mélanges de SF ₆	326
B.11	Spécifications des mélanges de SF ₆ nécessaires au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique	327
Annexe C (informative)	Air comprimé	328
C.1	Propriétés gazeuses	328
C.1.1	Généralités	328
C.1.2	Propriétés chimiques	328
C.1.3	Propriétés physiques	328
C.1.4	Comportement d'isolation et de commutation	329
C.2	Sécurité et premiers soins	329
C.2.1	Généralités	329
C.2.2	Protection du personnel	330
C.2.3	Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	331
C.2.4	Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression	332
C.2.5	Équipement de sécurité et de protection du personnel	332
C.2.6	Équipements et services	333
C.2.7	Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain d'air comprimé	333
C.2.8	Équipements et traitement de premiers soins	333
C.3	Impact sur l'environnement	334
C.3.1	Généralités	334
C.3.2	Écotoxicologie	334
C.3.3	Appauvrissement en ozone	335
C.3.4	Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)	335
C.3.5	Impact des produits de décomposition sur l'environnement	335
C.4	Formation et certification	335
C.4.1	Généralités	335
C.4.2	Formation	336
C.4.3	Certification	337
C.5	Stockage et transport	337
C.5.1	Généralités	337
C.5.2	Stockage des récipients remplis d'air comprimé	337
C.5.3	Transport des récipients remplis d'air comprimé	338
C.5.4	Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé	339
C.5.5	Responsabilités	339
C.6	Description des appareils de manipulation	339
C.6.1	Généralités	339

C.6.2	Filtres	340
C.6.3	Pompe à vide	341
C.6.4	Compresseurs principal et à vide	342
C.6.5	Compresseur de sortie	342
C.6.6	Récipients de stockage de gaz externes et internes	342
C.6.7	Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz.....	342
C.6.8	Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	342
C.6.9	Instruments de contrôle	343
C.6.10	Soupapes de sûreté.....	343
C.6.11	Connexions de tuyaux flexibles.....	343
C.6.12	Dispositifs portables de mesure de gaz	343
C.6.13	Contrôleur de fuite de gaz	345
C.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	345
C.6.15	Bouteilles d'échantillonnage de gaz	345
C.6.16	Appareil de purification et de remplissage de gaz	345
C.7	Procédures de régénération	346
C.7.1	Généralités	346
C.7.2	Recommandations en matière de filtrage	346
C.7.3	Transport par route d'air comprimé usagé dans des bouteilles de gaz et des récipients	347
C.8	Produits de décomposition	347
C.8.1	Généralités	347
C.8.2	Décomposition de l'air comprimé	348
C.8.3	Comportement de corrosion de l'air comprimé et de ses produits de décomposition	349
C.8.4	Mesures pour le retrait des produits de décomposition	349
C.8.5	Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition	349
C.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé	350
C.9.1	Généralités	350
C.9.2	Formation de produits de décomposition et effets sur la santé	351
C.10	Manipulation de l'air comprimé.....	361
C.10.1	Généralités	361
C.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec de l'air comprimé	361
C.10.3	Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec de l'air comprimé à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la coupure.....	361
C.10.4	Vérification de la qualité de l'air comprimé.....	362
C.10.5	Récupération et régénération des mélanges contenant de l'air comprimé.....	362
C.11	Spécifications de l'air comprimé nécessaire au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique	362
Annexe D (informative)	Gaz d'origine naturelle	363
D.1	Propriétés gazeuses	363
D.1.1	Généralités	363
D.1.2	Propriétés chimiques	363
D.1.3	Propriétés physiques	363
D.1.4	Comportement d'isolation et de commutation.....	364
D.2	Sécurité et premiers soins	365
D.2.1	Généralités	365
D.2.2	Protection du personnel.....	366

D.2.3	Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	368
D.2.4	Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression	368
D.2.5	Équipement de sécurité et de protection du personnel	368
D.2.6	Équipements et services	370
D.2.7	Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de gaz d'origine naturelle	370
D.2.8	Équipements et traitement de premiers soins	370
D.3	Impact sur l'environnement	371
D.3.1	Généralités	371
D.3.2	Écotoxicologie	371
D.3.3	Appauvrissement en ozone	372
D.3.4	Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)	372
D.3.5	Impact des produits de décomposition sur l'environnement	372
D.4	Formation et certification	373
D.4.1	Généralités	373
D.4.2	Formation	373
D.4.3	Certification	374
D.5	Stockage et transport	374
D.5.1	Généralités	374
D.5.2	Stockage des récipients remplis de gaz d'origine naturelle	375
D.5.3	Transport des récipients remplis de gaz d'origine naturelle	376
D.5.4	Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle	377
D.5.5	Responsabilités	378
D.6	Description des appareils de manipulation	378
D.6.1	Généralités	378
D.6.2	Filtres	381
D.6.3	Pompe à vide	382
D.6.4	Compresseur principal et à vide	382
D.6.5	Compresseur de sortie	383
D.6.6	Récipient de stockage de gaz externe et interne	383
D.6.7	Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz	383
D.6.8	Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	383
D.6.9	Instruments de contrôle	383
D.6.10	Soupapes de sûreté	384
D.6.11	Connexions de tuyaux flexibles	384
D.6.12	Dispositifs portables de mesure de gaz	384
D.6.13	Contrôleur de fuite de gaz	386
D.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	386
D.6.15	Bouteilles d'échantillonnage de gaz	387
D.6.16	Unité de mélange de gaz	387
D.6.17	Unité de remplissage de gaz	387
D.6.18	Unité de récupération de gaz	387
D.6.19	Dispositifs de stockage et de transport du gaz usagé	387
D.7	Procédures de régénération	388
D.7.1	Généralités	388
D.7.2	Recommandations en matière de filtrage	388
D.7.3	Transport par route de gaz d'origine naturelle usagés dans des bouteilles de gaz et des récipients	389
D.8	Produits de décomposition	389

D.8.1	Généralités	389
D.8.2	Décomposition des gaz d'origine naturelle	390
D.8.3	Comportement de corrosion des gaz d'origine naturelle et de leurs produits de décomposition	390
D.8.4	Mesures pour le retrait des produits de décomposition	391
D.8.5	Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition	391
D.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des composants gazeux et des produits de décomposition sur la santé	392
D.9.1	Généralités	392
D.9.2	Formation de produits de décomposition et effets sur la santé	392
D.10	Manipulation des gaz d'origine naturelle	403
D.10.1	Généralités	403
D.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec des gaz d'origine naturelle	403
D.10.3	Complément de remplissage de compartiments sous gaz avec des gaz d'origine naturelle	404
D.10.4	Vérification de la qualité des gaz d'origine naturelle	405
D.10.5	Récupération et régénération des gaz d'origine naturelle	405
D.10.6	Rectification de la composition des mélanges de gaz d'origine naturelle	405
D.11	Spécifications des gaz d'origine naturelle nécessaires au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique	406
Annexe E (informative)	C ₅ F ₁₀ O (C5-FK) dans les mélanges avec N ₂ , CO ₂ , O ₂ (mélanges C5-FK)	407
E.1	Propriétés gazeuses	407
E.1.1	Généralités	407
E.1.2	Propriétés chimiques	407
E.1.3	Propriétés physiques	408
E.1.4	Comportement d'isolation et de commutation	409
E.2	Sécurité et premiers soins	409
E.2.1	Généralités	409
E.2.2	Protection du personnel	411
E.2.3	Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	413
E.2.4	Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression	414
E.2.5	Équipement de sécurité et de protection du personnel	414
E.2.6	Équipements et services	415
E.2.7	Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de mélanges de C5-FK	415
E.2.8	Équipements et traitement de premiers soins	415
E.3	Impact sur l'environnement	416
E.3.1	Généralités	416
E.3.2	Écotoxicologie	416
E.3.3	Appauvrissement en ozone	417
E.3.4	Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)	417
E.3.5	Impact des produits de décomposition sur l'environnement	417
E.3.6	Décomposition par les ultraviolets dans l'atmosphère supérieure	418
E.4	Formation et certification	418
E.4.1	Généralités	418
E.4.2	Formation	418
E.4.3	Certification	419
E.5	Stockage et transport	420

E.5.1	Généralités	420
E.5.2	Stockage des récipients remplis de C5-FK ou de mélanges de C5-FK	420
E.5.3	Transport des récipients remplis de C5-FK ou de mélanges de C5-FK	422
E.5.4	Stockage et transport de l'appareillage électrique rempli de mélanges de C5-FK	425
E.5.5	Responsabilités	425
E.6	Description des appareils de manipulation	425
E.6.1	Généralités	425
E.6.2	Filtres	429
E.6.3	Pompe à vide	430
E.6.4	Compresseur principal et à vide	430
E.6.5	Compresseur de sortie	430
E.6.6	Récipients de stockage de gaz externes et internes	431
E.6.7	Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz	431
E.6.8	Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	431
E.6.9	Instruments de contrôle	431
E.6.10	Soupapes de sûreté	431
E.6.11	Connexions de tuyaux flexibles	431
E.6.12	Dispositifs portables de mesure de gaz	432
E.6.13	Contrôleur de fuite de gaz	434
E.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	434
E.6.15	Bouteilles d'échantillonnage de gaz	434
E.6.16	Unité de mélange de gaz	435
E.6.17	Unité de remplissage de gaz	435
E.6.18	Unité de récupération de gaz	435
E.6.19	Dispositifs de stockage et de transport du gaz usagé	436
E.7	Procédures de régénération	436
E.8	Produits de décomposition	436
E.8.1	Généralités	436
E.8.2	Décomposition des mélanges de C5-FK	436
E.8.3	Comportement de corrosion des mélanges de C5-FK et de leurs produits de décomposition	438
E.8.4	Mesures pour le retrait des produits de décomposition	439
E.8.5	Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition	439
E.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des composants gazeux et des produits de décomposition sur la santé	440
E.9.1	Généralités	440
E.9.2	Formation de produits de décomposition et effets sur la santé	440
E.10	Manipulation des mélanges de C5-FK	450
E.10.1	Généralités	450
E.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec des mélanges de C5-FK	450
E.10.3	Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec des mélanges de C5-FK à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	451
E.10.4	Vérification de la qualité des mélanges de C5-FK	451
E.10.5	Récupération et régénération des mélanges de C5-FK	452
E.10.6	Rectification de la composition des mélanges de C5-FK	452
E.11	Spécifications des mélanges de C5-FK nécessaires au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique	453

Annexe F (informative) C₄F₇N (C4-FN) dans les mélanges avec N₂, CO₂, O₂

(mélanges C4-FN)	454
F.1 Propriétés gazeuses	454
F.1.1 Généralités	454
F.1.2 Propriétés chimiques	454
F.1.3 Propriétés physiques	455
F.1.4 Comportement d'isolation et de commutation	456
F.2 Sécurité et premiers soins	456
F.2.1 Généralités	456
F.2.2 Protection du personnel	457
F.2.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés	459
F.2.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression	459
F.2.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel	460
F.2.6 Équipements et services	461
F.2.7 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de mélanges de C4-FN	461
F.2.8 Équipements et traitement de premiers soins	461
F.3 Impact sur l'environnement	462
F.3.1 Généralités	462
F.3.2 Écotoxicologie	462
F.3.3 Appauvrissement en ozone	463
F.3.4 Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)	463
F.3.5 Impact des produits de décomposition sur l'environnement	463
F.3.6 Décomposition par les ultraviolets dans l'atmosphère supérieure	463
F.4 Formation et certification	464
F.4.1 Généralités	464
F.4.2 Formation	464
F.4.3 Certification	465
F.5 Stockage et transport	465
F.5.1 Généralités	465
F.5.2 Stockage des récipients remplis de C4-FN ou de mélanges de C4-FN	466
F.5.3 Transport des récipients remplis de C4-FN ou de mélanges de C4-FN	468
F.5.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique rempli de mélanges de C4-FN	470
F.5.5 Responsabilités	471
F.6 Description des appareils de manipulation	471
F.6.1 Généralités	471
F.6.2 Filtres	473
F.6.3 Pompe à vide	474
F.6.4 Compresseurs principal et à vide	475
F.6.5 Compresseur de sortie	475
F.6.6 Récipients de stockage de gaz externes et internes	475
F.6.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz	476
F.6.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries	476
F.6.9 Instruments de contrôle	476
F.6.10 Soupapes de sûreté	476
F.6.11 Connexions de tuyaux flexibles	476
F.6.12 Dispositifs portables de mesure de gaz	476
F.6.13 Contrôleur de fuite de gaz	479

F.6.14	Systèmes d'alarme de concentration en gaz	479
F.6.15	Bouteille d'échantillonnage de gaz	479
F.6.16	Unité de mélange de gaz	479
F.6.17	Unité de remplissage de gaz	480
F.6.18	Unité de récupération de gaz	480
F.6.19	Dispositifs de stockage et de transport du gaz usagé	480
F.7	Procédures de régénération	481
F.8	Produits de décomposition	481
F.8.1	Généralités	481
F.8.2	Décomposition des mélanges de C4-FN	481
F.8.3	Comportement de corrosion des mélanges de C4-FN et de leurs produits de décomposition	483
F.8.4	Mesures pour le retrait des produits de décomposition	483
F.8.5	Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition	484
F.9	Procédure d'évaluation des effets potentiels des composants gazeux et des produits de décomposition sur la santé	484
F.9.1	Généralités	484
F.9.2	Formation de produits de décomposition et effets sur la santé	485
F.10	Manipulation des mélanges de C4-FN	495
F.10.1	Généralités	495
F.10.2	Remplissage de compartiments sous gaz avec des mélanges de C4-FN	496
F.10.3	Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec des mélanges de C4-FN à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	497
F.10.4	Vérification de la qualité des mélanges de C4-FN	497
F.10.5	Récupération et régénération des mélanges de C4-FN	497
F.10.6	Rectification de la composition des mélanges de C4-FN	498
F.11	Spécifications des mélanges de C4-FN nécessaires au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique	498
	Bibliographie	499
	Figure 1 – Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du gaz après remplissage	270
	Figure 2 – Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	273
	Figure 3 – Complément de remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	275
	Figure 4 – Exemple de récupération et de régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz	280
	Figure 5 – Exemple de récupération et de régénération des gaz fortement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz	282
	Figure 6 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue	284
	Figure 7 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés	285
	Figure 8 – Récupération et régénération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés	286
	Figure 9 – Méthode de dilution	288
	Figure 10 – Démontage d'un appareillage électrique	289
	Figure A.1 – Schéma pression-température-densité du SF ₆	291
	Figure A.2 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du SF ₆	303

Figure B.1 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du mélange de SF ₆	320
Figure C.1 – Rejet contrôlé d'air comprimé	340
Figure C.2 – Exemple d'appareil de purification et de remplissage de gaz	346
Figure D.1 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation des gaz d'origine naturelle	380
Figure E.1 – Structure de la molécule de C5-FK	407
Figure E.2 – Courbe de pression de vapeur du C5-FK	408
Figure E.3 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du mélange de C5-FK	427
Figure F.1 – Structure de la molécule de C4-FN	454
Figure F.2 – Courbe de pression de vapeur du C4-FN	455
Figure F.3 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du mélange de C4-FN	472
Tableau 1 – Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du gaz après	271
Tableau 2 – Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	274
Tableau 3 – Complément de remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	276
Tableau 4 – Échantillonnage et transport des gaz	278
Tableau 5 – Exemple de récupération et de régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz	281
Tableau 6 – Exemple de récupération et de régénération de gaz fortement décomposé depuis un quelconque compartiment sous gaz	283
Tableau 7 – Récupération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés.....	287
Tableau A.1 – Mesures à appliquer pour toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF ₆	292
Tableau A.2 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz.....	293
Tableau A.3 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport du SF ₆	300
Tableau A.4 – Règlements internationaux applicables au transport du SF ₆	301
Tableau A.5 – Dispositifs de mesure de gaz	307
Tableau B.1 – Principales caractéristiques chimiques du CF ₄ et N ₂	311
Tableau B.2 – Principales caractéristiques physiques du CF ₄ et N ₂	312
Tableau B.3 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport des mélanges de SF ₆ et de leurs gaz complémentaires	316
Tableau B.4 – Règlements internationaux applicables au transport des mélanges de SF ₆	318
Tableau B.5 – Dispositifs de mesure de gaz	322
Tableau C.1 – Principales caractéristiques chimiques du N ₂ et de l'O ₂	328
Tableau C.2 – Principales caractéristiques physiques du N ₂ et de l'O ₂	329
Tableau C.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé	330

Tableau C.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz	331
Tableau C.5 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport de l'air comprimé	338
Tableau C.6 – Règlements internationaux applicables au transport d'air comprimé de qualité technique et usagé	339
Tableau C.7 – Types de filtres classiques utilisés lors du rejet de l'air comprimé dans l'atmosphère	341
Tableau C.8 – Dispositifs de mesure de gaz	343
Tableau C.9 – Exemples de méthodes de filtrage	347
Tableau C.10 – Absorbants types des différents polluants de l'air comprimé	347
Tableau C.11 – OEL pour NO ₂ , NO, O ₃ et HNO ₃	353
Tableau C.12 – Exemple de calcul d'une fuite normale	356
Tableau C.13 – Exemple de calcul d'une fuite anormale	358
Tableau C.14 – Exemple de calcul pour la maintenance	359
Tableau D.1 – Principales caractéristiques chimiques de N ₂ , O ₂ et CO ₂	363
Tableau D.2 – Caractéristiques physiques types du N ₂ , O ₂ et CO ₂	364
Tableau D.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle	365
Tableau D.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz	367
Tableau D.5 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport de gaz d'origine naturelle	376
Tableau D.6 – Règlements internationaux applicables au transport de gaz d'origine naturelle	377
Tableau D.7 – Types de filtres classiques utilisés lors du rejet des gaz d'origine naturelle dans l'atmosphère	381
Tableau D.8 – Dispositifs de mesure de gaz	384
Tableau D.9 – Exemples d'opérations de filtrage	389
Tableau D.10 – Absorbants types des différents polluants des gaz d'origine naturelle	389
Tableau D.11 – OEL pour NO ₂ , NO, O ₃ , CO et HNO ₃	395
Tableau D.12 – Exemple de calcul d'une fuite normale	398
Tableau D.13 – Exemple de calcul d'une fuite anormale	400
Tableau D.14 – Exemple de calcul pour la maintenance	401
Tableau E.1 – Principales caractéristiques chimiques du C5-FK	408
Tableau E.2 – Principales caractéristiques physiques du C5-FK	409
Tableau E.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant des mélanges de C5-FK	410
Tableau E.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz	412
Tableau E.5 – Méthodes de stockage du C5-FK	420
Tableau E.6 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport du C5-FK	421
Tableau E.7 – Méthodes de stockage des mélanges de C5-FK	421
Tableau E.8 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport des mélanges de C5-FK	422

Tableau E.9 – Règlements internationaux applicables au transport du C5-FK	422
Tableau E.10 – Règlements internationaux applicables au transport des mélanges de C5-FK	424
Tableau E.11 – Types de filtres classiques	429
Tableau E.12 – Dispositifs de mesure de gaz	432
Tableau E.13 – Limites d'exposition professionnelle et valeurs LC50 des produits de décomposition des mélanges de C5-FK	438
Tableau E.14 – Exemple de calcul d'une fuite normale	445
Tableau E.15 – Exemple de calcul d'une fuite anormale.....	447
Tableau E.16 – Exemple de calcul pour la maintenance.....	448
Tableau E.17 – Valeurs TWA des composants gazeux.....	449
Tableau F.1 – Principales caractéristiques chimiques du C4-FN	455
Tableau F.2 – Principales caractéristiques physiques du C4-FN	456
Tableau F.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant des mélanges de C4-FN	457
Tableau F.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz	458
Tableau F.5 – Méthode de stockage du C4-FN	466
Tableau F.6 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport du C4-FN	466
Tableau F.7 – Méthodes de stockage des mélanges de C4-FN	467
Tableau F.8 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport des mélanges de C4-FN	468
Tableau F.9 – Règlements internationaux applicables au transport du C4-FN	468
Tableau F.10 – Règlements internationaux applicables au transport des mélanges de C4-FN	470
Tableau F.11 – Types de filtres classiques	474
Tableau F.12 – Dispositifs de mesure de gaz.....	477
Tableau F.13 – Limites d'exposition professionnelle et valeurs LC50 des produits de décomposition des mélanges de C4-FN	482
Tableau F.14 – Exemple de calcul d'une fuite normale.....	490
Tableau F.15 – Exemple de calcul d'une fuite anormale.....	492
Tableau F.16 – Exemple de calcul pour la maintenance.....	493
Tableau F.17 – Valeurs TWA des composants gazeux.....	495

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 4: Procédures de manipulation des gaz pour l'isolation et/ou la commutation

AVANT-PROPOS

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

L'IEC 62271-4 a été établie par le comité d'études 17 de l'IEC: Appareillage haute tension. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette seconde édition annule et remplace la première édition de l'IEC 62271-4 parue en 2013. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) l'intitulé a été modifié;
- b) les procédures de manipulation des alternatives au SF₆, utilisés pour l'isolation et/ou la commutation, sont ajoutées;
- c) les principaux articles sont indépendants du type de gaz;
- d) pour chaque gaz, une annexe distincte présente les informations spécifiques au gaz, les procédures de manipulation, les mesures de sécurité, etc.;
- e) les informations relatives au SF₆ (ancienne Annexe E) et aux effets sur l'environnement du SF₆ et de ses mélanges (ancienne Annexe F) ont été déplacées vers l'IEC 60376;
- f) les informations relatives aux produits de décomposition du SF₆ et de ses mélanges (ancienne Annexe G), la procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition du SF₆ et de ses mélanges (ancienne Annexe H) et la régénération cryogénique du SF₆ (ancienne Annexe I) ont été déplacées vers l'IEC 60480.

Le texte de la présente Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
17/1124/FDIS	17/1125/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62271, publiées sous le titre général *Appareillage à haute tension*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le présent document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

Le comité a décidé que le contenu du présent document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous <http://webstore.iec.ch> dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

INTRODUCTION

La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec les dispositions du présent document peut impliquer l'utilisation d'un brevet. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits de propriété a donné l'assurance à l'IEC qu'il/elle consent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier dans conditions raisonnables et non discriminatoires. À ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à l'IEC. Des informations peuvent être obtenues dans la base de données des brevets à l'adresse <http://patents.iec.ch>.

L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été mentionnés dans la base de données de brevets. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Le présent document n'a pas vocation à traiter des problèmes de sécurité liés à son utilisation. Il incombe à l'utilisateur du présent document d'exercer des pratiques sanitaires et de sécurité adaptées et de déterminer l'aplicabilité des limites réglementaires avant toute utilisation.

Il convient de manipuler les gaz pour l'isolation et/ou la commutation, objets présent document, conformément aux règlements locaux, aux fiches techniques de sécurité des fournisseurs, manuel d'instructions d'exploitation du fabricant et aux recommandations relatives à la sécurité de l'utilisateur de l'appareillage électrique.

Les informations sur certaines données de l'Annexe E et de l'Annexe F informatives étant limitées, il convient que le lecteur sache que les informations liées aux éventuels produits de décomposition et effets toxicologiques sur la santé et sur l'environnement font encore l'objet d'études.

Dans le CE 10 de l'IEC, de nouvelles normes relatives aux spécifications de la qualité technique (IEC 63360) et pour la réutilisation (IEC 63359) des alternatives aux SF₆ sont en cours d'élaboration. Par conséquent, dans une révision ultérieure de la présente norme, certaines informations seront déplacées vers ces nouvelles normes à l'instar des SF₆ ou des mélanges de SF₆.

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 4: Procédures de manipulation des gaz pour l'isolation et/ou la commutation

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62271 s'applique aux procédures de manipulation des gaz pour l'isolation et/ou la commutation lors de l'installation, de la mise en service, de la réparation, de la révision, du fonctionnement normal ou anormal et de l'élimination en fin de cycle de vie de l'appareillage électrique.

Ces procédures sont considérées comme des exigences minimales pour garantir la fiabilité de l'appareillage électrique, la sécurité du personnel qui travaille avec ces gaz et pour réduire le plus possible l'impact sur l'environnement. Des exigences supplémentaires peuvent être formulées dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant.

Pour chaque gaz, réputé être utilisé dans l'appareillage électrique à la date de publication du présent document, une annexe séparée décrit les spécifications, les procédures de manipulation, les mesures de sécurité, etc. Pour les gaz non couverts par ces annexes, il convient que le fabricant de l'appareillage électrique donne les informations nécessaires en se conformant à la structure de ces annexes. Il convient de décrire également ces gaz dans une édition suivante ou dans des amendements à la présente édition.

NOTE 1 Pour l'utilisation du présent document, la haute tension (HT) est définie comme étant la tension assignée supérieure à 1 000 V. Cependant, le terme moyenne tension (MT) est communément utilisé pour les réseaux de distribution avec des tensions supérieures à 1 kV et est généralement appliqué pour des tensions inférieures ou égales à 52 kV.

NOTE 2 Dans l'ensemble du présent document, le terme "pression" signifie "pression absolue".

NOTE 3 Dans le présent document, les pourcentages des composants gazeux, des polluants et des produits de décomposition sont toujours des pourcentages par volume mesurés à 20 °C, sauf indication contraire.

NOTE 4 Il est également fait référence à la brochure 802 du CIGRE, 2020 [1]¹.

NOTE 5 Pour de plus amples informations relatives aux gaz (l'écotoxicologie, par exemple), voir également la base de données chimique de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA - European Chemicals Agency) (www.echa.europa.eu), qui tient compte de la fourchette de quantité annuelle réelle.

NOTE 6 Lorsque les gaz pour l'isolation et/ou la commutation sont régulés, leur conception et leur régulation d'origine se trouvent dans la base de données de l'IE 62474 (disponible à l'adresse <https://std.iec.ch/iec62474> [26]).

NOTE 7 S'il est fait référence aux disjoncteurs, seuls les disjoncteurs à gaz présentent un intérêt. Si des disjoncteurs à vide présentent un intérêt, ils sont explicitement mentionnés.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

IEC 60050-212:2010, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Partie 212: Isolants électriques solides, liquides et gazeux* (disponible à l'adresse www.electropedia.org)
IEC 60050-212:2010/AMD1:2015
IEC 60050-212:2010/AMD2:2015
IEC 60050-212:2010/AMD3:2020

IEC 60050-426:2020, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Partie 426: Atmosphères explosives* (disponible à l'adresse www.electropedia.org)

IEC 60050-441:1984, *Vocabulaire Électrotechnique International (IEV) – Partie 441: Appareillage et fusibles* (disponible à l'adresse www.electropedia.org)
IEC 60050-441:1984/AMD1:2000

IEC 60335-2-69:2021, *Appareils électrodomestiques et analogues – Sécurité – Partie 2-69: Exigences particulières pour les aspirateurs fonctionnant en présence d'eau ou à sec, y compris les brosses motorisées, à usage commercial*

IEC 60376:2018, *Spécification de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des gaz complémentaires à employer dans les mélanges de SF₆ pour utilisation dans les matériels électriques*

IEC 60480:2019, *Spécifications pour la réutilisation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des mélanges contenant du SF₆ dans le matériel électrique*

IEC 62271-1:2017, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes pour appareillage à courant alternatif*
IEC 62271-1:2017/AMD1:2021

ISO 8573-1:2010, *Air comprimé – Partie 1: Polluants et classes de pureté*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-212 et l'IEC 60050-441 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1 Termes généraux et définitions

3.1.1

appareillage électrique

matériel haute tension ou moyenne tension qui contient du gaz pour l'isolation et/ou la commutation (appareillage, lignes haute tension isolées au gaz, transformateurs, transformateurs de mesure, etc.)

3.1.2

gaz

gaz pur ou mélange de gaz utilisé pour l'isolation et/ou la commutation à l'intérieur d'un appareillage électrique

Note 1 à l'article: Un gaz peut contenir des polluants.

3.1.3

gaz pur

gaz composé d'atomes ou de molécules identiques et utilisé pour l'isolation et/ou la commutation à l'intérieur d'un appareillage électrique

Note 1 à l'article: Un gaz pur peut contenir des polluants.

EXEMPLE SF_6 est un exemple type de gaz pur.

3.1.4

mélange de gaz

gaz composé d'au moins deux gaz purs différents et utilisé pour l'isolation et/ou la commutation à l'intérieur d'un appareillage électrique

Note 1 à l'article: Un mélange de gaz peut contenir des polluants.

EXEMPLE SF_6/N_2 est un exemple type d'un mélange de gaz de deux gaz purs.

3.1.5

polluant

substance ou matériau étrangers dans un isolant liquide, gazeux ou solide

[SOURCE: IEC 60050-212:2010, 212-17-27, modifié – "qui, habituellement, a un effet nuisible sur une ou plusieurs propriétés" a été supprimé.]

3.1.6

produit de décomposition

polluant formé par la dégradation du gaz par des arcs électriques, un effet de couronne ou des étincelles ou formé par réaction chimique avec d'autres substances ou matériaux

3.1.7

gaz inflammable

gaz qui, mélangé à l'air dans certaines proportions, forme une atmosphère explosive gazeuse

Note 1 à l'article: Les atmosphères explosives sont classées selon la présence de gaz inflammables et de vapeurs inflammables, et souvent un mélange des deux, appelé "gaz et vapeur inflammables".

[SOURCE: IEC 60050-426:2020, 426-02-34]

3.1.8

fuite anormale

fuite qui provient de l'appareillage électrique dépassant le taux de fuite admissible en raison ("fuite normale") d'un défaut de l'appareillage électrique ou d'une défaillance de l'assemblage

Note 1 à l'article: En général, une fuite anormale est une émission indésirable et continue de gaz à un taux supérieur à celui prévu de l'appareillage électrique.

3.1.9

rejet soudain de gaz

rejet soudain de gaz d'un appareillage électrique en service ou d'un conteneur en raison d'une défaillance du système à pression ou d'une erreur dans le processus de manipulation

Note 1 à l'article: Un rejet soudain est une émission indésirable et soudaine de gaz, par exemple, la rupture d'une traversée, l'ouverture d'un dispositif limiteur de pression en raison d'une défaillance d'arc interne ou la destruction de l'appareillage électrique.

3.1.10

appareil de manipulation du gaz

équipement conçu ou adapté pour la manipulation d'un gaz particulier

3.1.11**manipulation d'un gaz**

processus de transfert et/ou traitement du gaz

3.1.12**évacuation**

transfert de l'air, du N₂ ou d'autres gaz d'origine naturelle dans l'atmosphère

Note 1 à l'article: Sous la pression ambiante, l'opération est réalisée à l'aide d'une pompe à vide.

Note 2 à l'article: Dans des pièces closes, l'évacuation des compartiments sous gaz remplis de N₂ peut augmenter le risque d'anoxie, et l'évacuation des compartiments sous gaz remplis de CO₂ peut augmenter le risque d'intoxication.

3.1.13**récupération d'un gaz**

processus de transfert d'un gaz du compartiment sous gaz dans un autre conteneur (conteneur de récupération)

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

3.1.14**remplissage avec un gaz**

remplissage d'un compartiment sous gaz prérempli ou partiellement rempli avec un gaz à la pression de remplissage (masse volumique) pour l'isolation et/ou la commutation au rapport de mélange spécifié, si applicable

3.1.15**régénération d'un gaz**

processus d'élimination des polluants d'un gaz

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

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

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

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

3.1.17**compartiment sous gaz**

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

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

3.1.18**conteneur**

réceptacle (bouteille) adapté au confinement de gaz sous pression en phase gazeuse ou liquide, conformément aux réglementations locales et/ou internationales en matière de sécurité et de transport

[SOURCE: IEC 60480:2019, 3.2]

3.1.19

système à pression entretenue de gaz

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

Note 1 à l'article: Les disjoncteurs à air comprimé ou les mécanismes de commande pneumatique sont des exemples de systèmes à pression entretenue.

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.1, modifié – Suppression de la Note 2 à l'article.]

3.1.20

système à pression autonome de gaz

ensemble qui reçoit des apports de gaz, lorsque cela est nécessaire, par raccordement manuel à une réserve externe

Note 1 à l'article: Les disjoncteurs à simple pression de SF₆ sont des exemples de systèmes à pression autonome.

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.2]

3.1.21

système à pression scellé

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

Note 1 à l'article: Les disjoncteurs à vide, certains disjoncteurs SF₆ moyenne tension ou les appareillages moyenne tension dont les taux de fuite sont inférieurs à 0,1 %/a sont des exemples de système à pression scellé.

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

Note 3 à l'article: L'instant où le dispositif est scellé marque le début de la durée de service escomptée.

[SOURCE: IEC 62271-1:2017, 3.6.6.3, modifié – La Note 1 à l'article et la Note 2 à l'article ont été modifiées.]

3.1.22

gaz très faiblement décomposé

gaz à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient donc aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

Note 2 à l'article: Les appareillages électriques types qui ont des gaz très faiblement décomposés sont: les lignes isolées au gaz, les jeux de barres isolées au gaz, les transformateurs de tension et de courant isolés au gaz, les boîtes à câble, le compartiment sous gaz autour du disjoncteur à vide.

3.1.23

gaz faiblement décomposé

gaz à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de permutation du courant de charge ou du courant de défaut

Note 1 à l'article: Par exemple, la surchauffe due à de mauvais contacts ou à une décharge partielle importante peut également donner lieu à une décomposition du gaz.

Note 2 à l'article: Les caractéristiques des gaz faiblement décomposés dépendent de la conception de l'appareillage et du gaz.

Note 3 à l'article: Les appareillages électriques types qui ont des gaz faiblement décomposés sont: tous les compartiments sous gaz qui contiennent un dispositif de manœuvre (sectionneur de mise à la terre, sectionneur, interrupteur de charge et disjoncteur, par exemple).

3.1.24**gaz fortement décomposé**

gaz à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou apparition d'un arc dans un disjoncteur après un défaut d'interruption, dans un commutateur après un défaut d'interruption ou dans les disjoncteurs après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits

Note 1 à l'article: Les caractéristiques des gaz fortement décomposés dépendent de la conception de l'appareillage et du gaz.

3.1.25**pression p_{re} de remplissage pour l'isolement et/ou la coupure****masse volumique ρ_{re} de remplissage pour l'isolement et/ou la coupure**

pression (en kPa), pour l'isolement et/ou la coupure, rapportée aux conditions atmosphériques normales de 20 °C et de 101,3 kPa (ou masse volumique), pouvant être exprimée de façon relative ou absolue, à laquelle le compartiment est rempli avant la mise en service, ou rempli de nouveau automatiquement

[SOURCE: IEC 62271-1: 2017, 3.6.5.1]

3.1.26**pression partielle d'un composant d'un mélange de gaz**

pression qu'un composant d'un mélange de gaz exerce uniquement lorsqu'il occupe le même volume que le mélange de gaz à la même température

3.1.27**limite d'exposition professionnelle****OEL**

concentration maximale d'une substance à laquelle un travailleur peut être exposé sans que cela n'ait un impact significatif sur sa santé sur une période donnée, avec éventuellement différentes limites de concentration pour différentes durées d'exposition

Note 1 à l'article: L'abréviation "OEL" est dérivée du terme anglais développé correspondant "occupational exposure limit".

3.1.28**valeur moyenne pondérée dans le temps****valeur TWA**

concentration moyenne maximale sur le lieu de travail d'une substance à laquelle des travailleurs peuvent être exposés sans que cela n'ait d'impacts significatifs sur leur santé

Note 1 à l'article: Elle est généralement examinée sur une base de travail de 8 h par jour, de 40 h par semaine, de 52 semaines par an et une limite d'exposition professionnelle de > 30 ans. Les excursions dans les niveaux d'exposition du travailleur peuvent être supérieures à trois fois la valeur TWA pendant au moins 30 min sur une journée de travail, à condition que la valeur STEL ne soit pas dépassée, et qu'elles ne dépassent en aucun cas cinq fois la valeur TWA, à condition que pendant chaque journée de travail, la valeur TWA et la valeur C ne soient pas dépassées

EXEMPLE La substance A peut avoir une valeur TWA de 100 µl/l (ppmv). Si la concentration en substance A sur le lieu de travail est de 300 µl/l (ppmv) pendant les 20 premières minutes, puis de 150 µl/l (ppmv) pendant les 30 min suivantes, puis de nouveau de 300 µl/l (ppmv) pendant les 10 min suivantes, puis de 75 µl/l (ppmv) pendant les 3 h suivantes, et enfin de 50 µl/l (ppmv) pendant les 4 dernières heures, alors la concentration moyenne sur le lieu de travail est calculée de la manière suivante: concentration moyenne sur le lieu de travail = $(0,33 \cdot 300 + 0,5 \cdot 150 + 0,17 \cdot 300 + 3 \cdot 75 + 4 \cdot 50) / 8$ µl/l (ppmv) = 81,25 µl/l (ppmv) < valeur TWA. Il peut être conclu que la valeur TWA n'a pas été dépassée sur l'ensemble de la journée de travail de 8 h et que la valeur égale à trois fois la valeur TWA n'a pas été dépassée pendant plus de 30 min au total, et donc que le lieu de travail est sûr.

Note 2 à l'article: L'abréviation "TWA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "time weighted average value".

3.1.29**limite d'exposition à court terme
valeur STEL**

concentration moyenne maximale d'une substance sur le lieu de travail à laquelle les travailleurs peuvent être exposés sans que cela n'ait d'impact significatif sur leur santé sur une courte période d'environ 15 min par jour

Note 1 à l'article: L'abréviation "STEL" est dérivée du terme anglais développé correspondant "short term exposure value".

3.1.30**valeur plafond
valeur C**

concentration maximale d'une substance sur le lieu de travail, également appelée limite de concentration maximale admissible (valeur MAC) à laquelle des travailleurs peuvent être exposés et qu'il convient de ne jamais dépasser pendant une certaine période

Note 1 à l'article: En cas de rejet soudain de gaz, il peut être pris pour hypothèse que la concentration sur le lieu de travail d'au moins un composant du gaz ou de ses produits de décomposition dépasse sa valeur C. Si les valeurs C des composants du gaz et de leurs sous-produits ne sont pas définies, il peut être pris pour hypothèse que la concentration sur le lieu de travail d'au moins un composant du gaz ou de ses produits de décomposition dépasse sa valeur STEL. En l'absence de valeur C et de valeur STEL établies, il convient de ne pas exposer les personnes à trois fois la valeur TWA pendant plus de 30 min sur une journée de travail et de ne les exposer en aucun cas à plus de cinq fois la valeur TWA.

Note 2 à l'article: L'abréviation "C" est dérivée du terme anglais développé correspondant "ceiling".

3.1.31**valeur LC50**

concentration déduite de manière statistique à laquelle 50 % des animaux meurent

3.2 Termes et définitions pour SF₆**3.2.1****SF₆ de qualité technique**

SF₆ ayant une très faible teneur en polluants conformément à l'IEC 60376:2018, Tableau 1

3.2.2**SF₆ usagé**

SF₆ qui a été introduit dans l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: Les informations relatives aux produits de décomposition SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe B.

3.2.3**SF₆ usagé pouvant être réutilisé**

SF₆ usagé ayant une teneur maximale en polluants conformément à l'IEC 60480:2019, Tableau 2

3.2.4**SF₆ très faiblement décomposé**

SF₆ usagé à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient donc aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

3.2.5

SF₆ faiblement décomposé

SF₆ usagé qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contient donc en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène

3.2.6

SF₆ fortement décomposé

SF₆ usagé qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur du disjoncteur après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits, et qui contient en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux et une quantité moyenne à importante de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène

3.3 Termes et définitions pour les mélanges de SF₆

3.3.1

mélange de SF₆

mélange gazeux composé de SF₆ et d'un gaz complémentaire (en règle générale du N₂ ou du CF₄)

[SOURCE: IEC 60376:2018, 3.1.3]

3.3.2

mélange de SF₆ usagé

mélange de SF₆ qui a été introduit dans l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: Les informations relatives aux produits de décomposition SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe B.

3.3.3

mélange de SF₆ usagé pouvant être réutilisé

mélange de SF₆ usagé ayant une très faible teneur en polluants conformément à l'IEC 60480:2019

3.3.4

mélange de SF₆ très faiblement décomposé

mélange de SF₆ usagé à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

3.3.5

mélange de SF₆ faiblement décomposé

mélange de SF₆ usagé qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contient en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène

3.3.6

mélange de SF₆ fortement décomposé

mélange de SF₆ usagé qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur du disjoncteur après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits, et qui contient en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux et une quantité moyenne à importante de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène

3.4 Termes et définitions pour l'air comprimé

3.4.1

air comprimé de qualité technique

air ambiant filtré ou nettoyé dont les classes de pureté sont conformes à l'ISO 8573-1, avec les classes de pureté minimales indiquées par le fabricant de l'appareillage électrique

3.4.2

air comprimé usagé

air comprimé qui a été introduit dans l'appareillage électrique

3.4.3

air comprimé très faiblement décomposé

air comprimé usagé à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

Note 2 à l'article: L'air comprimé très faiblement décomposé peut être rejeté dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de libérer de l'air comprimé très faiblement décomposé dans l'atmosphère.

3.4.4

air comprimé faiblement décomposé

air comprimé usagé qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contient en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides, principalement des oxydes métalliques

Note 1 à l'article: L'air comprimé faiblement décomposé peut être rejeté dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de libérer de l'air comprimé faiblement décomposé dans l'atmosphère.

3.4.5

air comprimé fortement décomposé

air comprimé usagé qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur lors de l'interruption satisfaisante de plusieurs courts-circuits, et qui contient en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux et une quantité moyenne à importante de produits de décomposition solides, y compris des fluorures métalliques

Note 1 à l'article: L'air fortement décomposé peut toujours être généré pendant les opérations de coupure dans les disjoncteurs ou les commutateurs contenant des matériaux non métalliques (PTFE, par exemple). Après régénération, l'air comprimé faiblement décomposé peut être rejeté dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de régénérer et libérer de l'air comprimé fortement décomposé dans l'atmosphère.

3.5 Termes et définitions pour les gaz d'origine naturelle

3.5.1

gaz d'origine naturelle

les gaz d'origine naturelle sont l'azote (N_2), l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que leurs mélanges quelle que soit la combinaison

3.5.2

N_2 de qualité technique

N_2 usagé ayant une teneur maximale en polluants conformément à l'IEC 60376:2018, Tableau 2

3.5.3

O_2 de qualité technique

O_2 d'une teneur maximale en polluants de 0,5 % et dont la concentration d'humidité maximale est de 200 $\mu l/l$ (ppmv)

3.5.4

CO_2 de qualité technique

CO_2 d'une teneur maximale en polluants de 0,5 % et dont la concentration d'humidité maximale est de 200 $\mu l/l$ (ppmv)

3.5.5

air synthétique

mélange de gaz formé par (80 ± 2) % de N_2 et (20 ± 2) % de O_2

3.5.6

air synthétique de qualité technique

air synthétique formé par du N_2 de qualité technique et du O_2 de qualité technique

3.5.7

gaz d'origine naturelle usagés

gaz d'origine naturelle qui ont été introduits dans l'appareillage électrique

3.5.8

gaz d'origine naturelle usagés pouvant être réutilisés

gaz d'origine naturelle usagés dont la teneur maximale en polluants satisfait aux exigences définies dans le manuel d'instructions d'exploitation fourni par le fabricant de l'appareillage électrique

3.5.9

gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés

gaz d'origine naturelle usagés à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

Note 2 à l'article: Les gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés peuvent être rejetés dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de libérer des gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés dans l'atmosphère.

3.5.10

gaz d'origine naturelle faiblement décomposés

gaz d'origine naturelle usagés qui ont fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contiennent en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides, principalement des oxydes métalliques

Note 1 à l'article: Les gaz d'origine naturelle faiblement décomposés peuvent être rejetés dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de libérer des gaz d'origine naturelle faiblement décomposés dans l'atmosphère.

3.5.11

gaz d'origine naturelle fortement décomposés

gaz d'origine naturelle usagés qui font l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur du disjoncteur lors de l'interruption satisfaisante de plusieurs courts-circuits, et qui contiennent en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux (pas totalement capturés par les absorbants) et une grande quantité de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques

Note 1 à l'article: Les gaz d'origine naturelle fortement décomposés peuvent toujours être générés pendant les opérations de coupure dans les disjoncteurs ou les commutateurs contenant des matériaux non métalliques (PTFE, par exemple). Après régénération, les gaz d'origine naturelle fortement décomposés peuvent être rejetés dans l'atmosphère. Les règlements locaux sont consultés avant de régénérer et libérer des gaz d'origine naturelle fortement décomposés dans l'atmosphère.

3.6 Termes et définitions pour le $C_5F_{10}O$ (C5-FK) dans les mélanges avec N_2 , CO_2 , O_2 (mélanges C5-FK)

3.6.1

C5-FK de qualité technique

C5-FK dont la teneur en polluants est de $\leq 0,5$ %

Note 1 à l'article: Le type de polluants spécifiques et leurs limites acceptables dépendent du processus de production (et donc du fabricant de gaz) et doivent faire l'objet d'un accord entre le fabricant du gaz et le fabricant l'appareillage électrique.

3.6.2

C5-FK usagé

C5-FK qui a été introduit dans l'appareillage électrique

3.6.3

C5-FK usagé pouvant être réutilisé

C5-FK usagé dont la teneur maximale en polluants satisfait aux exigences définies dans le manuel d'instructions d'exploitation fourni par le fabricant de l'appareillage électrique

3.6.4

mélange de C5-FK de qualité technique

mélange de C5-FK de qualité technique avec un ou plusieurs gaz vecteur(s) de qualité technique (N_2 , CO_2 et O_2) selon un rapport de mélange défini

Note 1 à l'article: Le rapport de mélange choisi dépend de la conception de l'appareillage électrique, des caractéristiques assignées exigées et de la température ambiante minimale. Par conséquent, les exigences relatives au mélange de C5-FK de qualité technique sont données par le fabricant de l'appareillage électrique, y compris la teneur maximale en polluants et les tolérances en matière d'exactitude du mélange.

3.6.5

mélange de C5-FK usagé

mélanges de C5-FK qui ont été introduits dans l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: La compression du mélange à des pressions supérieures, comme dans l'appareillage électrique, peut se traduire par la liquéfaction du C5-FK.

3.6.6

mélange de C5-FK usagé pouvant être réutilisé

mélanges de C5-FK usagés conformes aux spécifications données par le fabricant de l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: La compression du mélange à des pressions supérieures, comme dans l'appareillage électrique, peut se traduire par la liquéfaction du C5-FK. Avant toute réutilisation, veiller à ce que tout le C5-FK se soit évaporé et que le mélange soit homogène. Pour ce faire, limiter le niveau de compression ou aider l'évaporation du C5-FK par un chauffage extérieur.

3.6.7

mélange de C5-FK très faiblement décomposé

mélange de C5-FK usagé à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

3.6.8

mélange de C5-FK faiblement décomposé

mélange de C5-FK usagé qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contient en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides

3.6.9

mélange de C5-FK fortement décomposé

mélange de C5-FK usagé qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur du disjoncteur lors de l'interruption satisfaisante de plusieurs courts-circuits, et qui contient en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux et une quantité moyenne à importante de produits de décomposition solides

3.7 Termes et définitions pour le C₄F₇N (C4-FN) dans les mélanges avec N₂, CO₂, O₂ (mélanges C4-FN)

3.7.1

C4-FN de qualité technique

C4-FN dont la teneur en polluants est inférieure ou égale à 0,5 %

Note 1 à l'article: Le type de polluants spécifiques et leurs limites acceptables dépendent du processus de production (et donc du fabricant de gaz) et doivent faire l'objet d'un accord entre le fabricant du gaz et le fabricant l'appareillage électrique.

3.7.2

C4-FN usagé

C4-FN qui a été introduit dans l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: La pureté dépend de la qualité de la séparation et (le cas échéant) du processus de filtrage qui a été utilisé. Si le C4-FN n'est pas destiné à être réutilisé, mais pour faciliter le transport en vue de l'élimination (une partie significative du mélange de gaz d'isolation n'est pas du C4-FN), des niveaux plus élevés de polluants peuvent être acceptables. Les polluants doivent être connus quant à leur quantité et leur toxicité afin d'assurer une classification appropriée du C4-FN usagé pour le transport.

3.7.3

C4-FN usagé pouvant être réutilisé

C4-FN usagé dont la teneur maximale en polluants satisfait aux exigences définies dans le manuel d'instructions d'exploitation fourni par le fabricant de l'appareillage électrique

3.7.4

mélange de C4-FN de qualité technique

mélange de C4-FN de qualité technique avec un ou plusieurs gaz vecteur(s) de qualité technique (N_2 , CO_2 et O_2) selon un rapport de mélange défini

Note 1 à l'article: Le rapport de mélange choisi dépend de la conception de l'appareillage électrique, des caractéristiques assignées exigées et de la température ambiante minimale. Par conséquent, les exigences relatives au mélange de C4-FN de qualité technique sont données par le fabricant de l'appareillage électrique, y compris la teneur maximale en polluants et les tolérances en matière d'exactitude du mélange.

3.7.5

mélange de C4-FN usagé

mélanges de C4-FN qui ont été introduits dans l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: La compression du mélange à des pressions supérieures, comme dans l'appareillage électrique, peut se traduire par la liquéfaction du C4-FN.

3.7.6

mélange de C4-FN usagé pouvant être réutilisé

mélanges de C4-FN usagés conformes aux spécifications données par le fabricant de l'appareillage électrique

Note 1 à l'article: La compression du mélange à des pressions supérieures, comme dans l'appareillage électrique, peut se traduire par la liquéfaction du C4-FN. Avant toute réutilisation, veiller à ce que tout le C4-FN se soit évaporé et que le mélange soit homogène. Pour ce faire, éviter ou limiter le niveau de compression ou aider l'évaporation du C4-FN par un chauffage extérieur.

3.7.7

mélange de C4-FN très faiblement décomposé

mélange de C4-FN usagé à l'intérieur d'un compartiment sous gaz ou d'une bouteille de gaz, qui n'a jamais fait l'objet d'un arc et qui ne contient aucune décomposition de gaz ni aucun produit de décomposition solide, mais dans lequel de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes

Note 1 à l'article: De petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent être présentes, par exemple, lorsque des décharges partielles se sont produites dans le gaz.

3.7.8

mélange de C4-FN faiblement décomposé

mélange de C4-FN usagé qui a fait l'objet d'un arc pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut et qui contient en général moins de 1 % de produits de décomposition gazeux et une petite quantité de produits de décomposition solides

3.7.9

mélange de C4-FN fortement décomposés

mélange de C4-FN usagé qui a fait l'objet d'un défaut d'arc interne ou d'un arc à l'intérieur d'un disjoncteur ou d'un commutateur, après une défaillance d'interruption ou après l'apparition d'un arc à l'intérieur du disjoncteur lors de l'interruption satisfaisante de plusieurs courts-circuits, et qui contient en général plus de 1 % de produits de décomposition gazeux et une quantité moyenne à importante de produits de décomposition solides

4 Manipulation du gaz au cours de l'installation, la mise en service et après la réparation ou la révision sur site

4.1 Généralités

L'Article 4 fournit des recommandations relatives à la manipulation des gaz après l'installation, la révision ou la réparation sur site de l'appareillage électrique. Les aspects relatifs à la sécurité et à l'environnement peuvent être différents selon les gaz. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes concernées. L'équipement de protection individuelle doit être porté.

4.2 Évacuation, remplissage et vérification de la qualité

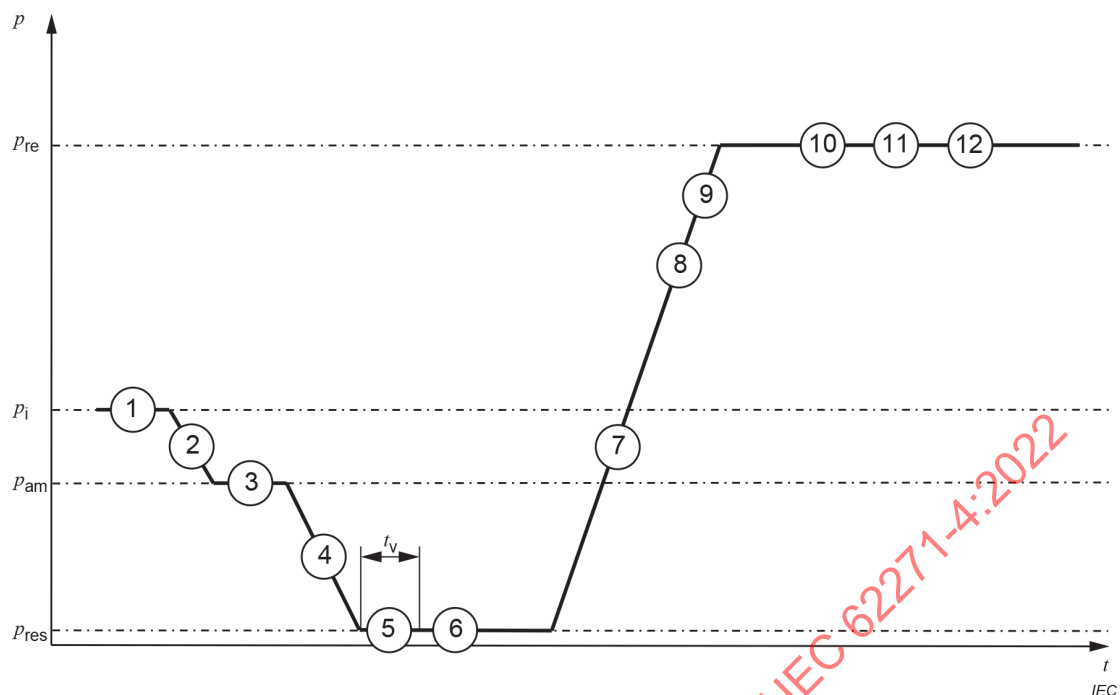
Le présent paragraphe s'applique aux compartiments sous gaz des systèmes à pression autonomes après l'assemblage, la réparation, ou la révision, si les compartiments sous gaz contiennent de l'air à pression ambiante ou (en tant qu'étape intermédiaire avant leur mise en service finale) ont été remplis de N_2 (généralement de 100 kPa à 150 kPa).

La séquence d'opérations nécessaire à l'évacuation de l'air ou du N_2 et au remplissage de gaz dans chaque compartiment sous gaz doit être exécutée conformément à la Figure 1 et au Tableau 1, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Il convient de prendre les précautions nécessaires afin d'éviter tout remplissage par inadvertance avec un gaz inadéquat.

NOTE Le remplissage des compartiments sous gaz avec du N_2 à une légère surpression après réparation ou révision en tant qu'étape intermédiaire, et avant la mise en service finale, peut s'avérer utile pour maintenir la propreté du compartiment sous gaz et éviter toute corrosion.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022



Légende

1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation et du rapport d'opération	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2	Réduction de la pression à la pression ambiante	p_i	Pression initiale
3	Installation des absorbeurs (étape facultative)	p_{am}	Pression ambiante
4	Évacuation	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5	Phase de stabilisation du vide	t_v	Temps de stabilisation du vide ≥ 30 min
6	Phase de maintien du vide (étape facultative)		
7	Remplissage à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation		
8	Étalonnage du capteur de pression/densité (étape facultative)		
9	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité		
10	Inspection de l'étanchéité		
11	Vérification de la qualité		
12	Documentation		

Figure 1 – Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du gaz après remplissage

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

Étape		Procédure
1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation et du rapport d'opération	Vérifier que les appareils de manipulation du gaz fonctionnent correctement et que les connexions de gaz sont propres et sèches de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage. Préparer le rapport d'opération pour consigner les données pertinentes pendant l'évacuation, le remplissage et la vérification de la qualité. Des exemples de paramètres qui peuvent être consignés sont: • date • le nom du fabricant • le numéro de série, l'appareillage électrique et le type de compartiment sous gaz • la pression d'évacuation (c'est-à-dire la teneur en air résiduel) • la température ambiante • la fonctionnalité du capteur de pression/densité • la qualité du gaz
2	Réduction de la pression à la pression ambiante	Le cas échéant, utiliser un dispositif adapté pour réduire la surpression utilisée pour le transport à la pression ambiante.
3	Installation des absorbeurs (étape facultative)	Le cas échéant, insérer rapidement les matériaux des absorbeurs dans le compartiment sous gaz et passer immédiatement à l'étape 4.
4	Évacuation	Connecter la pompe à vide et la laisser fonctionner jusqu'à atteindre une valeur inférieure ou égale à 0,5 kPa ou la valeur spécifiée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. La valeur de 0,5 kPa est une valeur recommandée, qui peut être aisément atteinte par des pompes à vide types. De même, une faible pression résiduelle présente l'avantage de réduire l'humidité restante à l'intérieur du compartiment sous gaz. Pour certains gaz, une valeur résiduelle plus élevée (2 kPa, par exemple) peut être acceptable, dès lors que la teneur maximale en polluants à la pression de remplissage n'est pas dépassée.
5	Phase de stabilisation du vide	Laisser fonctionner la pompe à vide pendant au moins 30 min et ensuite la déconnecter en fermant le robinet. Lire le manomètre. ^a
6	Phase de maintien du vide (étape facultative)	Il convient que la pression dans le compartiment sous gaz reste stable pendant la durée pouvant être spécifiée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.
7	Remplissage à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	Voir l'annexe correspondante pour le remplissage du gaz.
8	Étalonnage du capteur de pression/densité (étape facultative)	L'étalonnage est une étape facultative qui peut être réalisée lors du remplissage ou à tout autre moment.
9	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité	Vérifier la fonctionnalité du capteur de pression/densité. Il convient de procéder à l'opération pendant ou juste après l'opération de remplissage.
10	Inspection de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. ^b
11	Vérification de la qualité	En règle générale, la vérification de la qualité consiste à mesurer les éléments suivants: pureté du gaz, rapport de mélange des mélanges de gaz et humidité. La vérification de la qualité doit commencer après un certain temps d'attente. Voir l'annexe correspondante pour vérifier la qualité du gaz et consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant d'appareillage électrique. ^c
12	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment sous gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la qualité du gaz, la température ambiante et la date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.

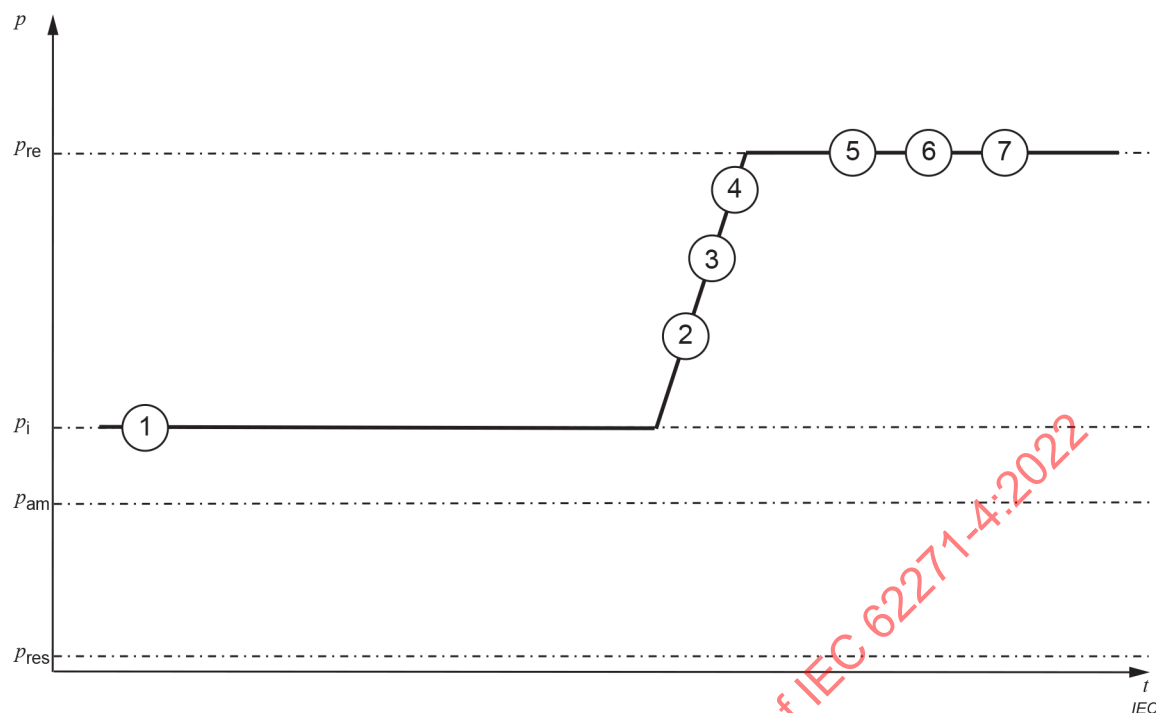
- ^a La durée du vide peut être prolongée pour obtenir une meilleure élimination de l'humidité, par exemple lorsque la température ambiante est au gel, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.
- ^b Les essais d'étanchéité de l'équipement rempli d'air comprimé ou de gaz d'origine naturelle peuvent exiger des étapes supplémentaires (des essais de reniflage à l'hélium, par exemple).
- ^c Si le compartiment sous gaz est de faible volume, un complément de remplissage après vérification de la qualité peut être exigé.

4.3 Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments sous gaz des systèmes à pression autonome préremplis en usine avant l'expédition et destinés à être remplis à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation sur site. Ils contiennent un gaz à une pression type comprise entre 120 kPa et 150 kPa et permettant une mise en service sur le site plus rapide et plus aisée. Le fabricant doit documenter et mettre à disposition la qualité du gaz, qui est prérempli en usine, y compris le rapport de mélange des mélanges de gaz.

La séquence d'opérations nécessaire au complément de remplissage du gaz dans chaque compartiment sous gaz prérempli doit être exécutée conformément à la Figure 2 et au Tableau 2, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022



Légende

1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2	Remplissage à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	p_i	Pression initiale
3	Étalonnage du capteur de pression/densité (étape facultative)	p_{am}	Pression ambiante
4	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5	Inspection de l'étanchéité		
6	Vérification de la qualité		
7	Documentation		

Figure 2 – Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Tableau 2 – Remplissage des compartiments sous gaz préremplis à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Étape		Procédure
1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Remplissage	Voir l'annexe correspondante pour le complément de remplissage du gaz.
3	Étalonnage du capteur de pression/densité (étape facultative)	L'étalonnage est une étape facultative qui peut être réalisée lors du remplissage ou à tout autre moment.
4	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité	Vérifier la fonctionnalité du capteur de pression/densité. Il convient de procéder à l'opération pendant ou juste après l'opération de remplissage.
5	Inspection de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.
6	Vérification de la qualité	En règle générale, la vérification de la qualité consiste à mesurer les éléments suivants: pureté du gaz, rapport de mélange des mélanges de gaz et humidité. La vérification de la qualité doit commencer après un certain temps d'attente. Voir l'annexe correspondante pour vérifier la qualité du gaz et consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant d'appareillage électrique. ^a
7	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment sous gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la qualité du gaz, la température ambiante et la date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.
^a Si le compartiment sous gaz est de faible volume, un complément de remplissage après vérification de la qualité peut être exigé.		

4.4 Remplissage des systèmes à pression scellé

La grande majorité des appareillages à moyenne tension utilise des systèmes à pression scellés, comme cela est défini en 3.1.21. Ce type d'appareillage électrique est généralement rempli de gaz en usine et aucune autre manipulation n'est exigée pendant sa durée de vie attendue.

5 Manipulation du gaz pendant la durée de vie normale

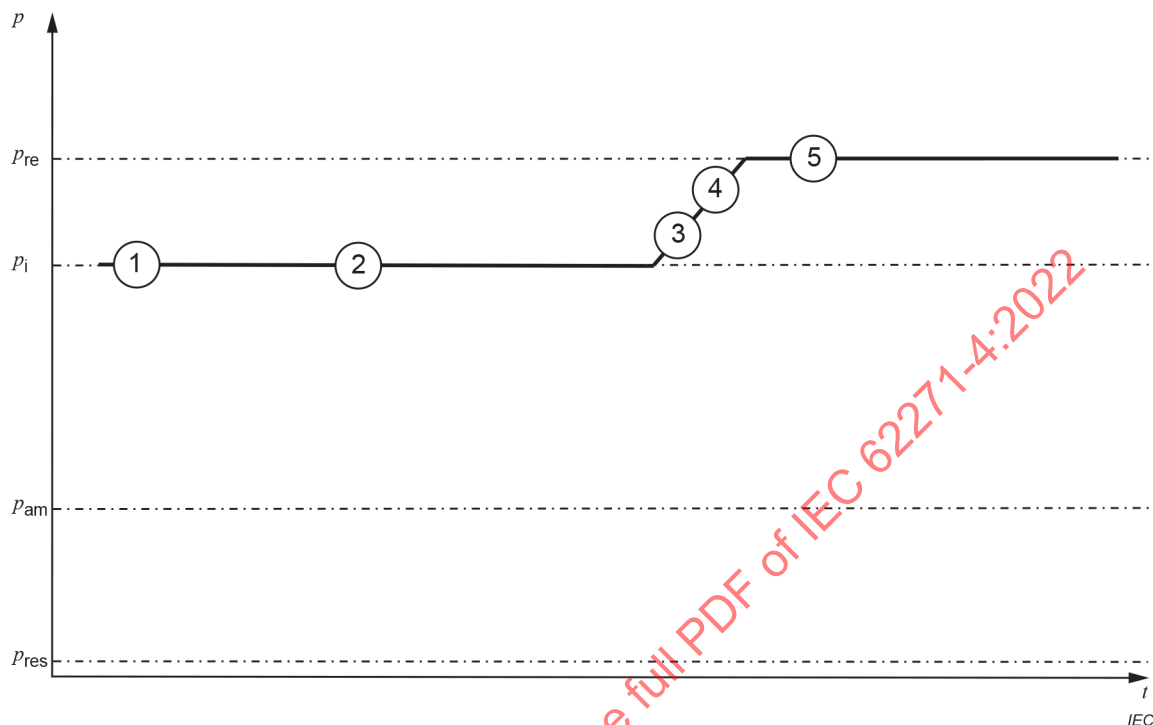
5.1 Remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments sous gaz des systèmes à pression autonome pour assurer la continuité du service. En général, le capteur de pression/densité génère une alarme/indication due à une pression/densité trop faible. La valeur d'alarme doit être proposée par le fabricant de l'appareillage électrique.

Si l'alarme de faible pression/densité est due à une fuite anormale, des mesures correctrices appropriées visant à localiser et à éliminer la fuite doivent être immédiatement mises en œuvre. Il convient de traiter l'alarme conformément au manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Il est recommandé de procéder à une vérification de la qualité des mélanges de gaz, y compris du rapport de mélange (voir 5.2).

La séquence d'opérations nécessaire au complément de remplissage dans chaque compartiment sous gaz doit être exécutée conformément à la Figure 3 et au Tableau 3, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.



Légende

1	Identification de la nature de la variation de pression/densité	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	p_i	Pression initiale
3	Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	p_{am}	Pression ambiante
4	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5	Documentation		

Figure 3 – Complément de remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Tableau 3 – Complément de remplissage de gaz à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Étape		Procédure
1	Identification de la nature de la variation de pression/densité	Comparer les valeurs de pression/densité de gaz actuelles aux valeurs consignées dans le dernier rapport, y compris la tendance en matière de pression/densité, le cas échéant. Si une alarme de faible pression/densité est due à une fuite anormale, des mesures correctrices appropriées visant à localiser et à éliminer la fuite doivent être immédiatement mises en œuvre. Il est recommandé de procéder à une vérification de la qualité, y compris du rapport de mélange (voir 5.2).
2	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
3	Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation	Voir l'annexe correspondante pour le complément de remplissage du gaz.
4	Essai fonctionnel du capteur de pression/densité	Vérifier la fonctionnalité du capteur de pression/densité. Il convient de procéder à l'opération pendant l'opération du complément de remplissage, et elle ne doit pas être considérée comme un étalonnage.
5	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment sous gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la qualité du gaz, la température ambiante et la date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.

5.2 Vérification de la qualité du gaz

5.2.1 Généralités

Le mesurage de la qualité du gaz est habituellement effectué sur site en utilisant des appareils de mesure portables. Une analyse hors site peut exceptionnellement être effectuée afin de procéder à une contre-vérification des résultats sur site non satisfaisants, en procédant à un échantillonnage du gaz et en transmettant l'échantillon prélevé à un laboratoire qualifié.

Les vérifications de la qualité du gaz sont le mesurage de la teneur en humidité (point de gelée blanche/de rosée à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation), la teneur en gaz individuels et les produits de décomposition gazeux réactifs donnant lieu à une teneur en acidité résiduelle (par exemple, la quantité de gaz réactifs en µl/l (ppmv)).

Si une teneur élevée en produits de décomposition est prévue, il convient de veiller à ne pas endommager l'appareil de mesure.

5.2.2 Mesurage sur site de la qualité des gaz au moyen d'appareils de mesure portables

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments sous gaz pour vérifier la qualité du gaz au moyen d'appareils de mesure portables.

Les aspects relatifs à la sécurité et à l'environnement, ainsi que les appareils de mesure types, peuvent être différents en fonction des gaz. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes concernées. Elles doivent être respectées pendant les mesurages de la qualité (par exemple, du N_2 très faiblement décomposé peut être rejeté dans l'atmosphère après que sa qualité a été mesurée, alors que le SF_6 ne doit pas l'être). Ne pas oublier que l'échantillon de mesure du gaz peut contenir de petites quantités d'air ambiant ajoutées pendant la connexion des appareils de mesure au point d'échantillonnage de l'appareillage électrique.

La procédure de mesure doit être décrite en détail dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. Le cas échéant, des informations supplémentaires sont données dans les annexes correspondantes.

Consigner les informations pour identifier clairement le compartiment sous gaz (fabricant, numéro de meuble manuel, nom du projet, numéro de série, etc.), les relevés des appareils de mesure, la température ambiante et la date pour référence ultérieure.

5.2.3 Échantillonnage et transport du gaz pour une analyse hors site

En cas de mesurages insatisfaisants de la qualité sur site ou pour obtenir des résultats plus précis, une chromatographie en phase gazeuse combinée à une spectrométrie de masse (GC-MS – gas-chromatography combined with mass-spectrometry) peut être réalisée hors site.

Les aspects relatifs à la sécurité et à l'environnement en fonction des gaz sont donnés dans les annexes correspondantes. Ne pas oublier que l'échantillon de mesure du gaz peut contenir de petites quantités d'air ambiant ajoutées pendant la connexion des appareils d'échantillonnage au point d'échantillonnage de l'appareillage électrique.

La séquence selon le Tableau 4 doit être réalisée, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation décrite en détail dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique et/ou par le laboratoire hors site et/ou dans l'annexe du gaz correspondant.

Tableau 4 – Échantillonnage et transport des gaz

Étape		Procédure
1	Préparation de l'appareil d'échantillonnage	Vider ou récupérer tout gaz issu de l'appareil d'échantillonnage (bouteille d'échantillonnage, tuyaux, robinets, connexions de liaison et bouteille de déchets en option) à $\leq 0,1$ kPa. Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination de l'échantillon de gaz. Utiliser des connexions courtes et des tuyaux de petit diamètre pour réduire le plus possible le rejet de gaz. Vérifier à l'aide du manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique et/ou auprès du laboratoire hors site que le volume de la bouteille permet de procéder à l'échantillonnage.
2	Documentation	Apposer une étiquette sur la bouteille d'échantillonnage comportant au moins les informations suivantes et en conserver un enregistrement: nom du fabricant, référence du type d'appareillage électrique, numéro de série et référence du compartiment sous gaz pour identifier le compartiment sous gaz, pression résiduelle dans la bouteille d'échantillonnage avant le remplissage, température ambiante et date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.
3	Connexion de l'appareil d'échantillonnage	Connecter l'appareil d'échantillonnage. Rendre les connexions étanches et établir l'écoulement gazeux.
4	Purge de l'appareil d'échantillonnage	En présence d'une bouteille de déchets, ouvrir en premier lieu les robinets afin de purger les tuyaux, les vannes et les connexions de liaison.
5	Échantillonnage	Ouvrir le robinet de la bouteille d'échantillonnage. Fermer le robinet de la bouteille d'échantillonnage lorsque la pression est stabilisée.
6	Déconnexion de la bouteille d'échantillonnage	Interrompre le flux de gaz et déconnecter la bouteille d'échantillonnage. ^a
7	Transport	Le transport jusqu'au laboratoire est effectué conformément au règlement local et international et/ou au manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique et/ou au laboratoire hors site. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes traitant des gaz.
^a Si le compartiment sous gaz est de faible volume, un remplissage après échantillonnage de gaz peut être exigé.		

5.3 Rectification de la composition d'un mélange de gaz

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments sous gaz dans lesquels la teneur ou le rapport mesuré(e) des différents composants d'un mélange de gaz ne satisfait plus aux spécifications du manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. Des informations relatives à la procédure de rectification de la composition d'un mélange de gaz sont données à l'Annexe B, à l'Annexe D, à l'Annexe E et à l'Annexe F.

6 Récupération et régénération des gaz au cours des opérations de maintenance, de réparation, de révision ou de démontage sur site

6.1 Généralités

L'Article 6 contient les procédures de récupération et de régénération des gaz depuis un quelconque compartiment sous gaz au cours des opérations de maintenance, de réparation, de révision ou de démontage sur site.

La récupération et la régénération des gaz peuvent se révéler inutiles pour l'air et les gaz d'origine naturelle. Des informations supplémentaires relatives aux aspects liés à la sécurité et à l'environnement en fonction des gaz sont données dans les annexes correspondantes.

Lorsque le gaz a été récupéré et régénéré et qu'il est réputé adapté à la réutilisation, il peut, soit être réutilisé sur le site, soit stocké, soit transporté hors site pour réutilisation ou élimination ultérieure. Lorsque le gaz n'est pas réputé adapté à la réutilisation, il doit être stocké ou transporté pour élimination ultérieure.

6.2 Récupération et régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz

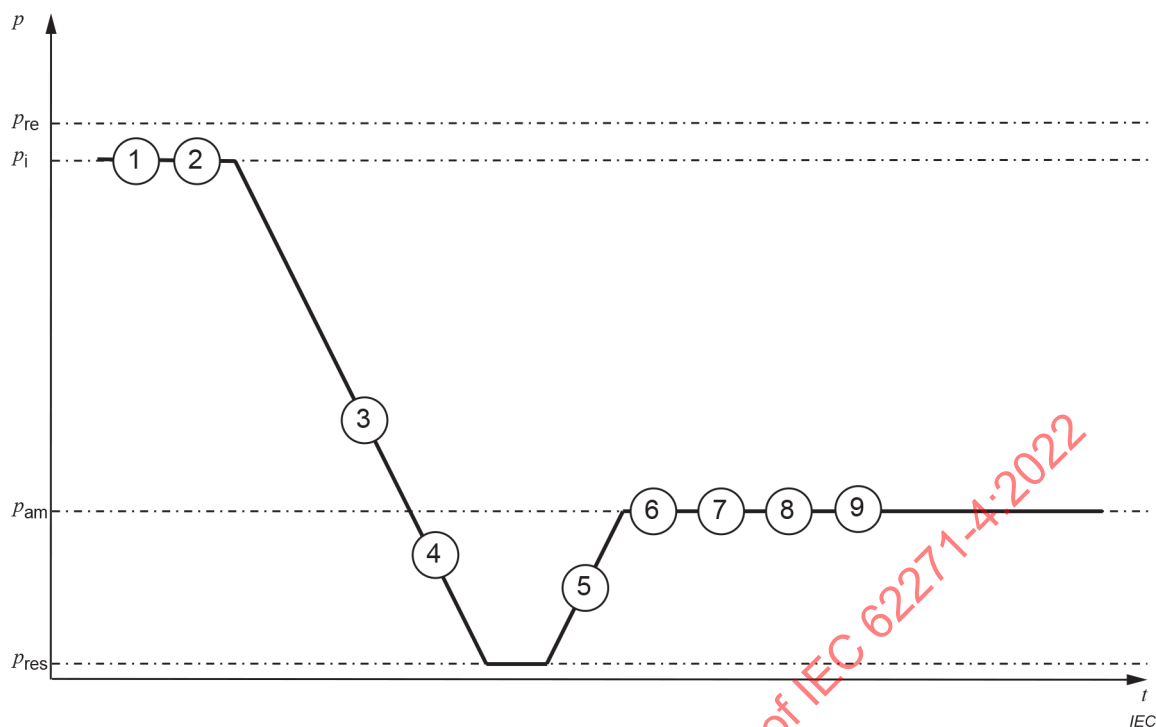
Le présent paragraphe s'applique à tous les compartiments sous gaz contenant du gaz très faiblement décomposé ou faiblement décomposé lorsqu'il est récupéré pour une opération de maintenance, de réparation, de révision ou de démontage sur le site.

La séquence d'opérations détaillées de la Figure 4 et du Tableau 5 peut être adoptée comme exemple de séquence d'opérations détaillée pour la récupération et la régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Il existe des cas dans lesquels la pression résiduelle de gaz ne peut pas être atteinte en utilisant la procédure indiquée à la Figure 4 et dans le Tableau 5, malgré l'utilisation d'installations de récupération adéquates (par exemple, en raison d'une fuite de l'appareillage, de petites vannes de remplissage dans l'appareillage). Dans de tels cas, d'autres méthodes peuvent être appliquées pour atteindre la pression partielle résiduelle du gaz d'origine de 0,5 kPa (par exemple, une méthode de dilution, voir la Figure 9) dans le compartiment sous gaz avant ouverture.

NOTE En cas de fuite du compartiment sous gaz, le conteneur de récupération peut être remplacé, si la pression ambiante a été atteinte, pour éviter que l'air ambiant ne contamine le gaz récupéré.

Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité sont données dans les annexes concernées.



Légende

1 Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2 Connexion des préfiltres externes (étape facultative)	p_i	Pression initiale
3 Récupération du gaz ou du mélange de gaz	p_{am}	Pression ambiante
4 Réduction le plus possible de la teneur résiduelle en gaz ou en mélange de gaz	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5 Immersion à l'air		
6 Ouverture du compartiment sous gaz		
7 Élimination des produits de décomposition solides et des absorbeurs s'ils sont présents		
8 Neutralisation lorsqu'exigée		
9 Documentation		

NOTE Dans la plupart des cas, p_i est égal à p_{re} .

Figure 4 – Exemple de récupération et de régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz

Tableau 5 – Exemple de récupération et de régénération des gaz très faiblement ou faiblement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz

Étape		Procédure
1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	Vérifier que l'appareil de manipulation fonctionne correctement, que les filtres sont toujours actifs et connectés, et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la capacité et l'état des récipients de stockage et s'ils sont compatibles avec le gaz à récupérer et régénérer en phase gazeuse ou liquide. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Connexion des préfiltres externes (étape facultative)	Connecter un ou plusieurs préfiltres externes entre le compartiment sous gaz et l'entrée de l'appareil de manipulation.
3	Récupération du gaz	Connecter le compartiment sous gaz. Utiliser un compresseur dès que la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de la pression dans le récipient de stockage. Éviter un remplissage excessif du récipient de stockage.
4	Réduction le plus possible de la teneur en gaz	Utiliser un compresseur à vide en série avec le compresseur lorsque la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure ou égale à 0,5 kPa. En cas de fuite éventuelle, remplacer le récipient lorsque la pression ambiante a été atteinte, afin d'éviter la pénétration d'air ambiant dans le premier récipient.
5	Immersion à l'air	Déconnecter l'appareil de récupération et, à l'aide d'un dispositif adapté, laisser l'air entrer lentement dans le compartiment sous gaz.
6	Ouverture du compartiment sous gaz	Appliquer les règles de sécurité selon l'annexe correspondante. Ouvrir avec précaution le compartiment sous gaz.
7	Élimination des produits de décomposition solides et des absorbeurs s'ils sont présents	Utiliser immédiatement un aspirateur ou essuyer avec un chiffon propre non pelucheux pour recueillir les produits de décomposition solides, le cas échéant. Mettre les matériaux des absorbeurs dans un sac en plastique. Fermer hermétiquement le sac en plastique avec un ruban adhésif et l'étiqueter. Les produits de décomposition solides doivent être éliminés conformément aux règlements locaux et internationaux.
8	Neutralisation lorsqu'exigée	Si des produits de décomposition ont été collectés, suivre les instructions de l'annexe correspondante.
9	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment sous gaz, la pression résiduelle, la quantité résiduelle, la température ambiante et la date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.

6.3 Récupération et régénération depuis un quelconque compartiment sous gaz contenant un gaz fortement décomposé

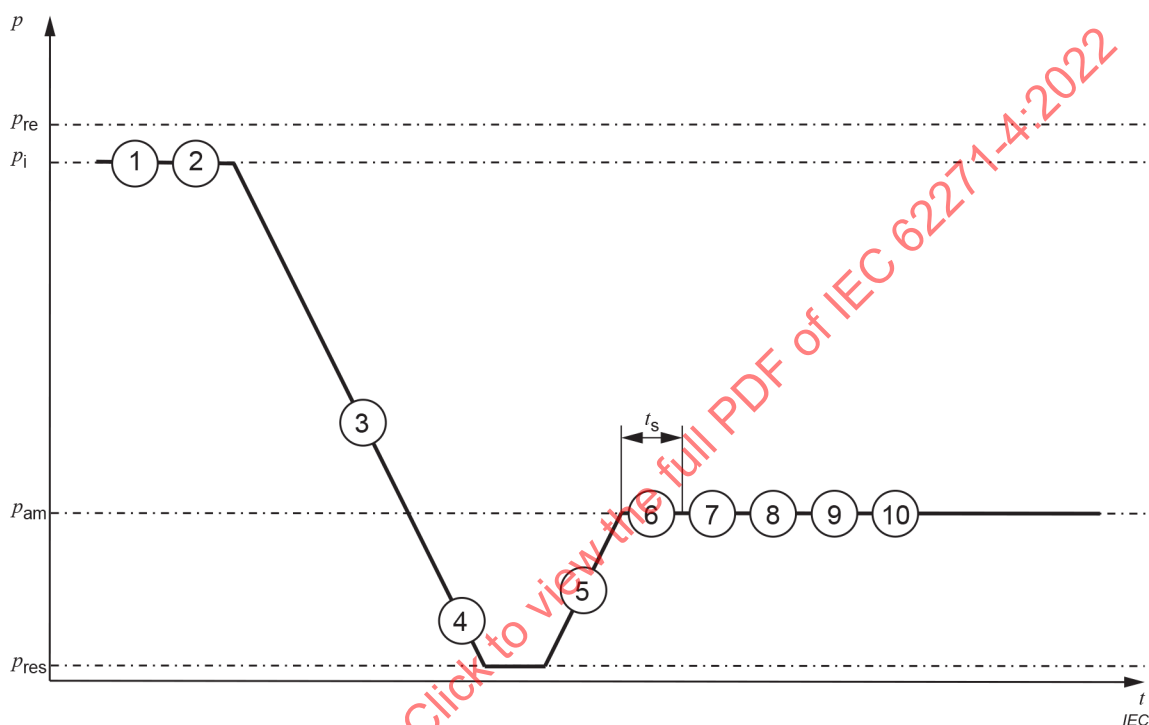
Le présent paragraphe s'applique à tous les compartiments sous gaz contenant du gaz fortement décomposé lorsqu'il est récupéré pour une opération de maintenance ou de réparation. Les compartiments sous gaz non démontables contenant des gaz fortement décomposés sont considérés comme ayant atteint leur fin de cycle de vie.

La pression dans le compartiment sous gaz avant immersion à l'air et ouverture doit être inférieure ou égale à 0,5 kPa.

La Figure 5 et le Tableau 6 peuvent être adoptés comme exemples de séquence d'opérations détaillée pour la récupération et la régénération des gaz depuis un quelconque compartiment sous gaz contenant des gaz fortement décomposés, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Il existe des cas dans lesquels la pression résiduelle de gaz de 0,5 kPa ne peut pas être atteinte en utilisant la procédure indiquée à la Figure 5 et dans le Tableau 6, malgré l'utilisation d'installations de récupération adéquates (par exemple, en raison d'une fuite de l'appareillage, de petites vannes de remplissage dans l'appareillage). Dans de tels cas, d'autres méthodes peuvent être appliquées pour atteindre la pression partielle résiduelle du gaz d'origine de 0,5 kPa (par exemple, une méthode de dilution, voir la Figure 9) dans le compartiment sous gaz avant ouverture. En cas de fuite, et si la méthode de dilution est utilisée, des récipients adaptés sont nécessaires.

Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité sont données dans les annexes concernées.



Légende

1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2	Connexion des préfiltres externes	p_i	Pression initiale
3	Récupération du gaz	p_{am}	Pression ambiante
4	Réduction le plus possible de la teneur en gaz	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5	Immersion à l'air	t_s	Temps de décantation ≥ 1 h
6	Décantation des produits de décomposition solides		
7	Ouverture du compartiment sous gaz		
8	Élimination des produits de décomposition solides, des matériaux des absorbeurs et des pièces amovibles		
9	Neutralisation		
10	Documentation		

NOTE Dans la plupart des cas, p_i est égal à p_{re} .

Figure 5 – Exemple de récupération et de régénération des gaz fortement décomposés depuis un quelconque compartiment sous gaz

Tableau 6 – Exemple de récupération et de régénération de gaz fortement décomposé depuis un quelconque compartiment sous gaz

Étape		Procédure
1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	Vérifier que l'appareil de manipulation fonctionne correctement, que les filtres sont toujours actifs et connectés, et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la capacité et l'état des récipients de stockage et s'ils sont compatibles avec le gaz à récupérer et régénérer. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Connexion des préfiltres externes	Connecter un ou plusieurs préfiltres externes en série entre le compartiment sous gaz et l'entrée de l'appareil de manipulation.
3	Récupération du gaz	Connecter le compartiment sous gaz. Utiliser un compresseur dès que la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de la pression dans le récipient de stockage. Éviter un remplissage excessif du récipient de stockage.
4	Réduction le plus possible de la teneur en gaz	Utiliser un compresseur à vide en série avec le compresseur lorsque la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure ou égale à 0,5 kPa. En cas de fuite éventuelle, remplacer le récipient lorsque la pression ambiante a été atteinte, afin d'éviter la pénétration d'air ambiant dans le premier récipient.
5	Immersion à l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air entrer lentement dans le compartiment sous gaz.
6	Décantation des produits de décomposition solides	Attendre (en général au moins 1 h) pour laisser suffisamment de temps aux produits de décomposition solides pour se décanter dans le compartiment sous gaz.
7	Ouverture du compartiment sous gaz	Ouvrir avec précaution le compartiment sous gaz. Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité sont données dans les annexes concernées. ^a
8	Élimination des produits de décomposition solides, des matériaux des absorbeurs et des pièces amovibles	Utiliser immédiatement un aspirateur pour recueillir les produits de décomposition solides. Mettre les absorbeurs et les pièces amovibles dans des sacs en plastique. Fermer hermétiquement les sacs en plastique avec un ruban adhésif et les étiqueter. Des informations détaillées relatives à la classe d'aspirateur à utiliser sont données dans l'annexe correspondante pour le gaz. Les produits de décomposition solides doivent être éliminés conformément aux règlements locaux et internationaux.
9	Neutralisation	Suivre les instructions de l'annexe correspondante.
10	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment sous gaz, la qualité du gaz, la pression résiduelle, la quantité résiduelle, la température ambiante et la date pour référence ultérieure. Consigner toutes les informations pertinentes concernant le comportement en service. Inclure des images. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.
^a		Si le compartiment sous gaz est déjà ouvert à l'atmosphère (par exemple, en raison du fonctionnement d'un dispositif limiteur de pression ou d'une perforation de l'enveloppe), la procédure peut être suivie en partant de l'étape 8.

7 Fin de vie de l'appareillage électrique

7.1 Généralités

Le présent article traite des différentes phases de démontage de l'appareillage électrique en fin de vie, qui est une étape importante du point de vue de l'environnement.

Le démontage en fin de vie est exécuté conformément aux règlements locaux sous la responsabilité du propriétaire/de l'utilisateur qui est assisté par le fabricant de l'appareillage électrique, car sa connaissance et son expérience sont essentielles. Des tierces parties, telles que des entreprises de service qualifiées, peuvent également effectuer le démontage en fin de vie. La fin de vie de l'appareillage électrique est prise en considération dès la phase de conception des appareillages électriques les plus récents.

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

Le démontage d'un appareillage électrique et le traitement associé des gaz, des compartiments sous gaz, des produits de décomposition solides, des matériaux des absorbeurs et des effluents doivent être effectués en tenant compte de la sécurité du personnel et de l'environnement. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes concernées pour les différents gaz.

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

La Figure 6 représente la procédure type à suivre pour la fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue.

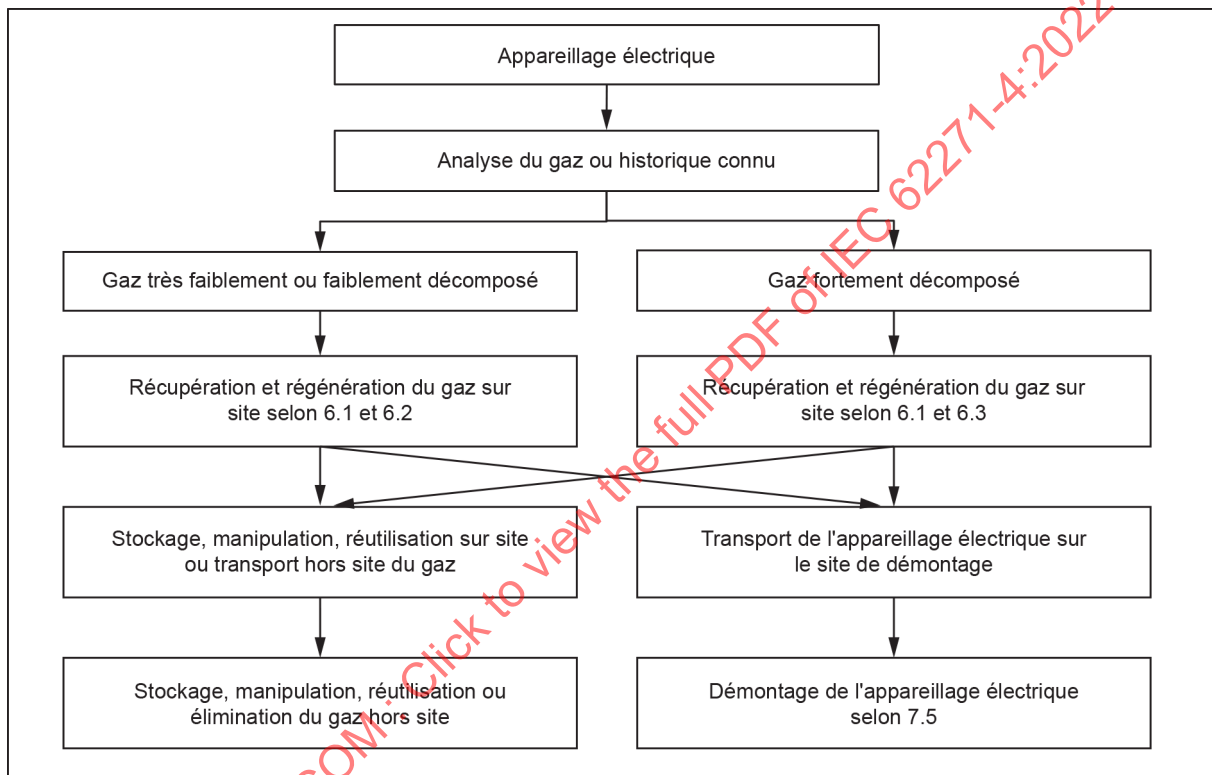
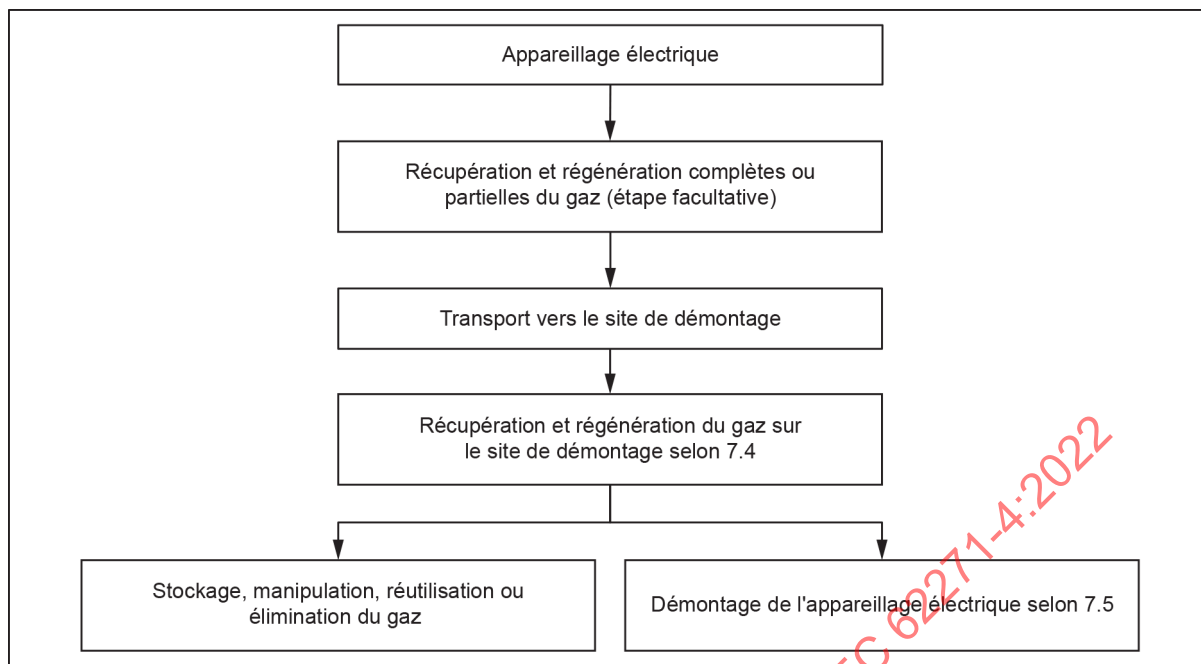


Figure 6 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue

Si l'historique d'un compartiment sous gaz est inconnu, le gaz doit être analysé et manipulé dans des conditions sûres conformément à 5.2. Si l'analyse n'est pas possible, le gaz doit être traité comme un gaz fortement décomposé. Lorsque le gaz a été récupéré et régénéré, il peut, soit être réutilisé sur le site (si cela est applicable pour le gaz) soit stocké, soit transporté hors site pour réutilisation ou élimination ultérieure. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes concernées pour les différents gaz. L'appareillage électrique peut être soit démonté sur site selon les règlements locaux, soit transporté vers un site de démontage.

7.3 Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés

Les systèmes à pression scellés peuvent être transportés vers le site de démontage comme représenté à la Figure 7. Si cela est exigé (réduction à la pression de transport correcte, par exemple), la récupération et la régénération du gaz peuvent être réalisées sur site. La procédure de récupération et de régénération du gaz reste similaire et est indiquée en 7.4.



IEC

Figure 7 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés

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

7.4 Récupération et régénération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés

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

NOTE Parfois, la récupération et la régénération des gaz ne s'appliquent pas à l'air et aux gaz d'origine naturelle. Des informations supplémentaires sont données à l'Annexe C et à l'Annexe D.

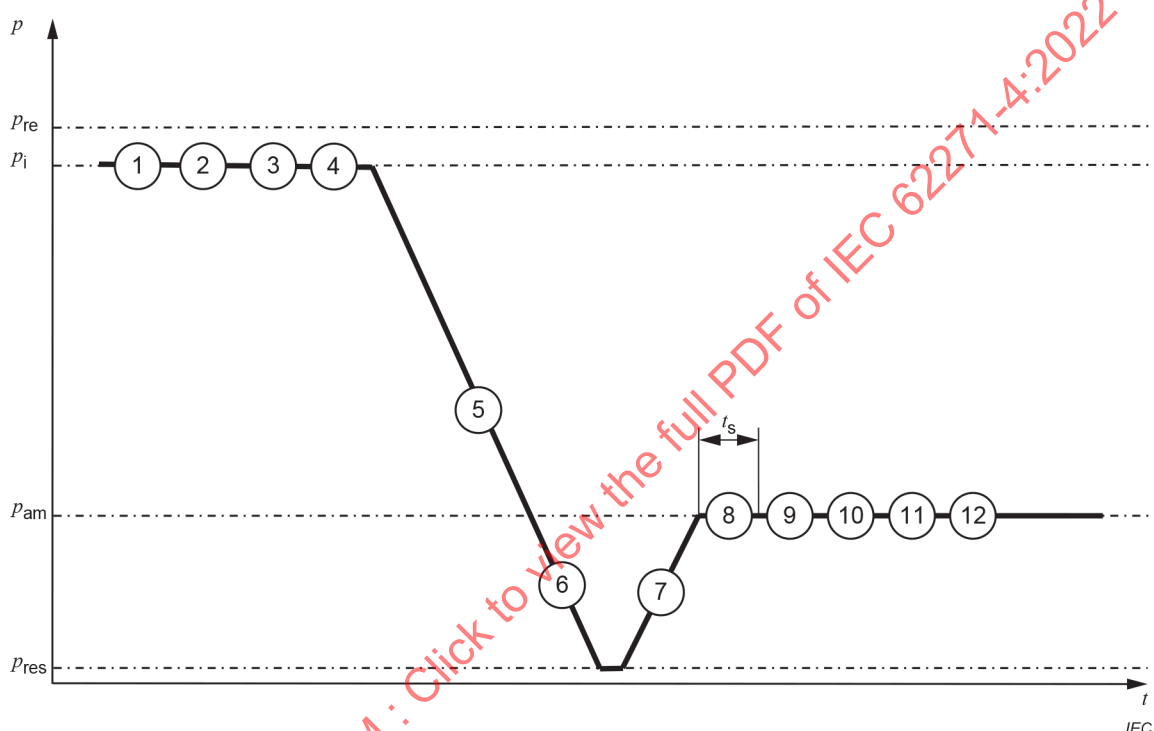
La pression résiduelle dans le compartiment sous gaz avant l'ouverture doit être inférieure ou égale à 0,5 kPa, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation indiquée par le fabricant de l'appareillage électrique. Il convient de donner des informations relatives à la procédure de récupération du gaz dans le manuel d'instructions d'exploitation, en particulier si le compartiment sous gaz ne peut pas résister à la pression de gaz résiduelle sans présenter de fuite et si le compartiment est définitivement déformé après la récupération du gaz. Sinon, contacter le fabricant de l'appareillage électrique.

Si la pression de gaz résiduelle ne peut pas être atteinte sans fuite, d'autres méthodes peuvent être appliquées (la méthode de dilution, par exemple à la Figure 9) pour atteindre une pression de gaz résiduelle (partielle) de 0,5 kPa ou la valeur spécifiée par le fabricant de l'appareillage électrique dans le compartiment sous gaz avant l'ouverture.

Certaines entreprises de démontage et de recyclage sont équipées d'enceintes sous vide spécialement conçues pour récupérer les gaz des systèmes à pression scellés jusqu'à une pression résiduelle de $\leq 0,5$ kPa sans endommager le compartiment sous gaz.

La Figure 8 et le Tableau 7 peuvent être adoptés comme exemples de séquence d'opérations détaillée pour la récupération et la régénération des gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés, sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. La Figure 9 donne un exemple type de méthode de dilution.

Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité pour les différents gaz sont données dans l'Annexe A à l'Article A.2, l'Article B.2, l'Article C.2, l'Article D.2, l'Article E.2 et à l'Article E.2.



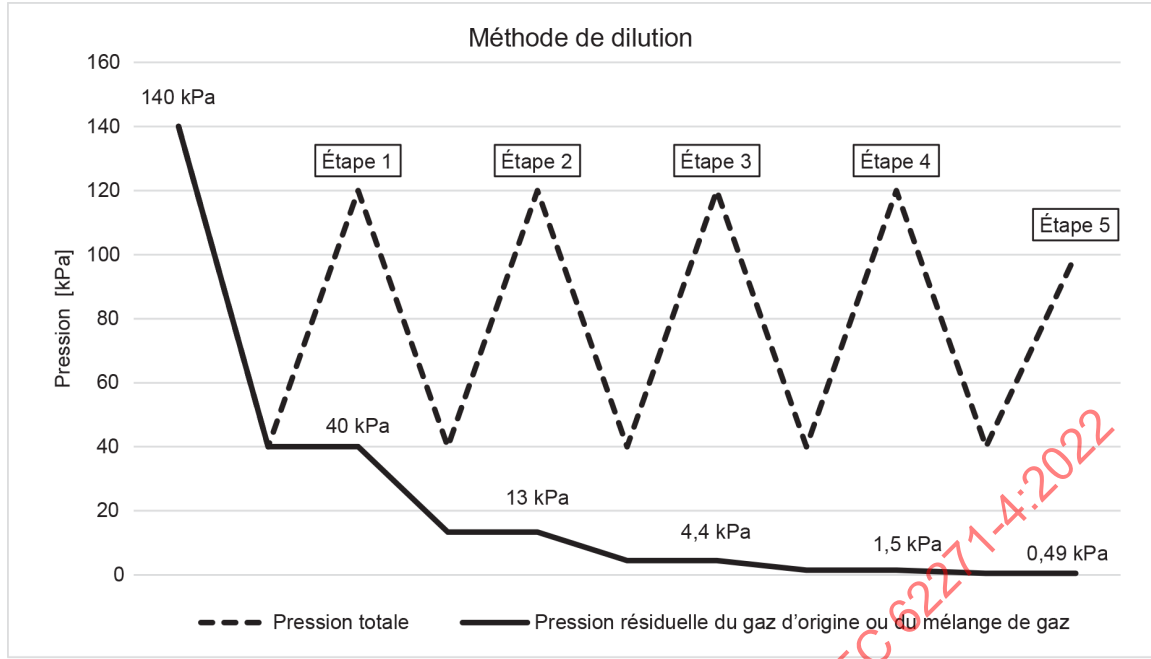
Légende

1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	p_{re}	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
2	Vérification de la qualité si du gaz fortement décomposé est prévu (étape facultative)	p_i	Pression initiale
3	Connexion des préfiltres externes, lorsqu'exigée	p_{am}	Pression ambiante
4	Connexion du compartiment sous gaz	p_{res}	Pression résiduelle $\leq 0,5$ kPa
5	Récupération du gaz	t_s	Temps de décantation ≥ 1 h
6	Réduction le plus possible de la teneur en gaz		
7	Immersion à l'air		
8	Décantation des produits de décomposition solides, si cela est exigé		
9	Ouverture du compartiment sous gaz		
10	Élimination des produits de décomposition solides, des matériaux des absorbeurs et des pièces amovibles, s'ils sont présents		
11	Neutralisation lorsqu'exigée		
12	Documentation		

Figure 8 – Récupération et régénération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés

Tableau 7 – Récupération du gaz en fin de vie des systèmes à pression scellés

	Étape	Procédure
1	Préparation de l'ensemble des appareils nécessaires à la manipulation	Vérifier le bon fonctionnement de l'appareil de manipulation, que les filtres sont toujours actifs et connectés, et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la capacité et l'état des récipients de stockage et s'ils sont compatibles avec le gaz à récupérer et régénérer. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Vérification de la qualité (étape facultative)	Dans ce cas, la vérification de la qualité consiste à mesurer la teneur en produits de décomposition. Voir l'annexe correspondante pour vérifier la qualité du gaz et consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant d'appareillage électrique.
3	Connexion des préfiltres externes, lorsqu'exigée	Connecter un ou plusieurs préfiltres externes entre le compartiment sous gaz et l'entrée de l'appareil de manipulation. Les filtres doivent être choisis selon le gaz et les éventuels produits de décomposition.
4	Connexion du compartiment sous gaz	Utiliser des outils spécifiques et suivre les instructions du fabricant de l'appareillage électrique pour connecter le compartiment sous gaz. Dans les autres cas, des systèmes de perçage étanches doivent être utilisés.
5	Récupération du gaz	Connecter le compartiment sous gaz. Utiliser un compresseur dès que la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de la pression dans le récipient de stockage. Éviter un remplissage excessif du récipient de stockage.
6	Réduction le plus possible de la teneur en gaz	Utiliser un compresseur à vide en série avec le compresseur lorsque la pression résiduelle dans le compartiment sous gaz s'approche de 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure ou égale à 0,5 kPa. En cas de fuite éventuelle, remplacer le récipient lorsque la pression ambiante a été atteinte, afin d'éviter la pénétration d'air ambiant dans le premier récipient.
7	Immersion à l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air entrer lentement dans le compartiment sous gaz.
8	Décantation des produits de décomposition solides, si nécessaire.	Attendre (en général au moins 1 h) pour laisser suffisamment de temps aux produits de décomposition solides pour se décanter dans le compartiment sous gaz.
9	Ouverture du compartiment sous gaz	Le cas échéant, ouvrir soigneusement le compartiment sous gaz. Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité pour les différents gaz sont données dans les annexes.
10	Élimination des produits de décomposition solides, des pièces amovibles et des absorbeurs s'ils sont présents	Utiliser immédiatement un aspirateur ou essuyer avec un chiffon propre non pelucheux pour recueillir les produits de décomposition solides, le cas échéant. Mettre les absorbeurs et les pièces amovibles dans des sacs en plastique. Fermer hermétiquement les sacs en plastique avec un ruban adhésif et les étiqueter. Les produits de décomposition solides doivent être éliminés conformément aux règlements locaux et internationaux.
11	Neutralisation lorsqu'exigée	Si des produits de décomposition ont été collectés, suivre les instructions de l'annexe correspondante.
12	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type de l'appareillage électrique, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment sous gaz, la quantité résiduelle (si applicable), la température ambiante et la date pour référence ultérieure. De plus, selon le type de gaz et les règlements locaux, la perte de gaz dans l'atmosphère doit être consignée. Si c'est le cas, l'utilisateur ou le fabricant doit fournir des méthodes adéquates pour satisfaire à ces exigences.



	Exemples de valeurs	
p_{re}	= 140 kPa	Pression/densité de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation
p_{max}	= 120 kPa	Pression maximale utilisée lors du processus de dilution
p_{min}	= 40 kPa	Pression minimale utilisée lors du processus de dilution (= pression minimale adaptée à l'appareillage électrique sans dommage)
p_{res}	≤ 0,5 kPa	Pression partielle résiduelle cible du gaz d'origine
n_{tot}	= 5	Nombre total d'étapes de dilution nécessaires pour atteindre p_{res}

Explication de la méthode de dilution:

- Dans une première étape, le gaz d'origine est récupéré à la pression minimale utilisée lors du processus de dilution, puis rempli d'air à la pression maximale utilisée lors du processus de dilution.
- Dans une deuxième étape, le gaz d'origine dilué est de nouveau récupéré à la pression minimale utilisée lors du processus de dilution, puis rempli d'air à la pression maximale utilisée lors du processus de dilution.
- etc.
- Après n étapes, la pression partielle résiduelle p_n du gaz d'origine est:

$$p_n = \left(1 - \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max}} \right) \right)^n \times p_{max}$$

- Le nombre total d'étapes de dilution nécessaires pour atteindre la pression partielle résiduelle cible du gaz d'origine peut être calculé comme suit:

$$n_{tot} = \text{arrondi} \left\{ \frac{\ln \left(\frac{p_{res}}{p_{max}} \right)}{\ln \left(1 - \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max}} \right) \right)} \right\}$$

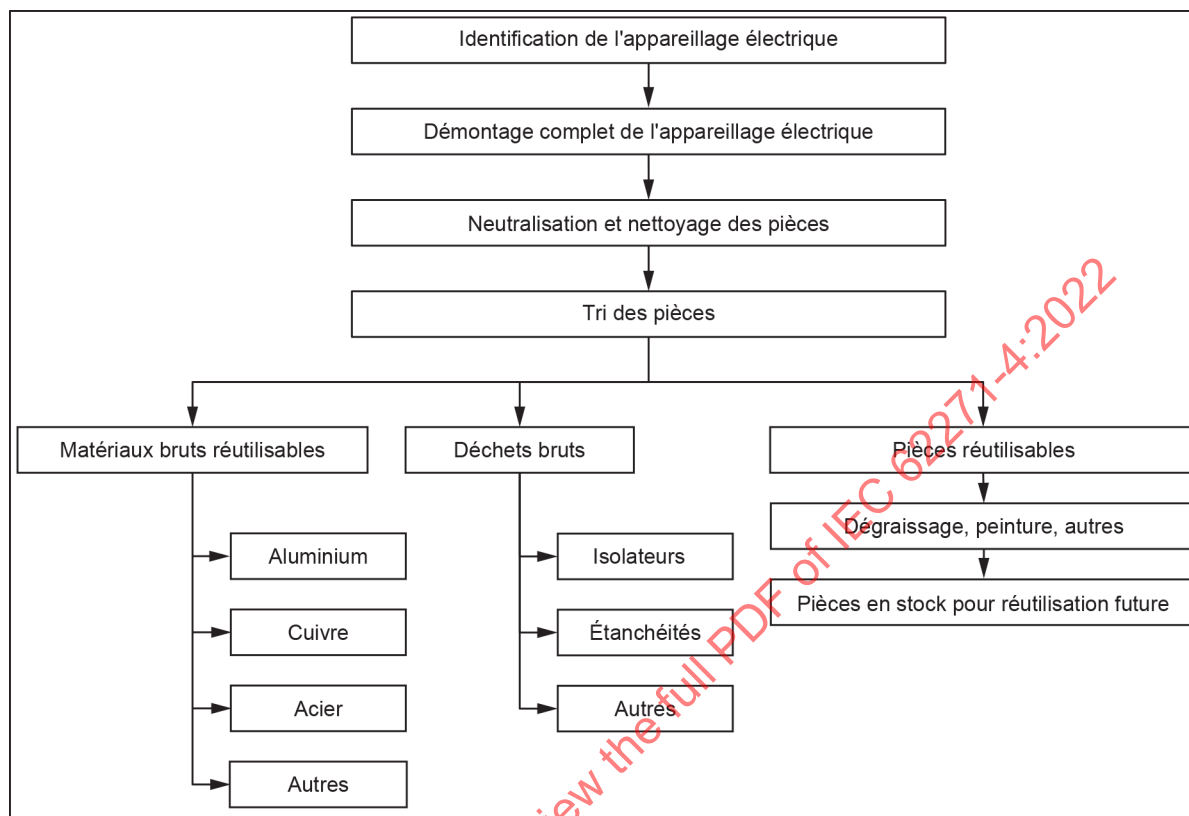
- À la fin de la dernière étape de dilution, l'air est uniquement rempli à la température ambiante et le compartiment sous gaz peut alors être ouvert.

NOTE Plusieurs récipients de récupération peuvent être utilisés en fonction du volume du compartiment sous gaz à traiter.

Figure 9 – Méthode de dilution

7.5 Démontage de l'appareillage électrique (informative)

La Figure 10 représente la procédure type de démontage d'un appareillage électrique en fin de vie.



IEC

Figure 10 – Démontage d'un appareillage électrique

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

Les compartiments sous gaz et les pièces internes peuvent contenir des produits de décomposition solides. La quantité de produits de décomposition dans un compartiment sous gaz dépend de l'énergie cumulée des arcs qui a été appliquée pendant sa durée de vie, en relation avec la quantité de gaz, les caractéristiques chimiques et la quantité et le type d'absorbants. L'énergie cumulée des arcs dépend de l'historique du fonctionnement et de l'exploitation de l'appareillage électrique en question. Un interrupteur de charge au gaz contient des quantités beaucoup plus faibles de produits de décomposition qu'un disjoncteur à gaz ayant coupé fréquemment le courant de défaut.

Les produits de décomposition solides et les absorbants doivent être placés correctement, et les compartiments sous gaz doivent être neutralisés et nettoyés de manière à pouvoir être recyclés conformément aux règlements locaux et aux normes internationales. Des informations supplémentaires sont données dans les annexes correspondantes.

Il convient que les opérateurs connaissent les appareillages électriques pendant la phase de démontage. Il convient de mettre à disposition des outils et des plans. Des informations supplémentaires relatives aux règles de sécurité sont données dans les annexes concernées.

Un appareillage électrique type est constitué d'approximativement 75 % à 90 % en poids de métaux (aussi bien des métaux ferreux que non-ferreux), le reste étant constitué de matériaux diélectriques, la majeure partie du poids du matériau diélectrique étant constituée par des isolants solides (par exemple, résine coulée, plastiques et céramiques).

Les matériaux non recyclables (déchets bruts) doivent être éliminés conformément aux règlements locaux et internationaux.

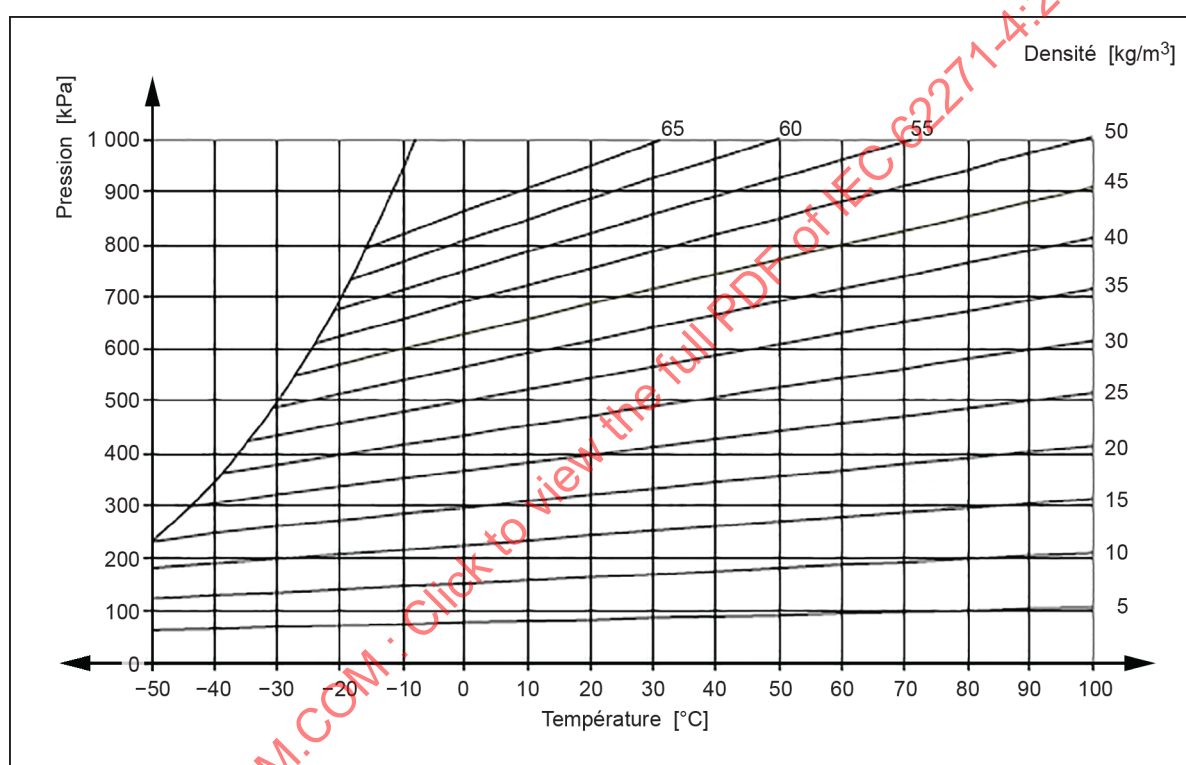
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Annexe A (informative)

Hexafluorure de soufre (SF₆)

A.1 Propriétés gazeuses

La Figure A.1 [2] représente le schéma pression-température-densité du SF₆. Des informations supplémentaires relatives aux propriétés chimiques, physiques et électriques du SF₆ de qualité technique sont consignées dans l'IEC 60376:2018, Annexe A et les propriétés de SF₆ à utiliser est consignée dans l'IEC 60480:2019, Tableau 2.



IEC

Figure A.1 – Schéma pression-température-densité du SF₆

A.2 Sécurité et premiers soins

A.2.1 Généralités

Avant de commencer tout travail de maintenance/service sur un appareillage électrique, il convient de procéder à une inspection détaillée de l'état de l'appareillage électrique et une documentation de l'état est recommandée. Outre les règlements locaux de sécurité, il convient de suivre au moins les règles générales de sécurité suivantes:

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

Il convient que des documents écrits qui autorisent le travail sur les appareillages électriques soient acceptés et signés à la fois par le propriétaire/utilisateur de l'appareillage électrique et par le fournisseur de service.

Le Tableau A.1 donne la liste des principaux points à surveiller en cas de travail sur un appareillage électrique avec SF₆.

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

Élément	Travail au voisinage de l'appareillage électrique (exploitation de l'appareillage électrique, contrôle visuel, nettoyage du local)	Remplissage, complément de remplissage, récupération, évacuation des compartiments sous gaz	Ouverture des compartiments sous gaz, travail sur des compartiments sous gaz ouverts
Fiches techniques de sécurité/manuels d'exploitation des matériaux	Applicable	Applicable	Applicable
Formation	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Appareils de manipulation du SF ₆	Non exigé	Applicable	Applicable
Matériel de nettoyage/neutralisation	Non exigé	Non exigé	Applicable
Équipement individuel de protection	Non exigé ^b	Non exigé ^b	Applicable
^a Il convient de spécifier les informations générales en fonction du type de travail et d'installation, en fonction des règlements locaux de sécurité. ^b Les règlements locaux peuvent exiger de porter des chaussures de sécurité, un casque et des lunettes de protection pour s'approcher de l'appareillage.			

Il convient d'afficher une note stipulant l'interdiction des feux ouverts, des flammes nues (par exemple, allumettes), de fumer, d'utiliser des moteurs thermiques, un chauffage supérieur à 180 °C et le soudage sans précautions particulières, car le SF₆ se décompose en présence de certains métaux à une température supérieure à 200 °C, et se décompose de lui-même à des températures supérieures à 500 °C. Les arcs électriques (dans le cadre d'opérations normales ou d'une interruption des courants de défaut) provoquent la décomposition. Les flammes nues peuvent également provoquer la décomposition. Il convient d'afficher des instructions de premiers soins (voir A.2.8) en tout lieu dans lequel le SF₆ est manipulé.

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

- utilise des outils et des appareils de manipulation adaptés;
- porte des vêtements de protection appropriés (voir A.2.5);
- observe une hygiène personnelle très stricte;
- se lave ainsi que les appareils de manipulation connexes, en utilisant des matériaux jetables, avant de quitter la zone de travail;
- retire les vêtements de protection et les lave soigneusement dès que possible après avoir quitté la zone de travail;

- assure que les vêtements, les outils et les composants ayant été en contact avec des produits de décomposition soient emballés en toute sécurité dans des sacs scellés ou d'autres récipients scellés et soient ensuite traités pour neutraliser tous les résidus.

A.2.2 Protection du personnel

Il convient que le SF₆ ne soit manipulé que par du personnel habilité. Le module de formation peut être adopté, en fonction du type de travail à effectuer sur l'appareillage électrique (voir A.4.2).

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

Le Tableau A.2 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel et des outils de sécurité exigés lors de l'ouverture ou de l'accès à un compartiment sous gaz. Aucune différence substantielle entre les conditions d'entrée et de sortie n'est indiquée lors de l'ouverture ou de l'accès au compartiment sous gaz. Des protections spécifiques contre les produits de décomposition solides dispersés par le vent sont exigées lors de l'ouverture dans les conditions extérieures.

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

		Risque potentiel	Mesures de sécurité	Matériel et outils de sécurité
SF ₆ très faiblement décomposé	SF ₆ faiblement ou fortement décomposé	Fumées ou substances de nettoyage	Ventilation	Ventilateur d'aspiration
		Asphyxie due à une concentration élevée en SF ₆ restant.	Ventilation Mesurage de la concentration en O ₂ et/ou en SF ₆ avant d'entrer, avec la valeur de concentration minimale de O ₂ exigée pour l'entrée = 16 %. Port d'équipement individuel de protection	Ventilateur d'aspiration Dispositif de mesure de la concentration en O ₂ et/ou en SF ₆ Appareil respiratoire autonome (respirateur)
		Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilation Port d'équipement individuel de protection Mesurage de la concentration en produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilateur d'aspiration Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome (de préférence) ou au moins masque de protection respiratoire (filtre)
		Produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs	Élimination des produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs Port d'équipement individuel de protection Protection des produits de décomposition solides contre l'hydrolyse	Aspirateur Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome (de préférence) ou au moins masque de protection respiratoire Lunettes de sécurité Protection de l'environnement contre la pluie ou le vent

Comme pour tout gaz à l'exception de l'O₂, une concentration supérieure à 19 % de SF₆ dans l'air constitue un risque potentiel d'asphyxie. Ceci est dû au fait qu'il diminue la concentration en O₂ à moins de 16 %, constituant le seuil d'asphyxie généralement admis. Il est donc recommandé de mesurer la concentration en O₂ ou en SF₆ dans le compartiment sous gaz après la ventilation et avant d'y accéder. De plus, la concentration en O₂ ou en SF₆ dans l'environnement ambiant peut être vérifiée en cas de travail dans des espaces confinés.

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

A.2.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés

Le matériel et les outils de sécurité non réutilisables ayant été en contact avec des produits de décomposition solides ou des matériaux des absorbeurs sont considérés comme étant contaminés. Ils sont récupérés ultérieurement et placés dans des sacs en plastique. Les sacs en plastique sont scellés avec un ruban adhésif et étiquetés. Leur élimination est effectuée conformément aux règlements locaux.

Il convient de nettoyer le matériel et les outils de sécurité réutilisables, par exemple en les lavant et en les neutralisant dans une solution eau/soude avec 10 % en poids de soude liquide ou équivalent, puis en les rinçant à l'eau claire. Des exemples de solutions neutralisantes sont donnés dans l'IEC 60480:2019, Tableau 11.

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

A.2.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression

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

Tout le matériel et les outils ou dispositifs de mesure utilisés pendant la manipulation du SF₆ sont susceptibles de contenir du SF₆ gazeux ou liquide à haute pression. Il convient de les manipuler avec soin.

A.2.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel

L'utilisation d'équipement de sécurité et de protection du personnel n'est pas liée à la présence de l'appareillage électrique contenant du SF₆ lui-même. Pour accéder au voisinage de l'appareillage électrique, des chaussures de sécurité, un casque et des lunettes de protection peuvent être exigés en fonction des règlements locaux.

En cas de fuite anormale de SF₆, des règles de sécurité supplémentaires s'appliquent pour pénétrer dans un local d'appareillage, conformément à A.2.7.

Il convient que les manuels d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifient l'équipement de protection exigé.

Selon le type de travail à exécuter sur le site et conformément au Tableau A.2, les travailleurs impliqués dans la manipulation du SF₆ sont dotés de l'équipement de sécurité et de protection individuelle suivant:

- gants de protection: gants adaptés, résistants aux acides, par exemple en néoprène, en PVC ou en caoutchouc;
- lunettes de protection: lunettes industrielles de type chimique selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 166 [3]);
- masque de protection respiratoire: à utiliser en même temps que les gants de protection, le masque de protection respiratoire aide à protéger la bouche et le nez contre la poussière, et il convient de l'utiliser en cas d'exposition à des zones peu poussiéreuses seulement;
- masque facial intégral/demi-masque: pour une inspection de courte durée et un travail où une ventilation peut être assurée, mais où la concentration en produits de décomposition peut dépasser le niveau maximal approprié, il convient d'utiliser un masque facial avec filtre à charbon actif remplaçable conformément aux règlements locaux (par exemple, les Normes européennes EN 140 [4], EN 14387 [5] et EN 143 [6] spécifient respectivement des masques, filtres à gaz et filtres à particules. Des filtres combinés de type A2/B2/E2/K2/P3 ou A3/B3/E3/K3/P3 fabriqués selon ces normes sont disponibles);
- tenue de protection à usage unique: vêtements de protection antipoussière à porter au-dessus des vêtements normaux, couvre-chaussures, protection capillaire, tenue jetable à capuche de qualité industrielle sans poches, non perméable (par exemple, en polypropylène lié) comportant des serrages de chevilles et de poignets couvrant les chaussures et les gants;
- appareil respiratoire autonome (respirateur): lors de l'entrée et/ou des manœuvres dans des applications intérieures après une fuite anormale ou un rejet soudain dû à un arc interne, lorsque la concentration en O₂ ou que la teneur en produits de décomposition dépasse les valeurs TWA, un respirateur est utilisé selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 136 [7]);
- dispositif de mesure de la concentration en O₂ pour surveiller en permanence la concentration en O₂ dans l'environnement;
- dispositif de mesure de la concentration en SF₆;
- protection de l'environnement pour les emplacements de travail à l'extérieur: abris temporaires pour empêcher la pénétration de pluie et la dispersion par le vent de produits de décomposition solides (le cas échéant) lorsque le compartiment sous gaz est ouvert;
- aspirateur: aspirateur spécifique à haut rendement équipé d'un filtre capable de piéger des particules selon la classe de poussières H (risque élevé). Les classes de poussières sont spécifiées à l'Annexe AA de l'IEC 60335-2-69:2021;
- ventilateur d'aspiration: matériel permettant de forcer la ventilation d'espaces fermés et d'autres zones inaccessibles. Ce matériel peut être portable ou installé de façon permanente, en fonction de la taille de l'installation.

A.2.6 Équipements et services

Lorsque les compartiments sous gaz qui contiennent du SF₆ usagé sont ouverts (après la récupération de SF₆), il convient de mettre à la disposition des travailleurs des équipements de lavage appropriés, et une réserve d'eau pour préparer des solutions de nettoyage.

A.2.7 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de SF₆

En cas de rejet soudain de SF₆, il convient d'évacuer immédiatement les locaux concernés. Après avoir ventilé les locaux, seul le personnel formé et qualifié (voir l'Article A.4) est autorisé à entrer de nouveau et à nettoyer le local d'appareillage ou à accéder à l'appareillage électrique.

Les risques potentiels, les mesures de sécurité et les équipements et outils de sécurité exigés (voir le Tableau A.2) sont en outre valables pour l'ensemble du local dans lequel le rejet soudain de SF₆ s'est produit.

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

Lors de la pénétration dans des zones pouvant présenter une concentration faible en O₂, suivre les règlements locaux relatifs aux conditions de sécurité. La présence d'une deuxième personne en contact visuel et audible permanent augmente le niveau de sécurité.

A.2.8 Équipements et traitement de premiers soins

A.2.8.1 Généralités

L'équipement de premiers soins comporte:

- l'équipement industriel normal de premiers soins incluant un équipement de lavage des yeux contenant une solution saline;
- gel de gluconate de calcium (gel antidote du HF);
- un moyen pour entrer en contact avec les services de secours;
- des recommandations de médecins.

Il convient que l'application des règles générales de sécurité (voir A.2.1) réduise le plus possible la probabilité d'accident. En cas d'accident, il convient d'appliquer un traitement de premiers soins comme cela est décrit dans les articles suivants.

A.2.8.2 Irritation de la peau

En cas de signes d'irritation de la peau, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Les vêtements contaminés sont retirés et la partie affectée est lavée à l'eau courante fraîche. Appliquer du gel de gluconate de calcium après avoir retiré l'acide fluorhydrique sur la peau. Il convient de rechercher les conseils de médecins.

A.2.8.3 Irritation des yeux

En cas de signes d'irritation des yeux, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Une irrigation de l'œil ou des yeux est effectuée immédiatement et sans interruption jusqu'à ce qu'un médecin conseille au patient de l'interrompre.

A.2.8.4 Difficultés respiratoires

En cas de difficultés respiratoires, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Il convient d'enlever les vêtements contaminés portés par une personne ayant des difficultés respiratoires et de couvrir cette personne d'une couverture en la maintenant au calme et en observation continue. Il convient de rechercher une assistance médicale d'urgence sans tarder. Si le patient arrête de respirer, il convient qu'un personnel formé et qualifié commence immédiatement à pratiquer la respiration artificielle. Un défibrillateur externe automatique peut être utilisé conformément aux règlements locaux.

A.3 Impact sur l'environnement

Des informations relatives aux effets sur l'environnement du SF₆ sont consignées dans l'IEC 60376:2018, Annexe B. Il est nécessaire de veiller en particulier à éviter tout rejet de SF₆ dans l'atmosphère en raison de son potentiel élevé de réchauffement climatique.

A.4 Formation et certification

A.4.1 Généralités

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

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

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

Étant donnée la nature spécifique de l'industrie et de l'appareillage électrique, la sécurité et la continuité du service sont très importantes. En fonction des tâches que doit réaliser le personnel formé, la formation peut être choisie de manière à couvrir différents domaines d'application allant, par exemple, de la simple formation de base à la formation approfondie. Il convient que la formation concerne une conception spécifique (par exemple, disjoncteur à cuve sous haute tension, appareillage moyenne tension, appareillage à haute tension isolé au gaz) et des conceptions différentes exigent une certification par des formations différentes.

Dans tous les cas, il convient de fonder la formation sur les règlements locaux, les manuels d'instructions d'exploitation de l'appareillage électrique, les manuels d'instruction d'exploitation de l'appareil de manipulation, les fiches techniques de sécurité (SDS - security data sheets), les fiches techniques des matériels, les normes internationales et les brochures du CIGRE. Dans certains pays, la certification des personnes physiques exécutant les procédures de manipulation du SF₆ est obligatoire. S'il existe des règlements locaux (les règlements de l'Union européenne N° 517/2014 [8] et N° 2015/2066 [9]), il convient de les appliquer afin de réduire le plus possible les émissions de SF₆ pendant la fabrication, l'exploitation et à la fin de vie de l'appareillage électrique.

A.4.2 Formation

Il convient que les travailleurs qui manipulent du SF₆ soient habitués aux aspects de sécurité, de réglementation et d'environnement, aux propriétés des gaz, aux outils et matériels de manipulation de gaz et aux procédures permettant de garantir la continuité du service et de réduire le plus possible les émissions de SF₆.

Les différents aspects que doit couvrir une formation sont les suivants:

- sécurité et premiers soins (voir l'Article A.2), en particulier
 - règlements locaux, plans d'urgence et instructions, par exemple en cas d'asphyxie, de défaut d'arc interne;

- matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel;
- matériel de sécurité exigé pour travailler sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche;
- matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel, travaillant sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche, neutralisation et manipulation des produits de décomposition;
- connaissance de base des questions liées à l'environnement (par exemple, modifications climatiques, protocole de Kyoto, réchauffement climatique, voir l'IEC 60376:2018, Annexe B);
- pertinence pour l'environnement des émissions de SF₆ et approches de limitation;
- caractéristiques physiques, chimiques, isolantes et de commutation du SF₆ (voir l'IEC 60376:2018, Annexe A);
- utilisation du SF₆ dans les appareillages électriques (isolation, commutation);
- existence de règlements locaux et de normes internationales en relation avec la tâche;
- manipulation, dangers et caractéristiques pour la santé du SF₆ (voir l'IEC 60480:2019, Annexe C);
- conception de l'appareillage électrique (propriétés et applications/fonctionnalités);
- vérification de la qualité du SF₆ selon les normes pertinentes (l'IEC 60376 et l'IEC 60480, par exemple);
- les manuels d'instructions d'exploitation donnés par le fabricant de l'appareillage électrique en relation avec les tâches;
- types de compartiments sous gaz (voir 3.1.17);
- instruments et procédures pour vérifier la qualité du SF₆;
- procédures de manipulation du gaz SF₆:
 - complément de remplissage du système à pression autonome (voir 5.1);
 - procédures d'évacuation de l'air, de remplissage du SF₆ (voir 4.2) et de complément de remplissage avec du SF₆ (voir 4.3);
 - récupération et régénération du SF₆ très faiblement décomposé, faiblement décomposé (voir 6.2) et fortement décomposé (voir 6.3); manipulation, neutralisation et élimination des produits de décomposition (voir A.2.3), manipulation des matériels et outils de sécurité qui ont été en contact avec des produits de décomposition solides (voir A.2.3);
- méthodes de détection des fuites et techniques de réparation;
- catégories pour le SF₆ (voir 3.2);
- stockage et transport du SF₆ (voir l'Article A.5);
- surveillance du SF₆ gazeux et enregistrement approprié de données associées aux règlements locaux sur l'environnement;
- appareils de manipulation du SF₆ en relation avec les tâches (voir l'Article A.6);
- procédures pour pénétrer dans le local d'appareillage en cas de fuite anormale et/ou de rejet soudain de SF₆ du(e) à un feu ou un défaut d'arc interne (voir A.2.7);
- transport de l'appareillage électrique jusqu'au site de démontage, le cas échéant;
- démontage de l'appareillage électrique et tri des pièces (voir 7.5);
- fonctionnement du système de perçage étanche, si nécessaire (voir 7.4).

A.4.3 Certification

Réussite complète à la formation conduisant à une certification maison, dans laquelle "certification maison" signifie un certificat de compétence ou autre confirmation écrite, délivré par un employeur à l'un de ses propres employés ou à des personnes externes ayant terminé avec succès un cours de formation relatif au travail correspondant. Des sessions d'examens théoriques et pratiques sont organisées pour prouver la compétence et l'aptitude obtenues. Toutefois, toute certification exigée par les règlements locaux prévaut sur le présent document.

Il convient de conserver des archives suivantes:

- le contenu de la formation;
- la date à laquelle la formation a été effectuée.

La limitation des tâches à exécuter (récupération du SF₆ pour une certaine conception, par exemple) au personnel qui a obtenu une certification pour les niveaux de compétence respectifs et maintien d'un haut niveau d'expertise.

A.5 Stockage et transport

A.5.1 Généralités

Il convient de toujours stocker et transporter le SF₆, soit dans des récipients, soit dans un appareillage électrique, conformément aux règlements locaux et internationaux.

Un récipient vide peut toujours contenir une quantité résiduelle de SF₆. Il convient de le stocker et de le transporter de la même manière que pour un récipient plein.

A.5.2 Stockage des récipients remplis de SF₆

Le SF₆ peut être stocké de deux manières : sous forme de gaz ou sous forme liquide. À 20 °C, le stockage gazeux est possible à une pression d'environ 2 000 kPa sans liquéfaction. À 20 °C, le SF₆ commence à se liquéfier à environ 2 100 kPa. Le stockage gazeux présente l'avantage de réduire les temps de récupération et de remplissage, mais nécessite de grands volumes de stockage et il est donc généralement limité aux appareillages électriques de petit volume ou utilisé dans des installations de manipulation de gaz à des emplacements fixes. Le stockage liquide donne la possibilité de diminuer les volumes de stockage et de transporter économiquement de grandes quantités de SF₆. Des compresseurs adaptés avec système de refroidissement supplémentaire sont nécessaires à la liquéfaction du SF₆. Il convient de strictement respecter le facteur de remplissage maximal. Il dépend de la pression de calcul du récipient et de la concentration en produits de décomposition gazeux. Le facteur de remplissage est le poids du SF₆ dans le récipient divisé par le volume du récipient. Il est en général exprimé en kg/l. Utiliser une balance pour éviter un remplissage excessif. Il convient que le fabricant du récipient déclare le facteur de remplissage maximal, la pression maximale et la température maximale du récipient. Il convient de manipuler avec précaution les récipients et de les stocker dans une zone fraîche, sèche, bien ventilée, à l'écart de tout matériau inflammable ou explosif. Il convient de les protéger de l'éclairage direct du soleil, de les monter à l'écart d'un sol humide et de les fixer de manière à éviter tout renversement. Il convient d'adopter des protections spéciales du robinet de manière à éviter tout dégât potentiel sur le robinet lui-même.

Il convient que les récipients soient rechargeables et clairement étiquetés pour identifier leur contenu. Il convient de séparer physiquement les récipients qui contiennent différentes qualités de SF₆.

Lorsque du SF₆ usagé est stocké sur le site, il convient que les récipients de stockage satisfassent aux règlements locaux et internationaux concernant les récipients sous pression.

Il convient également que l'étiquetage du récipient satisfasse aux règlements locaux et internationaux.

Le Tableau A.3 donne des exemples de types de récipients. Dès que possible, il est recommandé d'utiliser des récipients de stockage transportables pour des raisons pratiques.

Tableau A.3 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport du SF₆

Gaz/fluide	Caractéristique	Type de récipient
SF ₆ de qualité technique ^a	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
SF ₆ usagé pouvant être réutilisé ^b	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
SF ₆ usagé ne pouvant pas être réutilisé	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
	Gaz liquéfié contenant des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques ^c	Récipients spéciaux approuvés pour le stockage et le transport du gaz corrosif (par exemple, acide fluorhydrique HF) avec robinet et adaptateur anticorrosion. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en jaune).
^a Éviter toute contamination des récipients spécifiques au SF ₆ de qualité technique. ^b Pour plus d'informations, voir l'IEC 60480. ^c Du SF ₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être régénéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de satisfaire à l'IEC 60480:2019, Tableau 2 et de faciliter le transport.		

A.5.3 Transport des récipients remplis de SF₆

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

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

Les règlements internationaux applicables au transport du SF₆ sont résumés dans le Tableau A.4.

NOTE De plus amples informations sur la numérotation UN, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport sont données en [20].

Tableau A.4 – Règlements internationaux applicables au transport du SF₆

Gaz/fluide	Caractéristique	Classe	Classification finale ^{a, b}	Document de transport ^a
SF ₆ de qualité technique	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 1080 Hexafluorure de soufre 2.2	UN 1080 Hexafluorure de soufre 2.2
SF ₆ usagé pouvant être réutilisé ^c	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (Hexafluorure de soufre et air, azote ou tétrafluorométhane) 2.2
SF ₆ usagé ne pouvant pas être réutilisé	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (Hexafluorure de soufre et air, azote ou tétrafluorométhane) 2.2
	Gaz liquéfié toxique et corrosif (gaz contenant des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques) ^d	2 TC	UN 3308 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE ET CORROSIF N.S.A. 2.3 + 8	UN 3308 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE ET CORROSIF N.S.A. (Hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3 + 8
^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies [20]. ^b La classification finale, y compris le code UN adéquat et les numéros adéquats d'identification des dangers (par exemple, H280), sont donnés dans la fiche technique de sécurité et/ou dans le manuel d'instruction d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. ^c Pour plus d'informations, voir l'IEC 60480. ^d Conformément aux règlements UN pour le transport, un gaz est classé "toxique" lorsque son LC50 < 5 000 µl/l (ppmv). Du SF ₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être régénéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de faciliter le transport. N.S.A.: "Non Spécifié par Ailleurs".				

A.5.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du SF₆

Il convient de stocker et de transporter les appareillages électriques remplis de SF₆ conformément aux règlements locaux et internationaux.

Des règlements internationaux relatifs au transport sont disponibles pour le transport routier (ADR), ferroviaire (RID), maritime (code IDMG) et aérien (IATA – DGR). Ils sont similaires en ce qui concerne la numérotation UN, la classification, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport.

Conformément aux codes de transport ADR, RID et IATA, il convient que la pression de remplissage ne dépasse pas 200 kPa (relative) à 20 °C.

A.5.5 Responsabilités

Le propriétaire de l'appareillage électrique utilisant du SF₆ est responsable de la bonne utilisation, du transport et de l'élimination de l'appareillage électrique et du gaz. Il est également responsable de la conservation annuelle des enregistrements concernant le SF₆ contenus dans l'appareillage électrique ou stocké dans des récipients ainsi que des taux d'émission. Ceci est pris en charge par le fabricant de l'appareillage électrique et le fabricant de gaz au moyen des informations de base des manuels selon l'IEC 62271-1:2017 et le règlement local.

A.6 Description des appareils de manipulation

A.6.1 Généralités

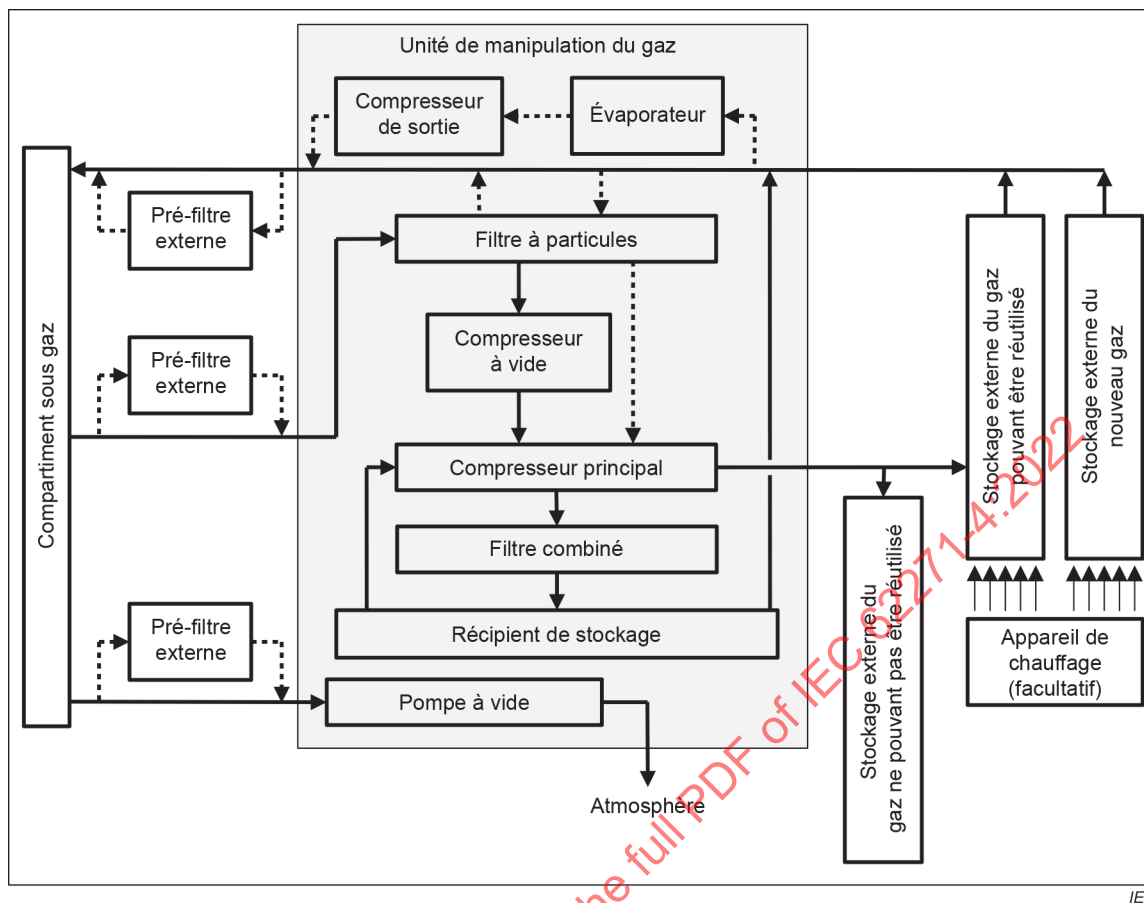
A.6.1.1 Présentation

La présente partie donne des informations concernant la fonctionnalité et les critères de performance minimales des appareils de manipulation du SF₆ et des composants spécifiques.

Il convient de choisir le type et la taille appropriés de l'appareil de manipulation en fonction de la quantité de SF₆ à manipuler. La Figure A.2 représente l'aménagement fonctionnel de base. Les fonctions types sont les suivantes:

- évacuation de l'air et/ou du N₂ du compartiment sous gaz;
- remplissage de SF₆ dans le compartiment sous gaz;
- récupération du SF₆ du compartiment sous gaz;
- stockage du SF₆ dans des récipients de stockage internes ou externes;
- élimination de polluants;
- remplissage du compartiment sous gaz avec l'air ambiant;
- transfert de récipient à récipient.

Dans cette énumération, les appareils de manipulation ne sont pas nécessairement tous disponibles et/ou exigés selon la conception de l'appareillage électrique. Il s'agit davantage d'une vue d'ensemble théorique sur les solutions techniques possibles.



IEC

Figure A.2 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du SF₆

A.6.1.2 Qualification des appareils de manipulation

Avant d'utiliser un appareil de manipulation, il convient de vérifier qu'il peut être utilisé pour la tâche prévue. Un appareil de manipulation prévu pour exécuter la même tâche, mais destiné à un autre gaz et qui n'est pas qualifié pour le SF₆ peut être endommagé, faire l'objet d'un dysfonctionnement ou donner des relevés erronés, et donc présenter un risque pour l'opérateur ou pour l'appareil de manipulation ou l'appareillage électrique.

A.6.2 Filtres

A.6.2.1 Généralités

Des filtres doivent éliminer les produits de décomposition gazeux réactifs, l'humidité et les particules solides ou les gouttelettes d'huile pendant la manipulation du gaz. Les filtres peuvent faire partie intégrante de l'appareil de manipulation ou des préfiltres externes. Un préfiltre externe peut être exigé pour éliminer les particules, les niveaux d'humidité excessifs et les produits de décomposition gazeux, qui sont des composés acides, et qui peuvent endommager l'appareil de manipulation ou le récipient de stockage du gaz. Les exigences du préfiltre externe sont les mêmes que celles des filtres installés dans l'appareil de manipulation, mais la capacité de préfiltrage peut être considérablement supérieure. Des informations détaillées supplémentaires sur les filtres sont également données dans l'IEC 60480.

A.6.2.2 Types de filtres

A.6.2.2.1 Filtre à particules

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

A.6.2.2.2 Filtre d'humidité et de produits de décomposition gazeux (filtre sec)

Les filtres appropriés peuvent absorber l'humidité et les produits de décomposition gazeux réactifs. Il convient que la taille du filtre soit suffisamment importante pour obtenir une humidité résiduelle inférieure à 200 µl/l (ppmv) et une concentration en SO₂+SOF₂ résiduelle inférieure à 12 µl/l (ppmv), afin de satisfaire à l'IEC 60480:2019, Tableau 2, si le SF₆ est destiné à être réutilisé.

A.6.2.2.3 Filtre combiné

En lieu et place de filtres à particules et à humidité séparés, et de filtres de produits de décomposition gazeux, des filtres combinant ces deux principes de filtration peuvent être installés.

A.6.2.2.4 Filtre à huile

Il convient d'utiliser des filtres à huile contenant du charbon actif dans les cas suivants:

- si un appareil de manipulation lubrifié par de l'huile est utilisé (non recommandé);
- en cas de doute quant à la présence d'une fuite d'huile dans un composant électrique lubrifié par de l'huile inclus dans l'appareillage électrique utilisant du SF₆.

L'élimination de l'huile est effectuée en plusieurs étapes de manière à éviter la diffusion de l'huile.

A.6.3 Pompe à vide

La pompe à vide est utilisée pour évacuer l'air ou d'autres gaz (N₂, par exemple), qui peuvent être rejetés dans l'atmosphère, du compartiment sous gaz/du récipient/de la bouteille d'échantillon avant de les remplir avec du SF₆.

Il convient que la pression résiduelle à l'entrée de la pompe à vide soit inférieure à 0,1 kPa. Pour accélérer l'évacuation des compartiments sous gaz, l'utilisation de pompes à vide avec une pression résiduelle à l'entrée inférieure à 0,010 kPa est recommandée.

La pompe à vide est équipée d'un manomètre à vide. Il convient que la résolution du manomètre à vide soit au moins inférieure à 0,1 kPa (la valeur recommandée est inférieure à 0,010 kPa). Des manomètres à vide indépendants du type de gaz sont généralement recommandés. Les capteurs à vide thermiques dépendent du type de gaz et ne sont pas recommandés. Par exemple, ils réagissent différemment lorsque de petites quantités de SF₆ sont toujours présentes, et donnent donc un relevé de vide erroné.

Un robinet doit couper la liaison entre le compartiment sous gaz et la pompe à vide. Lorsque des pompes à vide lubrifiées à l'huile sont utilisées, il convient que le robinet se ferme automatiquement pendant l'arrêt la pompe à vide de manière à éviter la diffusion d'huile dans le compartiment sous gaz.

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

A.6.4 Compresseur principal et à vide

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

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

NOTE 1 Presque tous les types de compresseurs de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile. Les compresseurs les plus récents peuvent obtenir une pression de 0,1 kPa à l'entrée.

NOTE 2 Une pression de sortie assignée de 2 500 kPa du compresseur suffit pour stocker du SF₆ sous forme gazeuse (une pression de 5 000 kPa est généralement utilisée).

NOTE 3 Un dispositif de refroidissement supplémentaire peut être utilisé pour accélérer la récupération de SF₆.

A.6.5 Compresseur de sortie

Lorsque la pression dans le récipient de stockage est supérieure à la pression dans le compartiment sous gaz, il est plus rapide de permettre une expansion directe du gaz. Dans tous les autres cas, un compresseur doit procéder au remplissage de gaz. Le compresseur de sortie, utilisant habituellement un compresseur de type à piston, fonctionne entre une pression d'entrée de gaz d'environ 100 kPa (généralement supérieure à 50 kPa) et la pression dans le compartiment sous gaz.

NOTE Presque tous les types de compresseurs de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile.

A.6.6 Récipients de stockage de gaz externes et internes

Des récipients sous pression ou des récipients de stockage spéciaux pour SF₆ usagé sont disponibles en tant que récipients de stockage de gaz. Ils sont portables, fixes ou installés dans l'appareil de manipulation. Il convient que la pression maximale du récipient de stockage soit appropriée à la pression finale du compresseur, en tenant compte également des températures élevées. Il convient de respecter les règlements locaux pour l'exploitation des récipients sous pression.

A.6.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz

Si le SF₆ est stocké sous forme liquide et utilisé en tant que gaz, des pertes thermiques dues à l'évaporation à l'intérieur du récipient peuvent provoquer le refroidissement du SF₆ lui-même jusqu'à une température à laquelle il ne s'évapore plus. Ceci peut habituellement être observé par un anneau/une ligne de givre visible sur le récipient.

Pour remplir rapidement de grands volumes, il convient de concevoir l'appareil de manipulation de manière à extraire le SF₆ liquide qui est ensuite vaporisé à l'intérieur d'un évaporateur.

L'évaporateur est conçu de sorte qu'aucun liquide ne puisse atteindre le compartiment sous gaz.

De plus, des appareils de chauffage des récipients de stockage de gaz peuvent être utilisés, et il convient de les concevoir de manière à éviter une surchauffe accidentelle et à ne pas dépasser une température de gaz de 60 °C.

A.6.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries

Il convient de concevoir les conduites de gaz et les connexions de tuyauteries de façon à éviter les fuites et la corrosion. Du cuivre et du laiton ou de l'acier inoxydable peuvent être utilisés à cet effet. Il convient que la conception à la fois de la tuyauterie et des connexions tienne compte des vibrations de sorte que des opérations périodiques telles qu'un resserrage des connexions ne soient pas nécessaires.

A.6.9 Instruments de contrôle

Il convient de prévoir des instruments de contrôle pour indiquer la pression de gaz dans le compartiment sous gaz et dans le récipient de stockage, le niveau de vide, la température du gaz, etc. Il convient de les disposer dans une position telle qu'elles puissent être observées lors du lancement des opérations de l'appareil de manipulation. Il convient que l'exactitude et la résolution des instruments de contrôle soient adéquates pour permettre la conservation des conditions de fonctionnement de sécurité.

A.6.10 Soupapes de sûreté

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

A.6.11 Connexions de tuyaux flexibles

L'appareil de manipulation, le récipient de stockage de gaz et le compartiment sous gaz sont reliés par l'intermédiaire de connexions de tuyaux flexibles. Il convient d'apporter un soin particulier de manière à éviter la présence d'air ou d'autres composés à l'intérieur des tuyaux afin de diminuer la possibilité de contamination du gaz. Pour cette raison, des connexions de tuyaux avec couplage à fermeture automatique et étanchéité au vide sont exigées. Des tuyaux appropriés, généralement réalisés en caoutchouc synthétique ou en acier inoxydable flexible, capables de supporter le vide et la perméation sont exigés. Il convient que la société d'exploitation spécifie la gestion des tuyaux en tenant compte des spécifications, telles que les recommandations et l'entretien relatifs au remplacement en fin de vie, définies par le fabricant des tuyaux.

A.6.12 Dispositifs portables de mesure de gaz

A.6.12.1 Généralités

Le Tableau A.5 donne une vue d'ensemble des dispositifs portables de mesure de gaz incluant les valeurs recommandées pour la plage, la température de fonctionnement et l'exactitude minimale. Ces grandeurs sont généralement déclarées par le fabricant de dispositifs portables de mesure de gaz dans la fiche technique.

Tableau A.5 – Dispositifs de mesure de gaz

Dispositif	Mesurage	Plage	Température d'exploitation	Exactitude minimale
Hygromètre (appareil de mesure de point de gelée/rosée)	Humidité (point de gelée/rosée)	40 µl/l (ppmv) à 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C à 0 °C)	-10 °C à 40 °C	(±2 °C)
Dispositif de mesure de la concentration en SF ₆	Concentration en SF ₆	80 % à 100 %	-10 °C à 40 °C	±0,5 %
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Les produits de décomposition sont par exemple SO ₂	1 µl/l (ppmv) à 250 µl/l (ppmv)	-10 °C à 40 °C	±15 % de la plage complète
Manomètre de SF ₆	Pression	0 kPa à 1 100 kPa (HV) 0 kPa à 200 kPa (MV)	-10 °C à 40 °C	±1 % de la plage complète
Thermomètre	Température	-25 °C à 70 °C	-25 °C à 70 °C	±1 °C

Par convention, les valeurs de pression sont consignées à 20 °C. Utiliser un manomètre à compensation de température ou calculer de nouveau en fonction de la température réelle du gaz pendant le mesurage.

Des mesurage de qualité de gaz peuvent être effectués dans les conditions de laboratoire et sur le site. Les articles qui suivent décrivent les appareils portables les plus couramment utilisés sur le site pour le mesurage de:

- la teneur en humidité dans le gaz et/ou le point rosée ou de gelée;
- la concentration en SF₆;
- la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs conduisant à une concentration d'acidité résiduelle.

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

A.6.12.2 Appareil de mesure de point de gelée/rosée

La teneur en humidité peut être mesurée en utilisant différents principes de mesure et instruments de mesure. Cependant, un appareil de mesure de point de gelée/rosée est l'appareil portable le plus courant utilisé à cet effet. Cet appareil mesure le point de gelée/rosée de l'humidité à l'intérieur du gaz, exprimé en °C, et peut le convertir en concentration volumique relative, exprimée en µl/l (ppmv).

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- capteur résistant aux traces d'huile et aux gaz corrosifs;
- tuyaux résistant à la perméation utilisant des connexions de robinet auto-obturants;
- tuyaux en acier inoxydable et connexions réalisées en matériaux hydrophobes, par exemple, PTFE;
- étalonnés ou capables d'étalonnage sur le site;
- aucun rejet de SF₆ gazeux dans l'environnement (par exemple, petit compresseur pour complément de remplissage de gaz ou utilisation d'une bouteille vide);
- durée moyenne pour obtenir la lecture inférieure à 5 min.

A.6.12.3 Dispositifs de mesure de la concentration en gaz – dispositifs de mesure de la concentration en SF₆

Dispositifs qui mesurent la vitesse du son ou la conductivité thermique du gaz utilisé. Les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs de SF₆ purs. Les systèmes fondés sur le mesurage de la vitesse du son sont rapides (temps de réponse inférieur à 1 min), ne nécessitent pas de réétalonnage et n'utilisent qu'une quantité de gaz minimale. Leur lecture est la concentration en SF₆ exprimée en %.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- aucun rejet de SF₆ gazeux dans l'environnement (par exemple, petit compresseur pour complément de remplissage de gaz ou utilisation d'une bouteille vide);

Il convient de ne pas utiliser les dispositifs mesurant la concentration en O₂, puis calculant le % de SF₆, car des gaz non réactifs différents (N₂ ou CF₄, par exemple) peuvent être présents.

A.6.12.4 Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs

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

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

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

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

A.6.12.5 Détecteurs de gaz portables

Les détecteurs de SF₆ portables appartiennent globalement aux types suivants:

- détecteur à capture d'électrons utilisant une source de particules β pour ioniser un échantillon pompé. Le courant d'ions est mesuré entre les électrodes. Un support gazeux inerte est habituellement utilisé. Des sensibilités de SF₆ dans l'air descendant jusqu'à 0,1 µl/l (ppmv) peuvent être atteintes;
- cellule à décharge par effet couronne utilisant une haute tension (1 kV à 2 kV) appliquée à une configuration d'électrode plane ponctuelle. Le courant de décharge est mesuré. Ce type de détecteur est utilisé dans une diversité d'unités hautement portables alimentées par batterie. Des sensibilités inférieures à 10 µl/l (ppmv) peuvent être atteintes.

Des détecteurs à capture d'électrons sont généralement utilisés pour le suivi et la quantification des fuites.

Si elles sont suffisamment sensibles, les cellules à décharge par effet couronne peuvent être appropriées pour évaluer si une zone contient du SF₆ ou pour la détection des fuites.

A.6.13 Contrôleur de fuite de gaz

Pour les essais de fuite à haute sensibilité, des détecteurs infrarouges photoacoustiques peuvent être utilisés. Ils reposent sur les ondes de pression émises par les molécules de SF₆ éclairées par la lumière infrarouge monochromatique. Des microphones spéciaux détectent le signal acoustique qui est directement proportionnel à l'énergie absorbée. Des sensibilités descendant jusqu'à 0,01 µl/l (ppmv) peuvent être atteintes. D'autre part, le temps de réponse d'environ 15 s empêche d'utiliser le dispositif pour la localisation des fuites, lequel est donc essentiellement utilisé en usine après la production ou pendant les essais de type.

Une seconde possibilité consiste à utiliser une technologie de caméra infrarouge qui permet de générer une image de gaz optique et de détecter les fuites de SF₆ à une distance de plusieurs mètres. La sensibilité des détecteurs de caméra infrarouge est inférieure à celle des détecteurs infrarouges photoacoustiques.

A.6.14 Systèmes d'alarme de concentration en gaz

Des systèmes d'alarme de concentration en gaz peuvent être installés pour surveiller la concentration en SF₆ dans un local. Ces systèmes d'alarme exigent des détecteurs ayant une très grande stabilité à long terme. La caractéristique d'absorption des infrarouges du SF₆ est utilisée comme base pour la majeure partie des détecteurs de ce type. Une source d'infrarouges est utilisée pour chauffer un échantillon de gaz dans un dispositif de mesure de pression différentielle utilisant un transducteur sensible à la capacité. L'augmentation de pression est mesurée.

Des sensibilités descendant jusqu'à 10 µl/l (ppmv) peuvent être atteintes. Des installations de vérification fonctionnelle automatique peuvent être incorporées. Dans certaines installations, des échantillons d'air sont prélevés par tuyau depuis différents points jusqu'à un détecteur central. Le point de détection active peut être choisi automatiquement ou manuellement.

Les systèmes d'alarme comportant des détecteurs de SF₆ ne sont généralement utilisés que lorsque de très grands volumes de SF₆ sont contenus dans l'appareillage électrique en intérieur, par exemple, dans des installations d'appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse.

A.6.15 Bouteilles d'échantillonnage de gaz

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

A.7 Procédures de régénération

Les informations relatives aux procédures de régénération du SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe E.

A.8 Produits de décomposition

Les informations relatives aux produits de décomposition du SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe B.

A.9 Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé

Des informations relatives au SF₆ et à la procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe C.

A.10 Manipulation du SF₆

A.10.1 Généralités

Le domaine d'application du présent paragraphe consiste à traiter les particularités de manipulation du SF₆ pendant l'installation, la mise en service, après une réparation ou une révision et l'élimination en fin de vie de l'appareillage électrique.

A.10.2 Remplissage de compartiments sous gaz avec du SF₆

Le paragraphe 4.2 ou 4.4 s'applique.

A.10.3 Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec du SF₆ à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Le paragraphe 4.3 ou 5.1 s'applique.

A.10.4 Vérification de la qualité du SF₆

Le paragraphe 5.2 s'applique.

A.10.5 Récupération et régénération du SF₆

L'Article 6 s'applique.

A.11 Spécifications du SF₆ nécessaire au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique

Sauf spécification contraire par le fabricant de l'appareillage électrique, il convient que le SF₆ à utiliser pour remplir ou faire le complément de remplissage de l'appareillage électrique satisfasse (au moins) aux critères indiqués dans l'IEC 60480.

Annexe B (informative)

Mélanges de SF₆

B.1 Propriétés gazeuses

B.1.1 Généralités

Les mélanges de SF₆ sont composés de SF₆ mélangés à un gaz complémentaire (N₂ ou CF₄) selon la concentration spécifiée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. En règle générale, les rapports de mélange sont compris entre 10 % et 75 % de SF₆ pour les mélanges SF₆/N₂, et entre 35 % et 50 % de SF₆ pour les mélanges SF₆/CF₄.

L'utilisation de mélanges de SF₆ dans un appareillage électrique a pour objet:

- d'éviter la liquéfaction du SF₆ aux basses températures ambiantes en réduisant la pression partielle du SF₆;
- de réduire la quantité de SF₆ pour des raisons environnementales et pour réduire les coûts liés au SF₆.

Les propriétés du gaz des mélanges de SF₆ et de leurs composants sont présentées dans les paragraphes ci-après.

B.1.2 Propriétés chimiques

Des informations relatives aux propriétés chimiques du SF₆ de qualité technique sont consignées dans l'IEC 60376:2018, Annexe A.

Des informations relatives aux propriétés chimiques du N₂ sont consignées à l'Annexe D.

Le tétrafluorométhane CF₄ est un gaz synthétique formé de 4 atomes F et d'un atome C. Le CF₄ pur est inodore, sans saveur, incolore, non toxique, inflammable, stable et inerte.

Le Tableau B.1 donne la liste des principales caractéristiques chimiques du CF₄.

Tableau B.1 – Principales caractéristiques chimiques du CF₄ et N₂

Formule chimique	CF ₄	N ₂
Numéro CAS ^a	75-73-0	7727-37-9
Numéro d'enregistrement REACH	01-2120751230-69	-
Poids moléculaire	88,0043 g/mol	28,013 g/mol
Température de décomposition	2 700 °C	≈ 7 000 °C
^a Le numéro CAS est attribué par le Chemical Abstracts Service, qui possède un registre des informations sur les substances chimiques. Il n'a pas de signification chimique. L'accès aux informations se fait par l'intermédiaire d'un service d'abonnement.		

B.1.3 Propriétés physiques

Des informations relatives aux propriétés physiques du SF₆ de qualité technique sont consignées dans l'IEC 60376:2018, Annexe A.

Des informations relatives aux propriétés physiques du N₂ utilisé comme gaz complémentaire dans les mélanges de SF₆ sont consignées à l'Annexe D.

Dans les conditions ambiantes normales, le CF₄ est environ trois fois plus lourd que l'air. Il existe donc un risque d'asphyxie dans les zones non suffisamment ventilées dans lesquelles la concentration en O₂ est faible. Le mélange avec de l'air par convection et diffusion est lent, mais dès que les gaz ont été mélangés, ils ne se séparent plus. La conductivité thermique du CF₄ est inférieure à la conductivité thermique de l'air.

Dans un appareillage électrique, la pression partielle du CF₄ est en général comprise entre 350 kPa et 650 kPa. Aucune liquéfaction du N₂ ou du CF₄ ne peut se produire dans les conditions de fonctionnement types des mélanges de SF₆ dans les appareillages électriques.

Le Tableau B.2 donne la liste des principales caractéristiques physiques du CF₄.

Tableau B.2 – Principales caractéristiques physiques du CF₄ et N₂

Formule chimique	CF ₄	N ₂
Point d'ébullition à 101,3 kPa	-128 °C	-196 °C
Point de congélation à 101,3 kPa	-187 °C	-210 °C
Point de sublimation à 101,3 kPa	-	-
Densité du liquide au point d'ébullition	1607 kg/m ³	808 kg/m ³
Densité du gaz à 20 °C et à 100 kPa	3,6248 kg/m ³	1,15 kg/m ³
Pression de vapeur à 20 °C	-	-
Température critique	-45,65 °C	-147 °C
Pression critique	3 745 kPa	3 399 kPa
Densité critique	633,0 kg/m ³	314 kg/m ³
Potentiel de réchauffement climatique (GWP ₁₀₀)	6 630 ^a	0
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP - Ozone depletion potential)	0	0
^a IEC 60376:2018, Annexe B.		

B.1.4 Comportement d'isolation et de commutation

La rigidité diélectrique du CF₄ pur ou du N₂ pur est environ égale à un tiers de celle du SF₆. La rigidité diélectrique des mélanges de SF₆/CF₄ dépend de manière presque linéaire de la concentration en SF₆ du mélange, alors que la rigidité diélectrique à faibles concentrations en SF₆/N₂ présente une forte augmentation à de faibles concentrations en SF₆ et une tendance à saturer à de fortes concentrations en SF₆. Cet effet de saturation permet une réduction de la concentration en SF₆ sans impact significatif sur la rigidité diélectrique obtenue des mélanges de SF₆/N₂. La rigidité diélectrique des mélanges de SF₆/N₂ est meilleure que celle des mélanges de SF₆/CF₄. Même si les mélanges de SF₆/N₂ et du SF₆/CF₄ sont des milieux diélectriques efficaces, les performances d'isolation des mélanges de SF₆ sont toujours inférieures à celles du SF₆ pur.

Les performances de commutation des mélanges de SF₆/CF₄ sont meilleures que celles des mélanges de SF₆/CF₂. Par conséquent, la technologie de disjoncteur au SF₆/CF₄ a été introduite dans le milieu des années 90 pour remplacer la technologie de disjoncteur au SF₆/N₂ pour certaines applications. Pour autant, la capacité de commutation des mélanges de SF₆ est toujours inférieure à celle du SF₆ pur.

Pour de plus amples informations, voir la brochure 163 du CIGRE [11].

B.2 Sécurité et premiers soins

B.2.1 Généralités

Le paragraphe A.2.1 s'applique.

B.2.2 Protection du personnel

Le paragraphe A.2.2 s'applique avec la modification suivante:

Une formation spécifique traitant la récupération et les conditions de stockage des mélanges de SF₆ usagé à partir d'un compartiment sous gaz est exigée pour le personnel ouvrant le compartiment sous gaz ou y accédant (voir B.4.2).

B.2.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés

Le paragraphe A.2.3 s'applique.

B.2.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression

Le paragraphe A.2.4 s'applique avec la modification suivante:

Tout le matériel et les outils ou dispositifs de mesure utilisés pendant la manipulation du SF₆, du N₂, du CF₄ ou du mélange de SF₆ sont susceptibles de contenir des gaz et/ou des liquides à haute pression. Il convient de les manipuler avec soin.

B.2.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel

Le paragraphe A.2.5 s'applique.

B.2.6 Équipements et services

Le paragraphe A.2.6 s'applique.

B.2.7 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de mélanges de SF₆

Le paragraphe A.2.7 s'applique.

B.2.8 Équipements et traitement de premiers soins

Le paragraphe A.2.8 s'applique.

B.3 Impact sur l'environnement

Des informations relatives aux effets sur l'environnement des mélanges de SF₆ sont consignées dans l'IEC 60376:2018, Annexe B.

B.4 Formation et certification

B.4.1 Généralités

Le paragraphe A.4.1 s'applique.

B.4.2 Formation

Le paragraphe A.4.2 s'applique avec les ajouts suivants:

Il convient que les travailleurs qui manipulent des mélanges de SF₆ soient habitués aux aspects de sécurité, de réglementation et d'environnement, aux propriétés des gaz, aux outils et matériels de manipulation de gaz et aux procédures permettant de garantir la continuité du service et de réduire le plus possible les émissions de SF₆ et de CF₄.

Il convient que la formation couvre également les aspects supplémentaires suivants:

- pertinence pour l'environnement des émissions de CF₄ et approches de limitation;
- caractéristiques physiques, chimiques, isolantes et de commutation du N₂ et du CF₄ (voir l'Article B.1);
- utilisation de mélanges de SF₆ dans un appareillage électrique;
- procédures de manipulation des mélanges de SF₆ (voir l'Article B.10);
 - remplissage des systèmes à pression autonomes
 - complément de remplissage des systèmes à pression autonomes
 - récupération et régénération des mélanges de SF₆ faiblement et fortement décomposés
- vérification de la qualité des mélanges de SF₆ sur site;
- appareils de vérification de la qualité des mélanges de SF₆ (voir B.6.12);
- catégories pour les mélanges de SF₆ (voir 3.3);
- stockage et transport des mélanges de SF₆ (voir l'Article B.5);
- surveillance du CF₄ gazeux et enregistrement approprié de données associées aux règlements locaux sur l'environnement;
- appareils de manipulation des mélanges de SF₆ en relation avec les tâches (voir l'Article B.6).

B.4.3 Certification

Le paragraphe A.4.3 s'applique.

B.5 Stockage et transport

B.5.1 Généralités

Il convient de toujours stocker et transporter les mélanges de SF₆, soit dans des récipients, soit dans un appareillage électrique, conformément aux règlements locaux et internationaux.

Un récipient de mélange de SF₆, de CF₄, de N₂ ou de SF₆ vide peut toujours contenir une quantité résiduelle de gaz. Il convient de le stocker et de le transporter de la même manière que pour un récipient plein.

B.5.2 Stockage des récipients remplis de mélange de SF₆

Les mélanges de SF₆ peuvent être stockés de deux manières : sous forme de gaz ou sous forme liquide. En fonction de la température et de la pression partielle du SF₆, une liquéfaction partielle du SF₆ peut se produire (voir la Figure A.1). Un stockage gazeux sans liquéfaction du SF₆ présente l'avantage de préserver l'uniformité du mélange de SF₆ pouvant être réutilisé (voir l'Article B.8), mais exige d'importants volumes de stockage. Des éléments de chauffage peuvent être utilisés avec récipients de stockage pour augmenter la température de stockage effective et en conséquence la pression. La capacité du récipient de stockage peut donc être substantiellement augmentée.

Le facteur de remplissage est le poids du mélange de SF₆ dans le récipient divisé par le volume du récipient. Il est en général exprimé en kg/l. Il dépend de la pression de calcul, de la température maximale du récipient et de la composition du mélange. Il convient de strictement respecter le facteur de remplissage maximal, la pression maximale et la température maximale du récipient. Il convient que le fabricant du récipient déclare ces valeurs. Utiliser une balance pour éviter un remplissage excessif.

La pression maximale de stockage du mélange de SF₆ $p_{\max}$ permettant d'éviter la liquéfaction peut être calculée au moyen de la formule suivante:

$$p_{\max} = \frac{p_l}{x}$$

où:

p_l est la pression de vapeur de SF₆ à la température minimale de stockage;

x est la concentration en SF₆ exigée du mélange de SF₆.

Le volume minimal de stockage du mélange de SF₆ $V_{\min}$ permettant d'éviter la liquéfaction peut être calculé au moyen de la formule suivante:

$$V_{\min} = \frac{m_{\text{SF6}}}{\rho_l}$$

où:

m_{SF6} est la masse de SF₆ à stocker;

ρ_l est la densité maximale de SF₆ de manière à éviter la liquéfaction du SF₆ à la température minimale de stockage (voir la Figure A.1).

Le stockage gazeux avec liquéfaction du SF₆ ne préserve pas l'uniformité du mélange, mais donne la possibilité de diminuer les volumes de stockage et de transporter économiquement de grandes quantités de mélanges de SF₆. De préférence, il convient d'utiliser uniquement le stockage gazeux avec liquéfaction du SF₆ pour l'élimination du mélange.

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

Il convient que les récipients soient rechargeables et clairement étiquetés pour identifier leur contenu. Il convient de séparer physiquement les récipients qui contiennent différentes qualités de mélanges de SF₆.

Lorsque du mélange de SF₆ usagé est stocké sur le site, il convient que les récipients de stockage satisfassent aux règlements locaux et internationaux concernant les récipients sous pression. Il convient également que l'étiquetage du récipient satisfasse aux règlements locaux et internationaux.

Le Tableau B.3 donne une vue d'ensemble des types de récipients et de l'étiquetage exigé. Dès que possible, il est recommandé d'utiliser des récipients de stockage transportables pour des raisons pratiques.

Tableau B.3 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport des mélanges de SF₆ et de leurs gaz complémentaires

Gaz/fluide	Caractéristique	Type de récipient
CF ₄ de qualité technique	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
N ₂ de qualité technique	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en noir).
Mélange de SF ₆ usagé pouvant être réutilisé ^a	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
Mélange de SF ₆ usagé ne pouvant pas être réutilisé	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
	Gaz liquéfié contenant des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques ^b	Récipients spéciaux approuvés pour le stockage et le transport du gaz corrosifs (par exemple, acide fluorhydrique HF) avec robinet et adaptateur anticorrosion Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en jaune).
^a Pour plus d'informations, voir l'IEC 60480. ^b Un mélange de SF ₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être régénéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de satisfaire à l'IEC 60480:2019, Tableaux 3 et 4 et de faciliter le transport.		

B.5.3 Transport des récipients remplis de mélange de SF₆

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

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

Les règlements internationaux applicables au transport des mélanges de SF₆ sont résumés dans le Tableau B.4.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Tableau B.4 – Règlements internationaux applicables au transport des mélanges de SF₆

Gaz/fluide	Caractéristique	Classe	Classification finale ^{a, b}	Document de transport ^a
CF ₄ de qualité technique	Gaz comprimé	2	UN 1982 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. 2.2	UN 1982 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. (tétrafluorométhane) 2.2
N ₂ de qualité technique	Gaz comprimé	1A	UN 1956 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. 2.2	UN 1956 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. (azote) 2.2
Mélange de SF ₆ usagé pouvant être réutilisé ^c	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (Hexafluorure de soufre et air, azote ou tétrafluorométhane) 2.2
Mélange de SF ₆ usagé ne pouvant pas être réutilisé	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (Hexafluorure de soufre et air, azote ou tétrafluorométhane) 2.2
	Gaz liquéfié toxique et corrosif (gaz contenant des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques)	2 TC	UN 3308 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE ET CORROSIF N.S.A. 2.3 + 8	UN 3308 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE ET CORROSIF N.S.A. (Hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3 + 8
^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies [20]. ^b La classification finale, y compris le code UN adéquat et les numéros adéquats d'identification des dangers (par exemple, H280), sont donnés dans la fiche technique de sécurité et/ou dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. ^c Pour plus d'informations, voir l'IEC 60480. ^d Conformément aux règlements UN pour le transport, un gaz est classé "toxique" lorsque son LC50 < 5 000 µl/l (ppmv). Les mélanges de SF ₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peuvent être régénérés sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de faciliter le transport. N.S.A.: "Non Spécifié par Ailleurs".				

B.5.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du mélange de SF₆

Le paragraphe A.5.4 s'applique.

B.5.5 Responsabilités

Le paragraphe A.5.5 s'applique avec la modification suivante:

Le propriétaire de l'appareillage électrique utilisant des mélanges de SF₆ est responsable de la conservation annuelle des enregistrements concernant le SF₆ et le CF₄ contenus dans l'appareillage électrique ou stockés dans des récipients, ainsi que des taux d'émission.

B.6 Description des appareils de manipulation

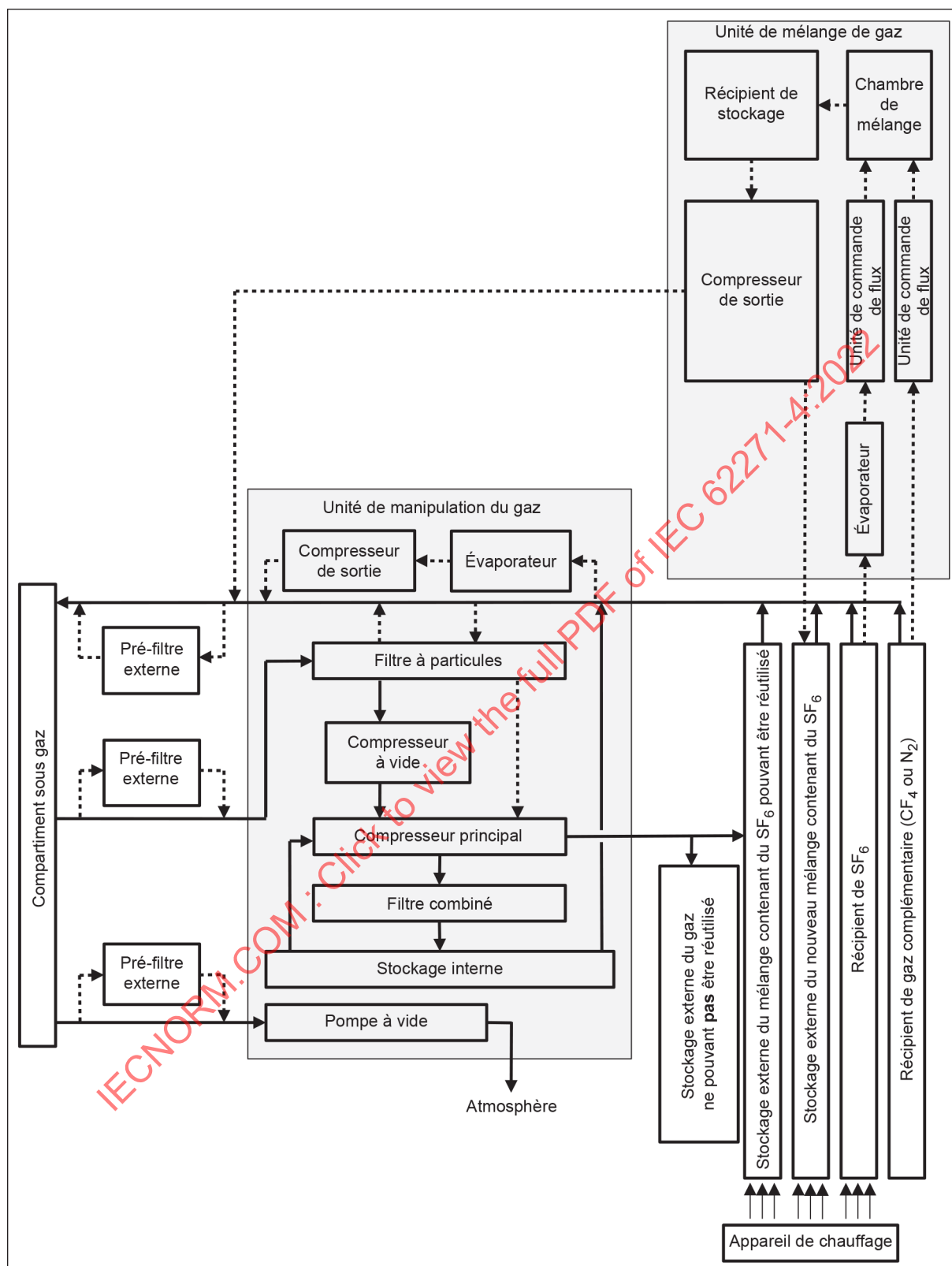
B.6.1 Généralités

B.6.1.1 Présentation

L'Article B.6 donne des informations concernant la fonctionnalité et les critères de performance minimales des appareils de manipulation des mélanges de SF₆ et des composants spécifiques.

Il convient de choisir le type et la taille appropriés de l'appareil de manipulation en fonction de la quantité de mélange de SF₆ à manipuler. La Figure B.1 représente l'aménagement fonctionnel de base. Les fonctions types sont les suivantes:

- évacuation de l'air ou du N₂ du compartiment sous gaz;
- remplissage de mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz à partir du stockage externe ou par l'intermédiaire d'un dispositif de mélange de gaz;
- récupération du mélange de SF₆ du compartiment sous gaz;
- stockage du mélange de SF₆;
- élimination de polluants;
- remplissage du compartiment sous gaz avec l'air ambiant;
- transfert de récipient à récipient.



IEC

Figure B.1 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation du mélange de SF_6

B.6.1.2 Qualification des appareils de manipulation

Le paragraphe A.6.1.2 s'applique.

B.6.2 Filtres

Le paragraphe A.6.2 s'applique.

B.6.3 Pompe à vide

Le paragraphe A.6.3 s'applique.

B.6.4 Compresseur principal et à vide

Le paragraphe A.6.4 s'applique.

B.6.5 Compresseur de sortie

Lorsque la pression dans le récipient de stockage est supérieure à la pression dans le compartiment sous gaz, il est plus rapide de permettre une expansion directe du gaz. Dans tous les autres cas, un compresseur doit procéder au remplissage de gaz. Le compresseur de sortie, utilisant habituellement un compresseur de type à piston, fonctionne entre une pression d'entrée de gaz d'environ 100 kPa (généralement supérieure à 50 kPa) et la pression dans le compartiment sous gaz.

NOTE Presque tous les types de compresseurs de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile.

B.6.6 Récipients de stockage de gaz externes et internes

Le paragraphe A.6.6 s'applique.

B.6.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz

Le paragraphe A.6.7 s'applique.

B.6.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries

Le paragraphe A.6.8 s'applique.

B.6.9 Instruments de contrôle

Le paragraphe A.6.9 s'applique.

B.6.10 Soupapes de sûreté

Le paragraphe A.6.10 s'applique.

B.6.11 Connexions de tuyaux flexibles

Le paragraphe A.6.11 s'applique.

B.6.12 Dispositifs portables de mesure de gaz**B.6.12.1 Généralités**

Le paragraphe A.6.12.1 s'applique avec les modifications suivantes:

- La pression de remplissage d'un appareillage électrique rempli d'un mélange de SF₆ est en général légèrement supérieure à celle d'un appareillage électrique rempli de SF₆. Il convient d'adapter en conséquence la pression d'entrée maximale des dispositifs portables de mesure de gaz.

- Le Tableau B.5 donne une vue d'ensemble des dispositifs portables de mesure de gaz incluant les valeurs recommandées pour la plage, la température de fonctionnement et l'exactitude minimale. Ces grandeurs sont généralement déclarées par le fabricant de dispositifs portables de mesure de gaz dans la fiche technique.

Tableau B.5 – Dispositifs de mesure de gaz

Dispositif	Mesurage	Plage	Température d'exploitation	Exactitude minimale
Hygromètre (appareil de mesure de point de gelée/rosée)	Humidité (point de gelée/rosée)	40 µl/l (ppmv) à 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C à 0 °C)	-10 °C à 40 °C	(±2 °C)
Dispositif de mesure de la concentration en SF ₆	Concentration en SF ₆ ^b	0 % à 100 %	-10 °C à 40 °C	±1 % (SF ₆ /N ₂) ±2 % (SF ₆ /CF ₄)
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Les produits de décomposition sont par exemple SO ₂	1 µl/l (ppmv) à 250 µl/l (ppmv)	-10 °C à 40 °C	±15 % de la plage complète
Manomètre ^b	Pression	0 kPa to 1 500 kPa	-10 °C à 40 °C	±1 % de la plage complète
Thermomètre	Température	-25 °C à 70 °C	-25 °C à 70 °C	±1 °C
^a L'appareil de mesure de la concentration en SF ₆ doit être étalonné pour le type de mélange de SF ₆ à évaluer (SF ₆ /N ₂ et/ou SF ₆ /CF ₄).				
^b Si un manomètre à compensation de température est utilisé, il doit être étalonné pour le type et le rapport de mélange de SF ₆ .				

B.6.12.2 Appareil de mesure de point de gelée/rosée

Le paragraphe A.6.12.2 s'applique.

B.6.12.3 Dispositifs de mesure de la concentration en gaz – dispositifs de mesure de la concentration en SF₆

Le paragraphe A.6.12.3 s'applique avec les modifications suivantes:

Le résultat de mesure du dispositif qui utilise la vitesse du son dans le gaz pour déterminer la concentration en SF₆ d'un mélange de SF₆ peut être affecté de manière importante par la présence d'un gaz tiers comme polluant dans le mélange. Le polluant peut être l'air ou résulter d'une contamination croisée lors de la manipulation de différents types de mélanges avec le même appareil de manipulation (N₂ pour les mélanges SF₆/CF₄ ou CF₄ pour les mélanges SF₆/N₂, par exemple). En cas de résultats de mesure anormaux avec ce type de dispositif, il convient de procéder à un examen approfondi et d'autres techniques de mesure peuvent être utilisées (voir l'IEC 60480:2019, 7.2).

B.6.12.4 Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs

Le paragraphe A.6.12.4 s'applique.

B.6.12.5 Détecteurs de gaz portables

Le paragraphe A.6.12.5 s'applique.

B.6.13 Contrôleur de fuite de gaz

Le paragraphe A.6.13 s'applique.

B.6.14 Systèmes d'alarme de concentration en gaz

Le paragraphe A.6.14 s'applique.

B.6.15 Bouteilles d'échantillonnage de gaz

Le paragraphe A.6.15 s'applique.

B.6.16 Unité de mélange de gaz

Une unité de mélange de gaz est présentée en haut à droite de la Figure B.1. Elle permet de mélanger le SF₆ avec un gaz complémentaire (en général N₂ ou CF₄) selon un rapport de gaz sélectionné à l'avance lors du remplissage ou du complément de remplissage de l'appareillage électrique.

Les flux de SF₆ et de gaz complémentaire sont régulés par les unités de commande de flux pour remplir le récipient de stockage avec le mélange sélectionné à l'avance. La pression de sortie (c'est-à-dire, la pression de remplissage du compartiment sous gaz) est régulée par le compresseur de sortie.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- concentration en SF₆ et pression de sortie (c'est-à-dire la pression de remplissage) réglables;
- rapport de mélange de gaz (c'est-à-dire, concentration en SF₆): 10 % à 75 %;
- pression de sortie maximale à 20 °C: jusqu'à 1 500 kPa;
- entrée de SF₆ à l'état liquide;
- possibilité de mélange de quantités de gaz, adapté au complément de remplissage ou au remplissage des compartiments sous gaz.

B.7 Procédures de régénération

Les informations relatives aux procédures de régénération du mélange de SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe E.

B.8 Produits de décomposition

Les informations relatives aux produits de décomposition des mélanges de SF₆ sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe B.

B.9 Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé

Des informations relatives aux mélanges contenant SF₆ et à la procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé sont consignées dans l'IEC 60480:2019, Annexe C.

B.10 Manipulation des mélanges de SF₆

B.10.1 Généralités

Le domaine d'application du présent paragraphe consiste à traiter les particularités de manipulation des mélanges de SF₆ pendant l'installation, la mise en service, après une réparation ou une révision sur site et l'élimination en fin de vie de l'appareillage électrique.

Des mélanges de SF₆ sont utilisés dans les appareillages électriques principalement pour des applications à température ambiante froide, généralement en dessous de -40 °C. D'autres applications à température ambiante normale comportent des lignes de transmission isolées au gaz et des transformateurs isolés au gaz. Du SF₆ est mélangé avec un gaz complémentaire, généralement N₂ ou CF₄, selon la concentration spécifiée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, en général entre 10 % et 75 % de SF₆ pour les mélanges SF₆/N₂ et entre 35 % et 50 % de SF₆ pour les mélanges SF₆/CF₄.

Il convient de maintenir le rapport de mélange dans les tolérances indiquées dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique afin de garantir les propriétés d'isolation et/ou de commutation.

B.10.2 Remplissage de compartiments sous gaz avec du mélange de SF₆

B.10.2.1 Généralités

Fondamentalement, trois procédures peuvent être utilisées pour le remplissage (voir B.10.2.2, B.10.2.3 et B.10.2.4).

B.10.2.2 Remplissage séquentiel

La procédure de remplissage spécifique d'un compartiment sous gaz avec un mélange de SF₆ est la suivante.

- Utiliser les procédures décrites en 4.2 pour remplir le compartiment sous gaz tant que la pression de remplissage partielle de SF₆ pour l'isolation et/ou la commutation n'est pas atteinte. Compte tenu de la plus faible pression de vapeur, il convient de remplir le SF₆ en premier. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif.
- Relier le récipient de gaz complémentaire et faire le complément de remplissage du compartiment sous gaz jusqu'à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif.

NOTE 1 Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, la durée du vide peut être prolongée pour obtenir une meilleure élimination de l'humidité, par exemple lorsque la température ambiante est au gel.

NOTE 2 Le SF₆ à introduire dans le compartiment sous gaz peut être soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé.

B.10.2.3 Remplissage avec un dispositif de mélange

Pour réduire la probabilité d'erreurs accidentelles, un dispositif automatisé de mélange de gaz peut également être utilisé (voir la Figure B.1).

B.10.2.4 Remplissage d'un mélange de SF₆ prémélangé

En troisième option, des gaz prémélangés obtenus auprès du fabricant de gaz peuvent être utilisés. Dans ce cas, il convient que le processus de remplissage soit conforme à 4.2 ou 4.4.

B.10.3 Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec des mélanges de SF₆ à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions du fabricant de l'appareillage électrique, il convient d'appliquer l'une des deux procédures suivantes:

- si le rapport de mélange du gaz restant est dans les limites des spécifications données par le fabricant, le complément de remplissage peut être réalisé selon 4.3 ou 5.1 à l'aide d'un mélange de SF₆ présentant le rapport de mélange spécifié;
- en seconde option, la procédure suivante est possible:
 - évaluer la pression intermédiaire p_{int} comme suit

$$p_{\text{int}} = x \times p_{\text{re}} + (1-y) \times p_i$$

où

- x est la concentration en SF₆ exigée du mélange de SF₆;
- p_{re} est la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation du mélange de SF₆;
- y est la concentration en SF₆ réelle du mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz prérempli;
- p_i est la pression réelle du mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz prérempli;
- compte tenu de la plus faible pression de vapeur, il convient de remplir le SF₆ en premier. Relier le récipient de SF₆ et remplir le compartiment sous gaz tant que la pression intermédiaire p_{int} n'a pas été atteinte. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif;
- relier le récipient de gaz complémentaire et faire le complément du compartiment sous gaz jusqu'à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation p_{re} .

Pour éviter les erreurs, il convient de réaliser le mesurage et le calcul des valeurs de pression p_{int} et p_i , ainsi que le complément de remplissage, à la même température, p_{re} étant la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation convertie à cette même température.

NOTE 1 Le SF₆ à introduire dans le compartiment sous gaz peut être soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé.

En variante, des dispositifs de mélange de gaz (voir B.6.16) ou des gaz prémélangés peuvent être utilisés pour accélérer le processus et diminuer la probabilité d'erreurs accidentelles.

NOTE 2 Les gaz prémélangés peuvent être obtenus auprès des fabricants de gaz.

B.10.4 Vérification de la qualité des mélanges de SF₆

B.10.4.1 Généralités

Le paragraphe 5.2 s'applique.

NOTE Lorsque le SF₆ est partiellement liquéfié, la concentration réelle ou mesurée du SF₆ peut différer de la concentration exigée de SF₆ du mélange de SF₆. Le paragraphe B.5.2 décrit la manière d'éviter la liquéfaction.

B.10.4.2 Variation à long terme de la composition des mélanges de SF₆

La composition d'un mélange de SF₆ dans un compartiment sous gaz varie légèrement dans le temps en raison de la combinaison des causes suivantes:

- taux de fuite différents du SF₆ et du gaz complémentaire;
- taux de décomposition différents du SF₆ et du gaz complémentaire par arc;
- quantités différentes de SF₆ et du gaz complémentaire piégé dans les cavités des absorbeurs;
- grand nombre d'opérations de manipulation de gaz exécutées sur le même compartiment sous gaz.

B.10.4.3 Tolérance sur la composition des mélanges de SF₆

Il convient que la tolérance sur la composition d'un mélange de SF₆ soit spécifiée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique en tenant compte de l'utilisation possible de "mélange de SF₆ usagé pouvant être réutilisé" et de l'incertitude associée aux dispositifs de mesure, pour des conditions type de manipulation du gaz et de service à froid. Sauf spécification contraire par le fabricant de l'appareillage électrique, les tolérances de composition des mélanges de SF₆ pouvant être réutilisés sont spécifiées dans l'IEC 60480.

B.10.5 Récupération et régénération des mélanges de SF₆

L'Article 6 s'applique.

B.10.6 Rectification de la composition des mélanges de SF₆

Le présent paragraphe s'applique à des compartiments sous gaz contenant des mélanges de SF₆ dont le rapport de mélange ne satisfait pas aux spécifications données dans le manuel d'instructions du fabricant de l'appareillage électrique.

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions du fabricant de l'appareillage électrique, il convient d'appliquer la procédure suivante:

- Évaluer la pression p_{rec}

$$\text{pour } y \leq x \quad p_{rec} = p_{re} \times \frac{1-x}{1-y}$$

$$\text{pour } y > x \quad p_{rec} = p_{re} \times \frac{x}{y}$$

où:

p_{re} est la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation du mélange de SF₆;

x est la concentration en SF₆ exigée du mélange de SF₆;

y est la concentration en SF₆ réelle du mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz;

- si la pression réelle du mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz est inférieure à p_{rec} , il convient de faire le complément de remplissage du compartiment sous gaz selon la procédure décrite en B.10.3;
- si la pression réelle du mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz est supérieure ou égale à p_{rec} , récupérer le mélange de SF₆ dans le compartiment sous gaz jusqu'à p_{rec} , puis faire le complément de remplissage du compartiment sous gaz comme suit:

- pour $y \leq x$, faire le complément de remplissage du compartiment sous gaz avec du SF₆ jusqu'à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation du mélange de SF₆.
- pour $y > x$, faire le complément de remplissage du compartiment sous gaz avec le gaz complémentaire jusqu'à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation du mélange de SF₆.

B.11 Spécifications des mélanges de SF₆ nécessaires au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique

Sauf spécification contraire par le fabricant de l'appareillage électrique, il convient que les mélanges de SF₆ à utiliser pour remplir ou faire le complément de remplissage de l'appareillage électrique satisfassent, au moins, aux critères indiqués dans l'IEC 60480.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Annexe C (informative)

Air comprimé

C.1 Propriétés gazeuses

C.1.1 Généralités

L'air comprimé présente un potentiel de réchauffement climatique nul et aucun potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Les propriétés de l'air comprimé sont essentiellement déterminées par les principaux composants gazeux N_2 et O_2 . L'air comprimé est composé d'environ 78 % de N_2 , de 21 % O_2 , de 1 % d'Ar et de quantités inférieures d'autres gaz tels que le CO_2 , H_2O , Ne ou l'He.

NOTE Pour plus d'informations sur les substances présentes dans l'air comprimé, voir l'ISO 8573-1:2010.

C.1.2 Propriétés chimiques

L'air comprimé est de l'air ambiant déshumidifié filtré. Même aux températures d'exploitation maximales, aucune décomposition du gaz (par réactions catalytiques, par exemple) ne se produit.

Le Tableau C.1 donne la liste des caractéristiques chimiques types des deux composants principaux de l'air comprimé.

Tableau C.1 – Principales caractéristiques chimiques du N_2 et de l' O_2

Formule chimique	N_2	O_2
Numéro CAS ^a	7727-37-9	7782-44-7
Numéro d'enregistrement REACH	-	-
Poids moléculaire	28,013 g/mol	31,999 g/mol
Température de décomposition	≈ 7 000 °C	≈ 4 000 °C
^a Le numéro CAS est attribué par le Chemical Abstracts Service, qui possède un registre des informations sur les substances chimiques. Il n'a pas de signification chimique. L'accès aux informations se fait par l'intermédiaire d'un service d'abonnement.		

C.1.3 Propriétés physiques

La conductivité thermique de l'air comprimé est supérieure à celle du SF_6 , mais ses propriétés de transfert global de chaleur sont moins bonnes en raison d'une viscosité plus importante et d'une densité plus faible. Dans l'appareillage électrique, la plage de pressions type de l'air comprimé est comprise entre 100 kPa et 1 500 kPa. La liquéfaction des deux composants principaux de l'air comprimé ne se produit pas dans les conditions de fonctionnement types de l'appareillage électrique, même pour des applications à très faible température jusqu'à -60 °C. Toutefois, l'humidité se condense à différentes températures basses en fonction de la pression partielle. Voir l'ISO 8573-1 pour les différentes classes de puretés.

Le Tableau C.2 donne la liste des principales caractéristiques physiques des deux composants principaux de l'air comprimé.

Tableau C.2 – Principales caractéristiques physiques du N₂ et de l'O₂

Formule chimique	N ₂	O ₂
Point d'ébullition à 101,3 kPa	-196 °C	-183 °C
Point de congélation à 101,3 kPa	-210 °C	-219 °C
Point de sublimation à 101,3 kPa	-	-
Densité du liquide au point d'ébullition	808 kg/m ³	1 141 kg/m ³
Densité du gaz à 20 °C et à 100 kPa	1,15 kg/m ³	1,31 kg/m ³
Pression de vapeur à 20 °C	-	-
Température critique	-147 °C	-119 °C
Pression critique	3 399 kPa	5 043 kPa
Densité critique	314 kg/m ³	436 kg/m ³
Potentiel de réchauffement climatique (GWP ₁₀₀)	0	0
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	0	0

C.1.4 Comportement d'isolation et de commutation

La rigidité diélectrique de l'air comprimé est égale à environ 40 % de la rigidité diélectrique du SF₆ à la même pression, et elle est bien meilleure que celle du N₂ pur en raison du caractère électronégatif de l'O₂. L'O₂ a légèrement tendance à se lier avec des électrons libres formant des ions lourds avec une faible mobilité rendant très difficile le développement d'avalanche d'électrons. Voir la brochure 730 du CIGRE [12].

En comparaison avec le SF₆ à la même pression, l'air comprimé est un support d'extinction d'arc modéré. Lorsqu'un arc électrique se refroidit dans l'air comprimé, il reste conducteur à une température relativement basse, réduisant de ce fait le plus possible l'arrachement du courant avant un courant nul et évitant ainsi de fortes surtensions.

C.2 Sécurité et premiers soins

C.2.1 Généralités

Avant de commencer tout travail de maintenance/service sur un appareillage électrique, il convient de procéder à une inspection détaillée de l'état de l'appareillage électrique et de la documenter. Outre les règlements locaux de sécurité, il convient de suivre au moins les règles générales de sécurité suivantes:

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

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

Le Tableau C.3 donne la liste des principaux points à surveiller en cas d'utilisation d'un appareillage électrique avec de l'air comprimé.

Tableau C.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé

Élément	Travail au voisinage de l'appareillage électrique (exploitation de l'appareillage électrique, contrôle visuel, nettoyage du local)	Remplissage, complément de remplissage, récupération, évacuation des compartiments sous gaz	Ouverture des compartiments sous gaz, travail sur des compartiments sous gaz ouverts
Manuels d'exploitation	Non exigé	Applicable	Applicable
Formation	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Appareil de manipulation du gaz	Non exigé	Applicable ^b	Uniquement pour l'air comprimé fortement décomposé
Matériel de nettoyage/neutralisation	Non exigé	Non exigé	Uniquement pour l'air comprimé fortement décomposé
Équipement individuel de protection	Non exigé ^c	Uniquement pour l'air comprimé fortement décomposé ^c	Uniquement pour l'air comprimé fortement décomposé ^c
^a Il convient de spécifier les informations générales en fonction du type de travail et d'installation, en fonction des règlements locaux de sécurité. ^b L'air comprimé utilisé peut être rejeté dans l'atmosphère éventuellement par l'intermédiaire de filtres adaptés tant que la pression ambiante n'a pas été atteinte (il convient de prendre en considération les règlements locaux). Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifie les filtres adaptés. Aucune évacuation du compartiment sous gaz n'est exigée pour l'air comprimé très faiblement ou faiblement décomposé. ^c Les règlements locaux peuvent exiger de porter des chaussures de sécurité, un casque et des lunettes de protection pour s'approcher de l'appareillage			

Il convient d'afficher une note d'instructions relatives aux premiers soins (voir C.2.8) en tout lieu où de l'air comprimé est manipulé.

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

- utilise des outils et des appareils de manipulation adaptés;
- porte des vêtements de protection appropriés (voir C.2.5);
- observe une hygiène personnelle très stricte;
- se lave ainsi que ses appareils de manipulation, en utilisant des matériaux jetables, avant de quitter la zone de travail;
- retire les vêtements de protection et les lave soigneusement dès que possible après avoir quitté la zone de travail;
- assure que les vêtements, les outils et les éléments ayant été en contact avec des produits de décomposition soient emballés en toute sécurité dans des sacs scellés ou d'autres récipients scellés et soient ensuite traités pour neutraliser tous les résidus.

C.2.2 Protection du personnel

Il convient que le personnel qui manipule de l'air comprimé se conforme strictement aux instructions de sécurité données dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage.

Le Tableau C.4 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel et des outils de sécurité exigés lors de l'ouverture ou de l'accès à un compartiment sous gaz. Aucune différence substantielle entre les conditions d'entrée et de sortie n'est indiquée lorsque l'opérateur ouvre le compartiment sous gaz ou y accède.

Tableau C.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz

		Risque potentiel	Mesures de sécurité	Matériel et outils de sécurité
Air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé	Air comprimé fortement décomposé	Fumées ou substances de nettoyage	Ventilation	Ventilateur d'aspiration
		Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilation Port d'équipement individuel de protection Mesurage de la concentration en produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilateur d'aspiration Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome ou au moins masque de protection respiratoire (filtre)
		Produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs	Élimination des produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs Port d'équipement individuel de protection Protection des produits de décomposition solides contre l'hydrolyse	Aspirateur Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome ou au moins masque de protection respiratoire Lunettes de sécurité Protection de l'environnement contre la pluie ou le vent

Il est interdit de manger, de boire et de fumer en cas d'accès à un compartiment sous gaz ayant contenu de l'air comprimé fortement décomposé. Il convient de changer de vêtements et de se laver la peau dès que possible après le travail de manière à éviter tout danger potentiel d'irritation ou de brûlure.

C.2.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés

Le matériel et les outils de sécurité non réutilisables ayant été en contact avec des produits de décomposition solides ou des matériaux des absorbeurs sont considérés comme étant contaminés. Ils sont récupérés ultérieurement et placés dans des sacs en plastique. Les sacs en plastique sont scellés avec un ruban adhésif et étiquetés. Leur élimination est effectuée conformément aux règlements locaux.

Il convient de nettoyer le matériel et les outils de sécurité réutilisables, par exemple en les lavant et en les neutralisant dans une solution eau/soude avec 10 % en poids de soude liquide ou équivalent, puis en les rinçant à l'eau claire. Des temps de neutralisation identiques à ceux indiquées dans l'IEC 60480:2019, Tableau 11 peuvent être utilisées.

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

C.2.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression

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

Tout le matériel et les outils utilisés pendant la manipulation de l'air comprimé sont susceptibles de contenir de l'air comprimé à haute pression. Il convient de les manipuler avec soin.

C.2.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel

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

En cas de rejet soudain d'air comprimé fortement décomposé dû à un feu extérieur ou à un défaut d'arc interne, des règles de sécurité supplémentaires s'appliquent pour pénétrer dans un local d'appareillage, conformément à C.2.7.

Il convient que les manuels d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifient l'équipement de protection exigé.

Pour manipuler de l'air comprimé très faiblement ou faiblement décomposé, peu ou pas d'équipement de sécurité et de protection du personnel (voir ci-dessous) n'est nécessaire selon la conception de l'appareillage électrique et les règlements locaux. Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifie l'équipement de protection exigé.

Selon le type de travail à exécuter sur le site et conformément au Tableau C.4, les travailleurs impliqués dans la manipulation de l'air comprimé fortement décomposé sont dotés de l'équipement de sécurité et de protection individuelle suivant:

- gants de protection: gants adaptés, résistants aux acides, par exemple en néoprène, en PVC ou en caoutchouc;
- lunettes de protection: lunettes industrielles de type chimique selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 166 [3]);
- masque de protection respiratoire: à utiliser en même temps que les gants de protection, le masque de protection respiratoire aide à protéger la bouche et le nez contre la poussière, et il convient de l'utiliser en cas d'exposition à des zones peu poussiéreuses seulement;
- masque facial intégral/demi-masque: pour une inspection de courte durée et un travail où une ventilation peut être assurée, mais où la concentration en produits de décomposition peut dépasser le niveau maximal approprié, il convient d'utiliser un masque facial avec filtre à charbon actif remplaçable conformément aux règlements locaux (par exemple, les Normes européennes EN 140 [4], EN 14387 [5] et EN 143 [6] spécifient respectivement des masques, filtres à gaz et filtres à particules. Des filtres combinés de type A2/B2/E2/K2/P3 ou A3/B3/E3/K3/P3 fabriqués selon ces normes sont disponibles);
- tenue de protection à usage unique: vêtements de protection antipoussière à porter au-dessus des vêtements normaux, couvre-chaussures, protection capillaire, tenue jetable à capuche de qualité industrielle sans poches, non perméable (par exemple, en polypropylène lié) comportant des serrages de chevilles et de poignets couvrant les chaussures et les gants;
- appareil respiratoire autonome (respirateur): lors de l'entrée et/ou des manœuvres dans des applications intérieures après une fuite anormale ou un rejet soudain dû à un arc interne lorsque la quantité de produits de décomposition dépasse les valeurs TWA (voir C.9.2.4.6),

un respirateur est utilisé selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 136 [7]);

- protection de l'environnement pour les emplacements de travail à l'extérieur: abris temporaires pour empêcher la pénétration de pluie et la dispersion par le vent de produits de décomposition solides (le cas échéant) lorsque le compartiment sous gaz est ouvert;
- aspirateur: aspirateur spécifique à haut rendement équipé d'un filtre capable de piégeage selon la classe de poussières H (risque élevé). Les classes de poussières sont spécifiées à l'Annexe AA de l'IEC 60335-2-69:2021;
- ventilateur d'aspiration: matériel permettant de forcer la ventilation d'espaces fermés et d'autres zones inaccessibles. Ce matériel peut être portable ou installé de façon permanente, en fonction de la taille de l'installation.

C.2.6 Équipements et services

Lorsque les compartiments sous gaz qui contiennent de l'air comprimé fortement décomposé sont ouverts (après la récupération de l'air comprimé), il convient de mettre à la disposition des travailleurs des équipements de lavage appropriés, et une réserve d'eau pour préparer des solutions de nettoyage.

C.2.7 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain d'air comprimé

En cas de rejet soudain d'air comprimé dû à un arc interne ou à un feu extérieur, il convient d'évacuer immédiatement les locaux concernés.

Après avoir ventilé les locaux et vérifié la présence possible de produits de décomposition toxiques, seul le personnel formé et qualifié est autorisé à entrer de nouveau et à nettoyer le local d'appareillage ou à accéder à l'appareillage électrique.

Le Tableau C.4 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel et des outils de sécurité exigés.

NOTE Les pompiers peuvent entrer dans le local d'appareillage selon les termes décrits dans les règlements locaux.

Les mêmes règles s'appliquent aux zones situées au-dessous du niveau du sol auquel le rejet s'est produit et qui sont mal ventilées ou non ventilées (par exemple, tranchées de câbles, puits d'inspection, systèmes de drainage). La durée de ventilation exigée dépend du type et de la quantité de gaz rejeté.

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

Le Tableau C.4 matériel extérieur nécessite d'appliquer des mesures normalisées pour conditions extérieures (par exemple, protection contre la pluie, protection contre le vent).

C.2.8 Équipements et traitement de premiers soins

C.2.8.1 Généralités

L'équipement de premiers soins comporte:

- l'équipement industriel normal de premiers soins incluant un équipement de lavage des yeux contenant une solution saline;
- pour l'air comprimé fortement décomposé, en présence de substances fluorées décomposées (PTFE, par exemple) à l'intérieur du compartiment sous gaz: gel de gluconate de calcium (gel antidote du HF);

- un moyen pour entrer en contact avec les services de secours;
- des recommandations de médecins.

Il convient que l'application des règles générales de sécurité (voir C.2.1) réduise le plus possible la probabilité d'accident. En cas d'accident, il convient d'appliquer un traitement de premiers soins comme cela est décrit dans les articles suivants.

C.2.8.2 Irritation de la peau

En cas de signes d'irritation de la peau après un contact avec de l'air comprimé fortement décomposé, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Les vêtements contaminés sont retirés et la partie affectée est lavée à l'eau courante fraîche. Appliquer du gel de gluconate de calcium après avoir retiré l'acide fluorhydrique sur la peau. Il convient de demander conseil à un médecin.

C.2.8.3 Irritation des yeux

En cas de signes d'irritation des yeux après un contact avec de l'air comprimé fortement décomposé, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Une irrigation de l'œil ou des yeux est effectuée immédiatement et sans interruption jusqu'à ce qu'un médecin conseille au patient de l'interrompre.

C.2.8.4 Difficultés respiratoires

Il convient que l'ensemble du personnel évacue immédiatement la zone concernée contenant de l'air comprimé fortement décomposé et se dirige vers de l'air frais. Il convient d'enlever les vêtements contaminés portés par une personne ayant des difficultés respiratoires et de couvrir cette personne d'une couverture en la maintenant au calme et en observation continue. Il convient de rechercher une assistance médicale d'urgence sans tarder. Si le patient arrête de respirer, il convient qu'un personnel formé et qualifié commence immédiatement à pratiquer la respiration artificielle. Un défibrillateur externe automatique peut être utilisé conformément aux règlements locaux.

C.3 Impact sur l'environnement

C.3.1 Généralités

Toute activité humaine a un effet sur l'environnement. L'impact d'une activité particulière dépend de son importance sur les matériaux impliqués. Les activités dans lesquelles des gaz sont produits ou utilisés peuvent provoquer des rejets vers l'atmosphère. Trois aspects principaux sont pris en considération:

- l'écotoxicologie: matériaux et gaz toxiques ayant un effet sur l'environnement et toutes les formes de vie;
- l'appauvrissement en ozone: augmentation des dimensions des trous dans la couche d'ozone stratosphérique;
- le réchauffement de la planète/changement climatique: augmentation de l'effet de serre.

C.3.2 Écotoxicologie

C.3.2.1 Définition

L'écotoxicologie est définie comme "la branche de toxicologie consacrée à l'étude des effets toxiques provoqués par les polluants d'origine naturelle ou synthétique sur les constituants des écosystèmes, les animaux (y compris les êtres humains), les végétaux et les microorganismes, dans un contexte intégré".

C.3.2.2 Toxicologie

L'air comprimé n'est pas toxique.

C.3.2.3 Toxicologie environnementale

L'air est le principal gaz de l'écosystème et est donc inoffensif pour lui. L'air comprimé n'a aucun potentiel d'écotoxicité aiguë ou chronique consigné. Il ne présente aucun danger pour l'eau de surface et la nappe phréatique ou pour le sol. L'accumulation biologique dans le cycle de nutrition n'a aucun impact. De plus, l'air comprimé est:

- non cancérigène: il ne provoque pas de cancer;
- non mutagène: il n'endommage pas la constitution génétique;
- non nitrifiant: il n'enrichit pas la chaîne alimentaire.

Il n'est pas nécessaire de manipuler l'air comprimé dans un cycle fermé, afin d'éviter tout rejet volontaire dans l'environnement. La récupération et la réutilisation du gaz ne sont pas nécessaires. L'air comprimé usagé peut être rejeté dans l'atmosphère, éventuellement par l'intermédiaire de filtres, et remplacé par un nouvel air comprimé sur site soit depuis des récipients prévus à cet effet soit des dispositifs de remplissage (voir C.6.16 et C.10.5).

Il n'est pas nécessaire de consigner les pertes de gaz et aucune contrainte légale particulière ne s'applique à l'utilisation de l'air comprimé dans l'appareillage électrique.

C.3.3 Appauvrissement en ozone

L'air comprimé et ses produits de décomposition ne contiennent ni chlore, ni brome et ne nuisent donc pas à la couche d'ozone stratosphérique.

C.3.4 Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)

L'air comprimé ne contribue pas à l'effet de serre et présente un potentiel de réchauffement climatique nul.

C.3.5 Impact des produits de décomposition sur l'environnement

Des défaillances majeures provoquant un rejet d'air comprimé fortement décomposé sont rares. Les quantités rejetées dans de tels cas extrêmes sont limitées en raison du fait que la conception normalisée des produits est compartimentée, limitant le défaut à l'emplacement dont il provient. Les quantités de gaz concernées sont donc de petites fractions de la quantité totale de gaz contenu dans un appareillage électrique.

Les produits de décomposition peuvent être convertis en produits neutres. Les procédures permettant leur traitement, leur manipulation et leur élimination assurent qu'ils ont un impact négligeable sur l'environnement.

C.4 Formation et certification

C.4.1 Généralités

L'air comprimé très faiblement ou faiblement décomposé n'a aucun impact négatif sur l'environnement. Par conséquent, les aspects de sécurité fonctionnelle et d'environnement pour l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé ne sont pas étroitement liés et ne doivent donc pas être traités en même temps.

Il convient d'assurer la sécurité fonctionnelle pendant une intervention sur un appareillage électrique nécessitant la manipulation de gaz (par exemple, mise au point, fabrication, essai, mise en place, mise en service, maintenance, réparation, entretien et démontage en fin de vie)

en suivant les instructions de sécurité indiquées dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. En particulier, il convient de décrire les mesures de sécurité en matière de manipulation de systèmes sous pression.

Pour un fonctionnement sûr, en particulier lorsque de l'air comprimé fortement décomposé doit être manipulé, une option complémentaire consiste à former le personnel dans le cadre de formations qui peuvent être suivies, par exemple, dans un centre spécial de formation de l'utilisateur, en usine ou sur le site lors de la mise en place, la mise en service et la maintenance de l'appareillage électrique installé. En fonction des tâches que doit réaliser le personnel formé, la formation peut être choisie de manière à couvrir différents domaines d'application allant, par exemple, de la simple formation de base à la formation approfondie. Il convient que la formation concerne une conception spécifique (par exemple, disjoncteur à cuve sous haute tension, appareillage moyenne tension, appareillage à haute tension, etc.), des conceptions différentes exigeant des formations différentes.

Dans tous les cas, il convient de fonder la formation sur les règlements locaux, les manuels d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, les manuels d'instructions d'exploitation de l'appareil de manipulation, les fiches techniques de sécurité (SDS), les fiches techniques des matériels, les normes internationales, les brochures du CIGRE, et les paragraphes de l'Annexe C.

C.4.2 Formation

Il convient que les travailleurs manipulant de l'air comprimé soient habitués aux aspects de sécurité, de réglementation et d'environnement, aux propriétés des gaz, aux outils et matériels de manipulation de gaz et aux procédures permettant de garantir la continuité du service et de réduire le plus possible les émissions. Des formations particulières pour la manipulation de l'air comprimé peuvent être proposées par les fabricants d'appareillage électrique, car le type d'appareillage électrique peut être différent.

Les différents aspects que doit couvrir une formation peuvent être les suivants:

- sécurité et premiers soins (voir l'Article C.2), en particulier:
 - règlements locaux, plans d'urgence et instructions, par exemple en cas de défaut d'arc interne;
 - matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel;
 - matériel de sécurité exigé pour travailler sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche;
 - matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel, travaillant sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche, neutralisation et manipulation des produits de décomposition;
- connaissance de base des questions liées à l'environnement;
- caractéristiques physiques, chimiques, isolantes et de commutation de l'air comprimé;
- utilisation de l'air comprimé dans les appareillages électriques (isolation, commutation);
- existence de règlements locaux et de normes internationales en relation avec la tâche;
- manipulation de l'air comprimé, dangers et caractéristiques pour la santé;
- conception de l'appareillage électrique (propriétés et applications/fonctionnalités);
- vérification de la qualité de l'air comprimé;
- les manuels d'instructions d'exploitation donnés par le fabricant de l'appareillage électrique en relation avec les tâches;
- types de compartiments sous gaz remplis d'air comprimé;
- appareils et procédures de vérification de la qualité de l'air comprimé;

- procédures de manipulation de l'air comprimé:
 - complément de remplissage des systèmes à pression autonomes;
 - évacuation de l'air et remplissage de gaz, complément de remplissage, rejet d'air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé dans l'atmosphère;
 - régénération de l'air comprimé fortement décomposé, manipulation, neutralisation et élimination des produits de décomposition, manipulation des matériels et outils de sécurité qui ont été en contact avec des produits de décomposition solides;
- méthodes de détection des fuites et techniques de réparation;
- catégories pour l'air comprimé (voir 3.4);
- stockage et transport de l'air comprimé (voir l'Article C.5);
- appareils de manipulation de l'air comprimé en relation avec les tâches (voir l'Article C.6);
- procédures pour pénétrer dans le local d'appareillage en cas de fuite anormale et/ou de rejet soudain d'air comprimé fortement décomposé du(e) à un feu ou un défaut d'arc interne (voir C.2.7);
- démontage de l'appareillage électrique et tri des pièces (voir l'Article 0);
- fonctionnement du système de perçage étanche, si nécessaire (voir 7.4).

C.4.3 Certification

Réussite complète à la formation conduisant à une certification maison, dans laquelle "certification maison" signifie un certificat de compétence ou autre confirmation écrite, délivré par un employeur à l'un de ses propres employés ou à des personnes externes ayant terminé avec succès un cours de formation relatif au travail correspondant. Des sessions d'examens théoriques et pratiques sont organisées pour prouver la compétence et l'aptitude obtenues. Toutefois, toute certification exigée par les règlements locaux prévaut sur le présent document.

Il convient de conserver des archives suivantes:

- le contenu de la formation;
- la date à laquelle la formation a été effectuée.

La limitation des tâches à exécuter au personnel qui a obtenu une certification pour les niveaux de compétence respectifs et maintien d'un haut niveau d'expertise.

C.5 Stockage et transport

C.5.1 Généralités

Il convient de toujours stocker et transporter l'air comprimé, soit dans des récipients, soit dans un appareillage électrique, conformément aux règlements locaux et internationaux.

C.5.2 Stockage des récipients remplis d'air comprimé

En règle générale, l'air comprimé est stocké à l'état gazeux à des pressions jusqu'à 30 000 kPa. L'air comprimé ne peut pas être liquéfié dans des récipients pour le transport à des températures ambiantes types. Aucune récupération de l'air comprimé n'est nécessaire étant donné qu'il peut être rejeté dans l'atmosphère, éventuellement par l'intermédiaire de filtres (voir C.10.5). Pour la manipulation de volumes de gaz plus importants, la génération sur site d'air comprimé, par exemple à l'aide d'appareils de purification et de remplissage prévus à cet effet (voir C.6.16), est un autre moyen d'alimentation en gaz.

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

Il convient que les récipients soient rechargeables et clairement étiquetés pour identifier leur contenu.

Lorsque des échantillons d'air comprimé usagé sont stockés pour procéder à une analyse du gaz hors site, il convient que les récipients de stockage satisfassent aux règlements locaux et internationaux concernant les récipients sous pression. Il convient également que l'étiquetage du récipient satisfasse aux règlements locaux et internationaux.

Le Tableau C.5 donne des exemples de types de récipients. Dès que possible, il est recommandé d'utiliser des récipients de stockage transportables pour des raisons pratiques.

Tableau C.5 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport de l'air comprimé

Gaz	Caractéristique	Type de récipient
Air comprimé de qualité technique ^a	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] (ogive en vert vif).
Air comprimé usagé	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de marquer l'ogive des récipients d'une manière particulière afin d'éviter toute confusion entre air comprimé de qualité technique et air comprimé usagé.
^a Éviter toute contamination des récipients spécifiques à l'air comprimé.		

C.5.3 Transport des récipients remplis d'air comprimé

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

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

Les règlements internationaux applicables au transport d'air comprimé sont résumés dans le Tableau C.6.

Tableau C.6 – Règlements internationaux applicables au transport d'air comprimé de qualité technique et usagé

Gaz	Caractéristique	Classe	Classification finale ^a	Document de transport ^a
Air comprimé de qualité technique	Gaz comprimé	1A	UN 1002 AIR COMPRIMÉ 2.2	UN 1002 AIR COMPRIMÉ 2.2
Air comprimé usagé	Gaz comprimé	1A	UN 1002 AIR COMPRIMÉ 2.2	UN 1002 AIR COMPRIMÉ 2.2
^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies [20]. N.S.A.: "Non Spécifié par Ailleurs".				

C.5.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé

Il convient de stocker et de transporter les appareillages électriques remplis d'air comprimé conformément aux règlements locaux et internationaux.

Des règlements internationaux relatifs au transport sont disponibles pour le transport routier (ADR), ferroviaire (RID), maritime (code IDMG) et aérien (IATA – DGR). Ils sont similaires en ce qui concerne la numérotation UN, la classification, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport.

Conformément aux codes de transport ADR, RID et IATA, il convient que la pression de remplissage ne dépasse pas 200 kPa (relative) à 20 °C.

C.5.5 Responsabilités

Le propriétaire de l'appareillage électrique utilisant de l'air comprimé est responsable de la bonne utilisation, du transport et de l'élimination de l'appareillage électrique et du gaz. Il n'est pas exigé de consigner les informations relatives à l'air comprimé contenu.

C.6 Description des appareils de manipulation**C.6.1 Généralités****C.6.1.1 Présentation**

Le présent paragraphe donne des informations concernant la fonctionnalité et les critères de performance minimales des appareils de manipulation de l'air comprimé et des composants spécifiques.

Pour la manipulation de l'air comprimé, aucun appareil de manipulation d'usage général n'est nécessaire, et les fonctions exigées sont réalisées comme suit:

- rejet contrôlé de l'air comprimé du compartiment sous gaz dans l'atmosphère par une soupape de ventilation (voir la Figure C.1);
- élimination des polluants par des filtres portables (voir C.6.2);
- si cela est exigé: évacuation de l'air comprimé du compartiment sous gaz par une pompe à vide (voir C.6.3);

- remplissage du compartiment sous gaz avec l'air comprimé (voir C.6.16);
- soit à partir de récipients préremplis par l'intermédiaire de réducteurs de pression;
- soit par l'intermédiaire d'appareils de purification et de remplissage prévus à cet effet;
- prélèvement d'échantillons de gaz du compartiment sous gaz par transfert direct vers des bouteilles d'échantillonnage

L'air comprimé n'a aucun impact négatif sur l'environnement et peut ne pas être récupéré de l'appareillage électrique d'un point de vue environnemental. Si de l'air comprimé fortement décomposé est rejeté dans l'atmosphère, il convient d'utiliser des filtres pour absorber les éventuels produits de décomposition qu'il peut contenir. Il convient d'éviter tout rejet d'air comprimé fortement décomposé en intérieur.

La Figure C.1 donne un exemple de diagramme de rejet contrôlé d'air comprimé par un appareillage électrique (système à pression autonome) dans l'atmosphère. Si de l'air comprimé fortement décomposé est rejeté, après que le compartiment sous gaz a atteint la pression ambiante, une pompe à vide spécifique (voir C.6.3) reliée à la soupape de ventilation peut être utilisée pour rejeter la quantité résiduelle d'air comprimé dans l'atmosphère.

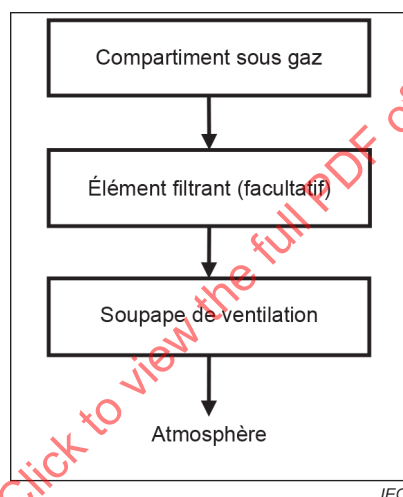


Figure C.1 – Rejet contrôlé d'air comprimé

C.6.1.2 Qualification des appareils de manipulation

Avant d'utiliser un appareil de manipulation, il convient de vérifier qu'il peut être utilisé pour la tâche prévue. Un appareil de manipulation prévu pour exécuter la même tâche, mais destiné à un autre gaz et qui n'est pas qualifié pour l'air comprimé peut être endommagé, faire l'objet d'un dysfonctionnement ou donner des relevés erronés, et donc présenter un risque pour l'opérateur ou pour l'appareil de manipulation ou l'appareillage électrique.

C.6.2 Filtres

C.6.2.1 Généralités

Des filtres doivent éliminer les produits de décomposition gazeux réactifs, l'humidité et les particules solides ou les gouttelettes d'huile avant le stockage de l'air comprimé dans un récipient ou le rejet d'air comprimé fortement décomposé dans l'atmosphère.

Le Tableau C.7 présente des types de filtres classiques utilisés lors du rejet de l'air comprimé dans l'atmosphère.

Tableau C.7 – Types de filtres classiques utilisés lors du rejet de l'air comprimé dans l'atmosphère

Type de filtre	Tâches	Caractéristiques principales
Filtre à particules	Élimine les produits de décomposition solides et les autres particules.	Dimension des pores inférieure à 1 µm.
Filtre sec	Élimine les produits de décomposition gazeux réactifs et l'humidité.	Humidité résiduelle inférieure à 100 µl/l (ppmv). Pas de concentration en NO _x résiduelle. Pour les valeurs d'OEL, voir le Tableau C.11. Aptitude à la rétention de particules.
Filtre à huile	Élimine l'huile lorsqu'exigé.	Filtre spécial utilisant du charbon actif.

C.6.2.2 Types de filtres**C.6.2.2.1 Filtre à particules**

Certains produits de décomposition qui sont générés pendant les opérations de coupure, sont constitués de fines particules solides (par exemple, des particules métalliques). La face interne du filtre à particules est constituée de papier fait d'un tissu lié approprié capable de retenir les particules de dimension supérieure à 1 µm. En principe, le filtre à particules est installé à la sortie de l'appareillage électrique afin de protéger l'appareil de manipulation et le récipient de stockage du gaz ou pour éviter le rejet de particules dans l'atmosphère, si de l'air comprimé fortement décomposé est rejeté dans l'atmosphère.

C.6.2.2.2 Filtre d'humidité et de produit de décomposition gazeux (filtre sec)

Les filtres appropriés peuvent absorber l'humidité et les produits de décomposition gazeux réactifs, tels que les oxydes d'azote (NO_x) ou l'ozone (O₃). Il convient d'utiliser des tamis moléculaires dont la dimension des pores est inférieure à 0,5 nm. Si une plus grande taille de pores est utilisée, dans certaines conditions, des réactions thermodynamiques exothermiques peuvent se produire avec l'humidité, produisant une surchauffe importante du filtre. Toujours consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique pour savoir si des matériaux de filtrage sont nécessaires. Vérifier également la taille du filtre, de sorte qu'il soit suffisamment grand pour obtenir l'humidité résiduelle exigée.

C.6.2.2.3 Filtre combiné

En lieu et place de filtres à particules et à humidité séparés, et de filtres de produits de décomposition gazeux, des filtres combinant ces deux principes de filtration peuvent être installés.

C.6.2.2.4 Filtre à huile

Il convient d'insérer un piège à huile contenant du charbon actif dans le cycle d'air comprimé si une machine lubrifiée par de l'huile est utilisée ou si un composant électrique lubrifié à l'huile est intégré dans l'appareillage électrique utilisant de l'air comprimé. L'élimination de l'huile est effectuée en plusieurs étapes de manière à éviter la diffusion de l'huile.

C.6.3 Pompe à vide

La pompe à vide est utilisée pour vider l'appareillage électrique de l'air ou d'autres gaz pouvant être rejetés dans l'atmosphère, mais qui ne satisfont pas aux spécifications de l'air comprimé à utiliser dans l'appareillage électrique. La pompe à vide est également utilisée pour vider de l'appareillage électrique, par l'intermédiaire de filtres, l'air comprimé fortement décomposé.

L'évacuation de l'appareillage électrique contenant de l'air atmosphérique n'est exigé si, après le remplissage, la qualité de l'air comprimé à l'intérieur de l'appareillage électrique satisfait aux spécifications indiquées dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Il convient que la pression résiduelle à l'entrée de la pompe à vide soit inférieure à 0,1 kPa. Pour accélérer l'évacuation des compartiments sous gaz, l'utilisation de pompes à vide avec une pression résiduelle à l'entrée inférieure à 0,01 kPa est recommandée.

La pompe à vide est équipée d'un manomètre à vide. Il convient que la résolution du manomètre à vide soit au moins inférieure à 0,1 kPa (la valeur recommandée est inférieure à 0,01 kPa). Des manomètres à vide indépendants du type de gaz sont généralement recommandés.

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

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

C.6.4 Compresseurs principal et à vide

Les compresseurs (principaux) peuvent être utilisés comme partie intégrante d'un appareil de purification et de remplissage (voir C.6.16). Par ailleurs, l'air comprimé peut également être rempli à partir de récipients de stockage de gaz externes. Les compresseurs à vide ne sont pas utilisés pour la manipulation de l'air comprimé.

C.6.5 Compresseur de sortie

Un compresseur de sortie, placé entre le récipient de stockage de gaz et le compartiment sous gaz, n'est pas nécessaire à la manipulation de l'air comprimé, étant donné que l'air peut être stocké à des pressions élevées sous forme gazeuse. Il peut cependant être exigé si l'air comprimé est produit sur site par une unité de purification (voir C.6.16).

C.6.6 Récipients de stockage de gaz externes et internes

Des récipients de stockage de gaz externes sont utilisés pour stocker l'air comprimé à une pression élevée. Ils sont utilisés pour remplir directement l'air comprimé dans l'appareillage électrique. D'autre part, des appareils de purification et de remplissage peuvent être utilisés (voir C.6.16).

C.6.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz

L'évaporateur et l'appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz ne sont pas utilisés pour manipuler l'air comprimé, étant donné que l'air ne se liquéfie pas à des températures de stockage types.

C.6.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries

Il convient de concevoir les conduites de gaz et les connexions de tuyauteries de façon à éviter les fuites et la corrosion. À cet effet, l'acier inoxydable est préféré. Il convient que la conception à la fois de la tuyauterie et des connexions tienne compte des vibrations de sorte que des opérations périodiques telles qu'un resserrage des connexions ne soient pas nécessaires.

C.6.9 Instruments de contrôle

Il convient de prévoir des jauges de contrôle pour indiquer la pression de gaz dans le compartiment sous gaz, le niveau de vide, la température du gaz, etc. Il convient de les disposer dans une position telle qu'elles puissent être observées lors du remplissage des compartiments sous gaz et du rejet de l'air comprimé dans l'atmosphère. Il convient que l'exactitude et la résolution des jauges soient adéquates pour permettre la conservation des conditions de fonctionnement de sécurité.

C.6.10 Soupapes de sûreté

Des soupapes de sûreté sont utilisées dans le cycle d'air comprimé pour limiter la pression. Les règlements locaux de sécurité sont respectés.

C.6.11 Connexions de tuyaux flexibles

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

C.6.12 Dispositifs portables de mesure de gaz

C.6.12.1 Généralités

Le Tableau C.8 fournit une étude des dispositifs de mesure de gaz incluant les valeurs recommandées pour la plage, la température d'exploitation et l'exactitude minimale. Ces grandeurs sont généralement déclarées par le fabricant de dispositifs portables de mesure de gaz dans la fiche technique.

Tableau C.8 – Dispositifs de mesure de gaz

Dispositif	Mesurage	Plage	Température d'exploitation	Exactitude minimale
Hygromètre (appareil de mesure de point de gelée/rosée)	Humidité (point de gelée/rosée)	40 µl/l (ppmv) à 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C à 0 °C)	-10 °C à 40 °C	(±2 °C)
Dispositif de mesure de la concentration en He (uniquement en cas de détection de fuite)	Concentration en He dans l'air comprimé	0 % à 10 %	-10 °C à 40 °C	±0,1 %
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Les produits de décomposition sont par exemple NO, NO ₂	1 µl/l (ppmv) à 25 µl/l (ppmv)	-10 °C à 40 °C	±15 % de la plage complète
Manomètre	Pression	0 kPa à 2 000 kPa	-10 °C à 40 °C	±10 kPa
Thermomètre	Température	-25 °C à 70 °C	-25 °C à 70 °C	±1 °C

Par convention, les valeurs de pression sont consignées à 20 °C. Utiliser un manomètre à compensation de température ou calculer de nouveau en fonction de la température réelle du gaz pendant le mesurage.

Des mesurages de qualité de gaz peuvent être effectués dans les conditions de laboratoire ou sur le site. Les articles qui suivent décrivent les appareils portables les plus couramment utilisés sur le site pour le mesurage de:

- la teneur en humidité dans le gaz et/ou le point rosée ou de gelée;
- la concentration en He (uniquement en cas de détection de fuite);
- la quantité de produits de décomposition gazeux réactifs.

Aucun pompage en retour de l'air comprimé après le mesurage n'est exigé si le volume de gaz pour le mesurage est limité comparé au volume de gaz dans l'appareillage électrique.

C.6.12.2 Appareil de mesure de point de gelée/rosée

La teneur en humidité peut être mesurée en utilisant différents principes de mesure et instruments de mesure. Cependant, un appareil de mesure de point de gelée/rosée est l'appareil portable le plus couramment utilisé à cet effet. Cet appareil mesure le point de gelée/rosée de l'humidité à l'intérieur du gaz, exprimé en °C, et peut le convertir en concentration volumique relative, exprimée en $\mu\text{l/l}$ (ppmv).

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- capteur résistant aux traces d'huile et aux gaz corrosifs;
- tuyaux résistant à la perméation utilisant des connexions de robinet auto-obturants;
- tuyaux en acier inoxydable et connexions réalisées en matériaux hydrophobes;
- étalonnés ou capables d'étalonnage sur le site;
- petites quantités de gaz utilisées par mesurage;
- durée moyenne pour obtenir la lecture inférieure à 5 min.

C.6.12.3 Dispositifs de mesure de la concentration en gaz – dispositifs de mesure de la concentration en He

Des détecteurs d'hélium (pour des installations portables ou fixes à usage en laboratoire) peuvent être exigés pour procéder aux essais de fuite sur site d'un appareillage électrique utilisant de l'air comprimé, qui est provisoirement rempli d'une certaine quantité d'hélium afin de localiser les zones de fuite anormales. Voir la brochure 430 du CIGRE [13]. Ils reposent, par exemple, sur des mesurages de la vitesse du son, de la spectrométrie de masse ou de la conductivité thermique.

Il convient que le fabricant de l'appareillage électrique définisse la concentration maximale admissible d'hélium qui peut être présent dans l'appareillage électrique pour un fonctionnement sûr après avoir procédé aux essais de fuite.

C.6.12.4 Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs

De différentes méthodes sont disponibles pour l'essai des produits de décomposition gazeux réactifs. La pratique courante et recommandée consiste à effectuer l'essai du niveau d'oxydes d'azote No_x , c'est-à-dire principalement le NO_2 et le NO . Ces essais peuvent être réalisés en utilisant soit des tubes à réaction (les tubes à réaction changent de couleur initiale si de l'air comprimé contenant du No_x les traverse) soit en utilisant d'autres capteurs (un capteur électrochimique, par exemple).

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- sensibilité connue au No_x ;
- tuyaux de connexion résistant aux produits de décomposition gazeux réactifs et utilisant des connexions de robinet auto-obturants.

C.6.13 Contrôleur de fuite de gaz

Outre l'application d'un vaporisateur de détection de fuite, des détecteurs portables d'hélium peuvent être utilisés pour procéder aux essais de fuite sur site d'un appareillage électrique utilisant de l'air comprimé, qui est provisoirement rempli d'une certaine quantité d'hélium afin de localiser les zones de fuite anormales. Voir la brochure 430 du CIGRE [13]. Les détecteurs d'hélium reposent, par exemple, sur des mesurages de la vitesse du son, de la spectrométrie de masse ou de la conductivité thermique. D'autres approches ont été consignées en fonction soit de leur méthode d'essai cumulative (avec des capteurs de CO₂, par exemple) soit de la méthode de reniflage utilisant l'ozone comme gaz traceur en lieu et place de l'hélium.

C.6.14 Systèmes d'alarme de concentration en gaz

Des systèmes d'alarme de concentration en gaz ne sont pas nécessaires, étant donné qu'il n'y a aucun risque d'asphyxie, lorsque de l'air comprimé est utilisé pour l'isolation et/ou la commutation.

C.6.15 Bouteilles d'échantillonnage de gaz

Des bouteilles d'acier inoxydable d'un volume inférieur à 1 l sont recommandées. Il convient d'échantillonner directement le gaz depuis le compartiment sous gaz en utilisant des connexions appropriées. Si la pression dans le compartiment sous gaz dépasse la pression maximale admissible de la bouteille, il convient alors d'utiliser un régulateur de pression et un manomètre.

C.6.16 Appareil de purification et de remplissage de gaz

En règle générale, la pratique courante et recommandée d'apport d'air comprimé consiste à utiliser des récipients préremplis disponibles dans le monde entier. Dans ce cas, l'appareillage électrique est directement rempli depuis le récipient prérempli en utilisant des réducteurs de pression prévus à cet effet limitant la pression à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation.

Dans certains cas, l'apport d'air comprimé sur le site peut s'avérer préférable. La Figure C.2 représente un appareil de purification de l'air atmosphérique pour créer de l'air comprimé sur le site.

- L'air comprimé peut être généré sur le site par un appareil de purification contenant: des éléments filtrants spécifiques pour nettoyer et sécher l'air atmosphérique;
- un compresseur pour remplir un récipient de stockage interne ou le compartiment sous gaz de l'appareillage électrique directement à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- degré réglable de contamination et du point de rosée ou de gelée;
- pression de sortie maximale: en général jusqu'à 2 000 kPa. Pour le stockage interne, des pressions de sortie supérieures peuvent être exigées.

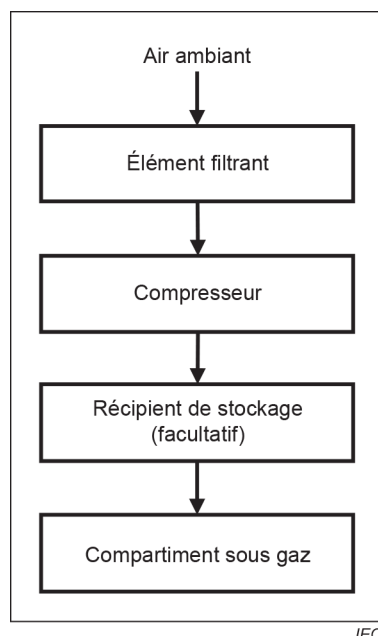


Figure C.2 – Exemple d'appareil de purification et de remplissage de gaz

C.7 Procédures de régénération

C.7.1 Généralités

L'air comprimé n'a aucun impact sur l'environnement et peut généralement ne pas être régénéré depuis l'appareillage électrique d'un point de vue environnemental. La régénération est uniquement nécessaire lorsque de l'air comprimé fortement décomposé est rejeté dans l'atmosphère. Dans ce cas, il convient d'utiliser des filtres pour absorber les éventuels produits de décomposition. Les éléments filtrants utilisés pour le SF₆ s'appliquent également pour filtrer l'air comprimé.

Il convient que les filtres satisfassent aux exigences suivantes:

- il convient qu'ils éliminent de manière fiable les polluants mentionnés;
- il convient que les filtres soient de type à cartouche pour une élimination sûre et aisée;
- il convient que l'entrée et la sortie soient équipées des mêmes coupleurs auto-obturants;
- il convient que le changement de filtres ne nécessite pas le démontage d'accessoires, tubes ou autre raccord pour éliminer la possibilité de fuite;
- il est recommandé de remplacer le filtre pour chaque procédure de régénération.

C.7.2 Recommandations en matière de filtrage

Il convient que la qualité de l'air comprimé fortement décomposé filtré satisfasse aux exigences du manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique et qu'elle soit conforme aux règlements locaux.

Tous les polluants qui apparaissent peuvent être éliminés sur site. Le Tableau C.9 donne la liste des types de polluants et les méthodes recommandées pour les éliminer.

Tableau C.9 – Exemples de méthodes de filtrage

Contamination	Humidité	Produits de décomposition gazeux	Produits de décomposition solides	Contaminé par de l'huile minérale (si nécessaire)
Méthode de filtrage	Absorption avec un tamis moléculaire	Absorption avec de l'oxyde d'aluminium actif ou un tamis moléculaire	Rétention avec des filtres solides	Filtre à charbon actif

Différents types de matériaux absorbants sont disponibles pour éliminer les polluants de l'air comprimé (voir le Tableau C.10). Par la manipulation correspondante avec des éléments filtrants, le gaz est filtré et finalement rejeté dans l'atmosphère.

Tableau C.10 – Absorbants types des différents polluants de l'air comprimé

Absorbant	Polluants éliminés
Tamis moléculaire 4A	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Tamis moléculaire 13X	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂ (n'absorbe que peu d'air comprimé)
Oxyde d'aluminium actif	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Charbon actif	Vapeur d'huile

C.7.3 Transport par route d'air comprimé usagé dans des bouteilles de gaz et des récipients

Le transport de l'air comprimé usagé n'est pas nécessaire étant donné qu'il peut être rejeté dans l'atmosphère. Seul le transport pour l'analyse hors site du gaz est exigé. Pour l'air comprimé usagé, les règlements en matière de transport routier et d'étiquetage sont les mêmes que pour l'air comprimé de qualité technique (voir C.5.3). Toutefois, il convient de tenir compte des règlements locaux.

Le présent document ne définit pas de limites de concentration maximale admissible pour les produits de décomposition dangereux. Il convient d'appliquer les règlements locaux ou les lignes directrices locales, le cas échéant.

C.8 Produits de décomposition

C.8.1 Généralités

Le présent paragraphe décrit les aspects généraux de la décomposition et les caractéristiques des produits de décomposition. Les quantités dépendent des polluants et de l'énergie introduite. Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique donne davantage de précisions et les aspects spécifiques conformément à l'IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

C.8.2 Décomposition de l'air comprimé

C.8.2.1 Généralités

Lorsqu'un arc se produit dans de l'air comprimé, différents produits de décomposition sont générés en même temps et en différentes quantités. À des températures au-dessus de quelques 1 000 °C, les molécules de N_2 et d' O_2 commencent à se décomposer en atomes. Le taux de décomposition est lié à l'énergie d'arc totale. Lorsque la température chute de nouveau, la plupart des atomes se recombinent pour reformer du N_2 ou de l' O_2 , alors que d'autres se combinent avec l'humidité et différentes substances de l'appareillage électrique (les métaux d'électrode vaporisés, les parois du récipient, la buse en PTFE ou d'autres plastiques, par exemple) pour former une variété de produits de décomposition instables ou stables.

La production des produits de décomposition peut être classée en trois groupes.

C.8.2.2 Décomposition de l'air comprimé en faibles décharges de courant

Bien qu'une tension de service soit appliquée à l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé, la possibilité de faibles décharges de courant telles qu'un effet couronne, une étincelle et des décharges partielles ne peut pas être écartée. Toutefois, les concentrations en produits de décomposition résultant de telles décharges sont très faibles.

C.8.2.3 Décomposition de l'air comprimé dans un arc électrique

Pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut, un arc électrique atteignant des températures de l'ordre de 10 000 °C se forme.

La grande quantité de chaleur absorbée pendant ce processus est dissipée de la zone de l'arc par rayonnement et convection. Au-dessous d'une température comprise entre 1 000 °C et 2 500 °C environ, les atomes se recombinent ou réagissent avec d'autres substances, telles qu'un métal d'électrode vaporisé, la paroi du récipient ou des plastiques. Des produits de décomposition gazeux et solides peuvent apparaître, incluant des oxydes métalliques et des oxydes d'azote dont les plus importants sont CuO , Al_2O_3 , NO et NO_2 .

Ces produits, appelés généralement produits de décomposition primaires, sont formés pendant ou peu de temps après une décharge de l'ordre de moins d'une seconde. Les dépôts poussiéreux pouvant apparaître sur les surfaces des isolateurs en fonctionnement normal n'ont aucun effet défavorable sur leurs performances diélectriques.

NO_2 est le principal produit de décomposition gazeux. NO_2 et N_2O_4 sont stables d'un point de vue chimique dans l'air sec et à température ambiante. D'autres sont instables (c'est-à-dire NO , O_3 , N_2O_5 , NO_3), en particulier en présence d'eau. NO_2 s'hydrolyse en HNO_2 et en HNO_3 . D'un point de vue chimique, l'acide nitrique (HNO_3) est le produit de décomposition le plus stable à la température ambiante et peut corroder les surfaces métalliques (voir D.8.2.5), selon la conception de l'appareillage électrique. Toutefois, de grandes quantités d'acide nitrique, et donc de corrosion, n'apparaissent pas dans les appareillages électriques contenant le type et la quantité adaptés de matériaux absorbants.

C.8.2.4 Décomposition de l'air comprimé en raison d'une défaillance d'arc interne

Les mécanismes de décomposition décrits en C.8.2.3 sont similaires en cas de défaillance d'arc interne. Des produits de décomposition gazeux supplémentaires (CO , CO_2 , par exemple) et des produits de décomposition solides (oxydes métalliques, par exemple) peuvent apparaître dans le cadre d'une interaction de l'arc interne avec différents matériaux présents dans l'appareillage électrique.

C.8.2.5 Réaction chimique de l'air comprimé avec le matériau

En l'absence d'une quantité significative de produits de décomposition, la corrosion est la seule réaction chimique à prendre en considération lorsque de l'air comprimé est utilisé pour l'isolation et/ou la commutation. Pour plus d'informations, voir C.8.3.

C.8.3 Comportement de corrosion de l'air comprimé et de ses produits de décomposition

En fonctionnement normal, des quantités importantes de produits de décomposition n'apparaissent pas et sont absorbées par les matériaux absorbants.

Uniquement dans le cas de l'air comprimé fortement décomposé présentant une concentration importante de produits de décomposition corrosifs (en cas de défauts d'arc interne, par exemple), les métaux habituellement utilisés, tels que l'aluminium, l'acier, le cuivre et le laiton, peuvent être attaqués et se corroder.

N₂ est un gaz inerte. La corrosion n'a donc aucune chance d'être provoquée directement par le N₂ lui-même.

L'impact du O₂ en présence d'eau sur le comportement de corrosion dans l'appareillage électrique est bien connu et pris en considération dans les normes correspondantes (IEC 62271-1:2017 ou IEC TR 60943 [15], par exemple). Toutefois, en présence d'eau, les produits de décomposition primaires et secondaires peuvent former des acides nitreux ou nitriques corrosifs et de l'ozone, ce qui peut endommager certains matériaux utilisés à l'intérieur de l'appareillage électrique.

Certains matériaux, tels que les matériaux polymères et analogues, sont plus vulnérables aux attaques par l'ozone. Toutefois, l'impact de l'ozone sur les propriétés du matériau dépend dans une très large mesure du matériau spécifique utilisé dans l'appareillage électrique.

Il est important que la conception de l'appareillage électrique tienne compte des propriétés corrosives des produits de décomposition.

C.8.4 Mesures pour le retrait des produits de décomposition

L'humidité et les produits de décomposition à l'intérieur de l'appareillage électrique peuvent être réduits à des niveaux acceptables par absorption. Des matériaux tels que l'alumine, les tamis moléculaires ou leurs mélanges conviennent à cet effet. Ils absorbent très efficacement la plupart des produits de décomposition gazeux et en même temps, assurent que le point de rosée/point de gelée reste faible.

L'élimination des produits de décomposition enlevés de l'appareillage électrique est directe. Les composants acides (acide nitreux et acide nitrique) sont dégradés au moyen de composés alcalins, en particulier le carbonate de sodium (Na₂CO₃).

C.8.5 Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition

Les produits de décomposition de l'air comprimé peuvent provoquer une irritation de la peau, des yeux et des muqueuses, par exemple des voies respiratoires, et en forte concentration, peuvent provoquer un œdème pulmonaire (O₃, par exemple) si le temps d'exposition est suffisant.

L'air comprimé fortement décomposé contenant des produits de décomposition a une odeur d'eau de javel ou une odeur âcre désagréable qui est associée en elle-même à un effet irritant. Les seuils olfactifs, en particulier pour NO₂ et O₃, sont du même ordre que les valeurs limites données dans le Tableau C.11. Du fait de ces caractéristiques, même de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent conduire à des indications d'avertissement

manifestes en quelques secondes, sans qu'aucun risque d'empoisonnement ne puisse apparaître.

Lorsque du monoxyde de carbone CO est produit, sa détection est primordiale. Le CO est inodore et toxique en cas d'inhalation. Il entraîne des maux de tête, de la nausée, du vertige, de l'évanouissement et il est parfois mortel. Une inhalation prolongée ou répétée peut provoquer des lésions au cœur.

C.9 Procédure d'évaluation des effets potentiels des produits de décomposition sur la santé

C.9.1 Généralités

Le présent paragraphe propose des procédures d'évaluation des risques pour la santé de l'air comprimé fortement décomposé contenant une quantité importante de produits de décomposition rejetés dans l'atmosphère local après une fuite normale ou anormale, et en cas de rejet soudain dû à un défaut d'arc interne ou à un feu extérieur.

L'air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé n'ayant aucun impact potentiel sur la santé des personnes, il n'est pas pris en considération à cet égard.

Pendant le fonctionnement normal, l'air comprimé reste à l'intérieur de l'appareillage électrique et les produits de décomposition gazeux formés sont présents à de faibles concentrations. Les produits de décomposition de l'air comprimé peuvent être présents dans l'atmosphère en raison d'une fuite ou si un compartiment sous gaz ne parvient pas à contenir le gaz (en cas de défaut d'arc interne, par exemple). Lors de l'évaluation du risque pour la santé, il est nécessaire d'effectuer une différenciation claire entre les conditions de fuite et les situations de défaut d'arc interne conduisant à un rejet soudain de produits de décomposition de l'air comprimé.

En cas de fuite, il est nécessaire de tenir compte des effets d'une exposition à long terme aux produits de décomposition gazeux de l'air comprimé fortement décomposé. Il convient que les concentrations de ces produits de décomposition dans l'air restent inférieures aux valeurs TWA pour ne présenter aucune menace pour le personnel non protégé pendant une période de travail normale, par exemple de 8 h. Il convient que les principaux produits de décomposition de l'air comprimé soient capturés par des matériaux absorbants à l'intérieur de l'appareillage électrique, de sorte que les conditions de fuite combinées à une ventilation normale du local ne puissent donner lieu à des concentrations anormales de produits de décomposition dans l'environnement.

En cas de rejet soudain de produits de décomposition de l'air comprimé fortement décomposé en raison d'un défaut d'arc interne, la procédure d'urgence exigée par le règlement local peut donner lieu à une exposition de courte durée. Des concentrations plus élevées de produits de décomposition sont tolérables si la durée d'exposition est considérablement réduite. Dans ce cas, il convient de tenir compte de toutes les sources possibles d'émissions toxiques, ce qui exige d'avoir une connaissance détaillée de tous les produits de décomposition formés. Il convient qu'une analyse complète tienne compte des contributions de la vapeur métallique, des plastiques brûlés, de l'isolation des câbles, de la peinture, etc., sur une base légale à ce qui peut être attribué à l'air comprimé fortement décomposé.

Les paragraphes suivants fournissent des exemples de calculs pour l'évaluation des risques associés à la présence de produits de décomposition, en matière de quantité et de toxicité, en raison d'une fuite normale ou anormale dans l'atmosphère. Les quantités dépendent des polluants et de l'énergie d'arc introduite. Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique donne davantage de précisions et les aspects spécifiques

C.9.2 Formation de produits de décomposition et effets sur la santé

C.9.2.1 Formation de produits de décomposition pendant un arc

Pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut, le cœur de l'arc atteint des températures de l'ordre de 10 000 °C. À ces températures, les molécules de gaz sont entièrement rompues en leurs atomes parents, N et O, comme cela est consigné à l'Article C.8. Tous les polluants, tels que l'eau, sont dissociés d'une manière similaire. Le résultat en est une région localisée ne contenant que des atomes uniques de N, O et divers ions. Le chauffage des électrodes et des parties isolantes par l'arc ajoute à cette atmosphère des vapeurs de Ag, Cu, W, C et Al, par exemple.

Après extinction de l'arc ou dans les régions dans lesquelles le refroidissement commence, ces atomes commencent à se lier à nouveau ensemble et reforment principalement du N₂ ou O₂. Toutefois, des réactions chimiques se produisent avec les contaminations présentes et en particulier avec l'eau, donnant naissance à ce que l'on appelle produits de décomposition d'arc. Les quantités formées sont directement associées à l'énergie d'arc injectée dans le volume de gaz.

Dans le cas des disjoncteurs qui contiennent de l'air comprimé et des pièces en PTFE, le HF peut également se former en tant que produit de décomposition critique. Dans le scénario le plus défavorable, il convient d'admettre que pour ce type d'exemple de disjoncteur, le produit de décomposition HF est toujours présent lorsque le gaz décomposé est rejeté dans l'atmosphère.

Les produits de décomposition gazeux les plus souvent rencontrés dans l'air comprimé fortement décomposé sont les suivants: NO₂ et O₃.

C.9.2.2 Effets sur la santé des produits de décomposition

C.9.2.2.1 Généralités

Si de l'air comprimé décomposé est évacué sur le lieu de travail, le risque potentiel sur la santé dépend de la concentration en chaque produit de décomposition dans l'air, et donc du volume du local contenant l'appareillage électrique. Il convient que les estimations de toxicité tiennent compte de la concentration en chaque produit de décomposition en relation avec les concentrations admissibles pendant la durée d'exposition appropriée. Il convient d'adopter la formule ci-dessous pour calculer le risque total associé aux produits de décomposition (voir C.9.2.4) pour un exemple de calculs qu'il convient d'appliquer pour tous les produits de décomposition survenus).

$$\text{Risk}_{\text{tot}} = \sum_i \frac{\text{concentration (produits de décomposition)}_i}{\text{Seuil (produits de décomposition)}_i} \leq 1$$

En principe, quatre principaux cas de contact avec de l'air comprimé contenant des produits de décomposition peuvent se produire:

- **fuite normale:** fuite de gaz de l'appareillage électrique dans les limites des taux de fuite admissibles de 0,5 %/a ou 0,1 %/a, par exemple;
- **fuite anormale:** fuite de gaz de l'appareillage électrique au-dessus des limites des taux de fuite admissibles de 0,5 %/a ou 0,1 %/a, par exemple;
- **maintenance:** entrée dans le compartiment sous gaz après récupération de l'air comprimé pour la maintenance, la réparation ou le traitement de fin de vie;
- **défaillance:** ouverture d'un compartiment sous gaz après un arc interne ou un feu extérieur.

La principale différence est la concentration en produits de décomposition dans le local d'appareillage. En cas de feu extérieur ou de défaillance d'arc interne, d'autres substances dangereuses peuvent également être générées. Ces substances supplémentaires ne sont pas

couvertes par cette analyse, car elles ne dépendent pas uniquement du gaz d'isolation, mais également des autres matériaux utilisés et de leur comportement en cas de feu ou d'arcs d'énergie élevée.

NOTE Selon les dimensions du local, les gaz qui ont fuit peuvent temporairement ne plus d'être distribué uniformément dans le local d'appareillage et de plus fortes concentrations peuvent survenir localement.

C.9.2.2.2 Effets de l'air comprimé décomposé sur la santé

Pour les mélanges de plusieurs composants, les toxicologues définissent quatre cas généraux:

- chaque composant agit d'une manière différente ou sur des organes cibles différents; les effets ne sont donc pas cumulatifs et chaque composant est traité séparément;
- les composants agissent de manière similaire sur les mêmes organes cibles; leur effet est donc cumulatif et les calculs en tiennent compte;
- si un composant surpasse largement la contribution des autres; il convient d'estimer l'effet toxique global en étudiant la concentration en ce seul composant;
- il y a un effet synergétique entre les composants, ce qui implique un impact plus important sur la santé.

Le risque total pour la santé du personnel, dû à l'air comprimé fortement décomposé, dépend de façon prédominante des concentrations en NO_2 du produit de décomposition (O_3 est une molécule instable dont la durée de vie est courte dans l'atmosphère).

Une hydrolyse du NO_2 peut se produire en présence de concentrations significatives d'eau, produisant HNO_2 et HNO_3 , comme cela est consigné en C.8.1. Jusqu'à présent, les valeurs TWA de HNO_3 ont été définies sur 2 µl/l (ppmv).

C.9.2.2.3 Durée d'exposition et dilution dans l'air

Il existe deux notions essentielles pour toute évaluation du risque pour la santé dû à des substances toxiques:

- la concentration de la substance dans le volume environnant;
- la durée d'exposition.

Lorsqu'une situation de fuite est calculée, il convient d'utiliser la valeur TWA. Un exemple de calcul de la valeur TWA est donné en 3.1.28.

L'exposition à des concentrations mesurables de produits de décomposition n'est pas prévue pendant le fonctionnement normal de l'appareillage électrique. Les concentrations aérogènes de produits de décomposition sont en général bien inférieures à la valeur TWA pour ces substances.

En cas de rejet soudain (l'ouverture d'un dispositif limiteur de pression, par exemple, en raison d'un défaut d'arc interne), il convient que le personnel quitte immédiatement le local d'appareillage, donnant lieu à une exposition à court terme à des concentrations mesurables de produits de décomposition. En quittant le local, il peut être évité que le personnel puisse potentiellement être exposé à des concentrations de produits de décomposition supérieures à leurs valeurs C, à leurs valeurs STEL ou à cinq fois leurs valeurs TWA.

Les limites d'exposition professionnelle (OEL) pour NO_2 , NO , O_3 et HNO_3 sont données dans le Tableau C.11. De plus, le Tableau C.11 est différent selon qu'il s'agit de molécules instables (courte durée de vie dans l'atmosphère) ou de molécules stables (longue durée de vie dans l'atmosphère).

Tableau C.11 – OEL pour NO₂, NO, O₃ et HNO₃

OEL	NO ₂	HNO ₃	NO	O ₃
	Molécule stable dans l'air ambiant à la température ambiante		Molécule instable dans l'air ambiant à la température ambiante	
TWA (µl/l)	0,2 à 0,5	2	25	0,05 à 0,1
STEL (µl/l)	5	4	non défini	0,3
C (µl/l)	115	67	115	12,6
NOTE 1 Les valeurs sont conformes à l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ou l'AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals).				
NOTE 2 Si aucune valeur C n'est disponible, la valeur LC50 est ajoutée à sa place.				

C.9.2.3 Estimation quantitative des produits de décomposition gazeux

Le taux de production des produits de décomposition gazeux formés pendant un arc électrique fait en général référence à l'énergie, en Joule, dissipée dans le gaz. Les résultats expérimentaux sont généralement exprimés en mol/J.

À l'exception des disjoncteurs ou après des défauts d'arc interne, seul l'air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé, et donc seules de très faibles concentrations en NO₂, NO, O₃ et HNO₃, doivent être attendus pendant le fonctionnement de l'appareillage électrique contenant un type et une quantité adaptés de matériaux absorbants.

Les faibles concentrations en NO₂, NO et O₃ formées pendant un arc ou une décharge électrique normal(e) sont réduites dans une plus large mesure compte tenu de leur absorption par les matériaux absorbants. La concentration en HNO₃ à prévoir est négligeable compte tenu de la très faible concentration d'eau. De plus, les matériaux absorbants permettant d'absorber HNO₃ réduisent dans une plus large mesure la concentration maximale de HNO₃.

Il convient que la concentration estimée de NO₂, NO, O₃ et HNO₃ due à un arc dans les disjoncteurs soit indiquée par le fabricant de l'appareillage électrique.

C.9.2.4 Procédure d'évaluation du risque pour la santé

C.9.2.4.1 Généralités

Les procédures d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition gazeux dans l'air comprimé faiblement ou fortement décomposé sont fondées sur les hypothèses suivantes:

- le local d'appareillage est totalement fermé;
- le gaz émis se mélange uniformément avec l'air dans le local d'appareillage en une courte durée par rapport à la journée de travail ou à la durée d'exposition.

Il convient que le fabricant de l'appareillage électrique évalue les concentrations possibles de produits de décomposition, en prenant les scénarios les plus défavorables, tels que les essais de type des commutateurs et la concentration en fin de vie (pour les disjoncteurs au gaz HT, également les conditions liées aux intervalles d'entretien définis) et les résultats partagés avec l'utilisateur final. Dans les conditions les plus défavorables, l'utilisateur final se trouve toujours du côté sûr. Les chiffres réels peuvent uniquement être donnés dans le cadre d'une analyse pertinente d'un échantillon de gaz.

C.9.2.4.2 Fuite normale

Le paragraphe 6.16.1 de l'IEC 62271-1:2017 donne le taux de fuite admissible des gaz utilisés dans les locaux d'appareillage. Souvent, de faibles taux de fuite sont indiqués par le fabricant de l'appareillage électrique et sont vérifiés lors des essais de type. Ces essais couvrent les trois aspects relatifs à une fuite:

- une fuite de gaz entre les surfaces d'interface (entre le joint et la surface d'étanchéité, par exemple) des connexions statiques;
- une fuite de gaz entre les surfaces d'interface (entre le joint et la surface d'étanchéité, par exemple) des connexions dynamiques, lorsque le gaz s'échappe pendant le fonctionnement des axes de translation ou des arbres de rotation;
- la perméation du gaz à travers un élastomère (un joint, par exemple) ou un matériau thermoplastique.

Le taux de fuite admissible est valable à une température ambiante de 20 °C. Pour des températures plus élevées, le taux de fuite temporaire admis peut être jusqu'à trois fois plus élevé (voir l'IEC 62271-1:2017, Tableau 15). Cela s'explique essentiellement par le fait que la perméation du gaz dépend fortement de la température. De même, pour des températures inférieures à 0 °C, le taux de fuite temporaire admis peut être jusqu'à trois à six fois supérieur (voir l'IEC 62271-1:2017, Tableau 15), résultant essentiellement de la souplesse réduite des joints dans les connexions dynamiques.

Pour vérifier que l'appareillage électrique ne présente aucun défaut de fabrication donnant lieu à des taux de fuite plus élevés, un essai d'étanchéité individuel de série est à la pointe du progrès. Toutefois, en raison de sa courte durée, cet essai ne détecte en général que les fuites de gaz entre les interfaces (la détection de l'effet de perméation peut prendre des semaines). Les essais d'étanchéité individuels de série sont suffisants pour détecter les problèmes de fabrication (lorsque les fuites au niveau des interfaces et qu'une perméation modérée sont les causes dominantes).

La quantité de gaz qui a fui et de ses produits de décomposition peut être calculée en connaissant le taux de fuite, le volume de tous les compartiments sous gaz, la pression totale du gaz et la durée. La ventilation du local d'appareillage joue un rôle important. Le gaz qui s'échappe et ses produits de décomposition s'accumulent dans le local d'appareillage uniquement à de très faibles vitesses de ventilation ou en l'absence totale de ventilation.

La perméation des différents composants de mélange de gaz peut être différente et dépend du coefficient de perméation spécifique du gaz, qui est fonction du matériau et de la différence de pression partielle des composants gazeux à l'intérieur et à l'extérieur du compartiment sous gaz.

La perméation étant un effet plus ou moins constant dans le temps et réparti sur de nombreux emplacements du compartiment sous gaz, un mélange homogène de composants gazeux à l'intérieur du local d'appareillage peut être pris pour hypothèse.

Le Tableau C.12 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations de composants ou produits de décomposition gazeux dans la zone environnante. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:

Un appareillage MT est choisi, dans lequel l'air comprimé est utilisé comme support d'extinction et de l'air comprimé fortement décomposé est présent.

V_{eq}	Volume total de gaz des compartiments sous gaz
V_{room}	Volume total du local
p_{re}	Pression de remplissage
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration de produit de décomposition
F_{rel}	Taux de fuite relatif admissible
t	Durée de ventilation du local
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$Q = V_{room} / t$	Taux de ventilation du local
$R_{tot} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Taux de fuite absolu total
$R = R_{tot} \times x$	Taux de fuite absolu de produit de décomposition
$y = R / Q$	Concentration de produit de décomposition dans le local
$S = y / TWA$	Facteur de sécurité du produit de décomposition

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Tableau C.12 – Exemple de calcul d'une fuite normale

Produit de décomposition		NO ₂
V_{eq}	[m ³]	5
V_{room}	[m ³]	100
p_{re}	[kPa]	150
p_{am}	[kPa]	100
x	[µl/l (ppmv)]	200
F_{rel}	[%/an]	1
t	[année]	0,005
Q	[m ³ /an]	20 000
R_{tot}	[m ³ /an]	0,075
R	[m ³ /an]	0,000 015
y	[µl/l (ppmv)]	0,000 750
TWA	[µl/l (ppmv)]	0,5
S		0,000 150
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $1 < S \leq 3$: il convient de quitter le local d'appareillage dans les 30 min qui suivent. Si $S > 3$: il convient de quitter le local d'appareillage immédiatement. NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres produits de décomposition.		

C.9.2.4.3 Fuite anormale

Les défauts sont l'exception, mais ils ne peuvent pas être totalement exclus. Dans ce contexte, le principal type de défaut est une fuite due aux défauts dans les composants qui sont en principe étanches au gaz. Cela peut être dû à un joint endommagé ou à une traversée fissurée. Ces défauts peuvent se traduire par une augmentation des taux de fuite. Dans le cas le plus défavorable, la surpression peut devenir nulle en quelques semaines, quelques jours, voire quelques minutes. Dans ce cas, la quantité de gaz qui fuit dans l'air ambiant dépend de la surpression. Aujourd'hui, les appareillages sous enveloppe métallique à isolation gazeuse étant composés de plusieurs compartiments sous gaz étanches sans connexion de gaz, la quantité de gaz par compartiment est limitée. Dans la plupart des cas, ce type de défauts n'affecte qu'un ou deux compartiments sous gaz.

De même, une erreur humaine (un trou percé dans un compartiment sous gaz, l'ouverture accidentelle d'un couvercle ou le fonctionnement incorrect d'un robinet, par exemple) peut donner lieu à une perte de gaz et à une réduction de la pression à la pression ambiante dans le compartiment sous gaz.

Il s'agit d'un effet à court terme localisé à un endroit précis. La présence d'une personne à cet endroit au moment de la défaillance est le risque le plus important. Dans ce cas, la concentration locale de composants gazeux et de produits de décomposition est provisoirement plus élevée, mais ils se diluent rapidement dans le local d'appareillage et donnent finalement un mélange homogène. Des simulations ont démontré que cela prend de quelques minutes à quelques heures.

Il convient que l'appareillage électrique, affecté par une fuite anormale donnant lieu à une réduction de la pression du gaz isolant à la pression ambiante, soit arrêté et mis à la terre dès que possible. Il s'agit d'éviter un contournement à la terre imprévu à l'intérieur du compartiment sous gaz, pouvant générer un arc interne.

Le Tableau C.13 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations de composants ou produits de décomposition gazeux dans la zone environnante. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:	
Un appareillage MT est choisi, dans lequel l'air comprimé est utilisé comme support d'extinction et de l'air comprimé fortement décomposé est présent.	
Il s'agit d'un exemple de calcul le plus défavorable, dans lequel toute la surpression à l'intérieur du compartiment sous gaz le plus volumineux de l'appareillage électrique est rejeté en peu de temps dans le local, en beaucoup moins de temps que celui nécessaire à la ventilation du local. Le calcul ne tient donc pas compte de la durée de ventilation du local.	
Si le taux de fuite est anormal, mais qu'il se trouve toujours dans une plage mesurable de quelques pourcents par jour, il convient de tenir compte de la ventilation, et un calcul similaire à celui présenté en C.9.2.4.2 peut être effectué.	
V_{comp}	Volume total de gaz du compartiment sous gaz le plus volumineux
V_{room}	Volume total du local
p_{re}	Pression de remplissage
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration de produit de décomposition
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Volume de fuite total
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Volume de fuite du produit de décomposition
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration de produit de décomposition dans le local
$S = y / TWA$	Facteur de sécurité du produit de décomposition

Tableau C.13 – Exemple de calcul d'une fuite anormale

Produit de décomposition		NO ₂
V_{comp}	[m ³]	1
V_{room}	[m ³]	100
p_{re}	[kPa]	150
p_{am}	[kPa]	100
x	[μl/l (ppmv)]	200
V_{tot}	[m ³]	0,5
V_{leak}	[m ³]	0,000 100
y	[μl/l (ppmv)]	1
TWA	[μl/l (ppmv)]	0,5
S		2
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $1 < S \leq 3$: il convient de quitter le local d'appareillage dans les 30 min qui suivent. Si $S > 3$: il convient de quitter le local d'appareillage immédiatement. NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres produits de décomposition.		

C.9.2.4.4 Maintenance, entretien et réparation à l'intérieur des compartiments sous gaz

S'il s'avère nécessaire, il convient de procéder à des opérations de maintenance, d'entretien ou de réparation sur l'appareillage électrique contenant de l'air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé, le gaz peut s'échapper dans l'atmosphère, et les compartiments sous gaz peuvent être ouverts ultérieurement en prenant en considération les mesures de sécurité définies en C.2.2.

Avant d'ouvrir des compartiments sous gaz contenant de l'air comprimé fortement décomposé, il convient de régénérer le gaz en le rejetant dans l'atmosphère par l'intermédiaire de filtres, de vider le compartiment sous gaz avec une pompe à vide par des filtres, puis de le rincer avec l'air ambiant. Lors de l'ouverture du compartiment sous gaz, de faibles concentrations de produits de décomposition peuvent être encore présentes. Ensuite, il convient d'utiliser un matériel et des outils de sécurité (voir le Tableau C.4).

Le Tableau C.14 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations restantes de composants gazeux ou de produits de décomposition dans le compartiment sous gaz après la récupération du gaz. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:

Un appareillage est choisi, dans lequel l'air comprimé est utilisé comme support d'extinction et de l'air comprimé fortement décomposé est présent. Après la récupération complète du gaz, jusqu'à la pression résiduelle p_{res} , et à l'aide de la pompe à vide décrite en C.6.3, le compartiment sous gaz est rempli d'air ambiant et la concentration en produits de décomposition restants à l'intérieur du compartiment sous gaz est calculée.

Si l'air comprimé est rejeté dans l'atmosphère sans l'aide de la pompe à vide, et donc sans remplir le compartiment sous gaz avec l'air ambiant avant l'ouverture, les concentrations de produits de décomposition à l'intérieur du compartiment sous gaz ne varient pas et peuvent être nettement supérieures à leurs valeurs TWA.

p_{res}	Pression résiduelle
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration de produit de décomposition avant récupération
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Concentration restante de composant gazeux ou de produit de décomposition à l'intérieur du compartiment sous gaz après récupération
$S = c / TWA$	Facteur de sécurité du composant ou produit de décomposition gazeux

Tableau C.14 – Exemple de calcul pour la maintenance

Produit de décomposition		NO ₂
p_{res}	[kPa]	0,5
p_{am}	[kPa]	100
x	[µl/l (ppmv)]	200
c	[µl/l (ppmv)]	1
TWA	[µl/l (ppmv)]	0,5
S		2
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $S > 1$: il convient d'éliminer les éventuels produits de décomposition solides du compartiment sous gaz, le cas échéant, et de ventiler suffisamment le compartiment avant de s'en approcher sans protection complète. NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres produits de décomposition.		

C.9.2.4.5 Défaillance d'arc interne et/ou feu extérieur

Le scénario de défaillance le plus défavorable qui peut se produire dans l'appareillage électrique est une défaillance d'arc interne, provoquée par un défaut ou une erreur de l'opérateur, et donnant lieu à un arc entre les phases et/ou entre la phase et la terre tant que l'énergie d'arc n'est pas interrompue par un disjoncteur. Selon le réseau, l'énergie libérée peut être très élevée, donnant lieu à une augmentation de pression massive à l'intérieur du compartiment sous gaz. Pour éviter la fissuration incontrôlée du compartiment sous gaz, les dispositifs limiteurs de pression s'ouvrent après quelques millisecondes, et le plasma produit par l'arc interne est acheminé vers l'extérieur de manière contrôlée. Dans la plupart des cas, des couloirs d'évacuation des gaz sont utilisés pour acheminer le plasma vers des zones dans lesquelles aucun contact direct avec l'opérateur ne peut se produire, ou même vers l'extérieur du bâtiment. Un événement d'arc interne est en général limité à un seul compartiment sous gaz. L'ensemble du gaz fortement décomposé dans le compartiment sous gaz concerné est rejeté. Compte tenu de la température élevée de l'arc électrique (entre 10 000 °C et 20 000 °C), les molécules de gaz se décomposent et forment un plasma. Au fur et à mesure de son refroidissement, le plasma généré à partir du gaz, de métaux évaporés, de matériau isolant brûlé, d'air ambiant et d'humidité se recombine et de nouvelles molécules se forment.

Le feu extérieur est une défaillance majeure qui peut également se produire. En principe, il n'est pas provoqué par l'appareillage lui-même. L'effet dépend dans une large mesure de la mise sous tension ou pas de l'appareillage. S'il ne l'est pas, l'effet est le même que dans le cas décrit en C.9.2.4.3, mais plusieurs compartiments sous gaz peuvent être affectés. La quantité de gaz rejeté et le taux de décomposition sont plus élevés dans le cas d'un feu extérieur. De plus, l'échauffement provoqué par le feu extérieur peut donner lieu à une décomposition du gaz rejeté. Le gaz étant chauffé par la température élevée du feu, il est également probable que les dispositifs limiteurs de pression s'ouvrent et libèrent le gaz contenu. Si l'appareillage est sous tension, l'ouverture d'un compartiment sous gaz en raison d'une surpression thermique provoquée par la chaleur du feu donne lieu à une seconde phase dans un arc interne. Dès lors, les effets du feu et de l'arc interne se superposent.

Que l'appareillage soit sous tension ou pas, la quantité de gaz rejeté et le taux de décomposition sont les plus élevés dans ce scénario. De plus, la pollution dans le local d'appareillage peut être dominée par les produits de décomposition des plastiques qui brûlent ou par les métaux évaporés et oxydés. Une concentration élevée de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone peut être présente. Ces polluants supplémentaires sont indépendants du gaz d'isolation utilisé. Dans un feu extérieur, les matériaux qui brûlent ne sont en principe pas concernés par les défaillances d'arc interne. Il peut s'agir de l'équipement secondaire incluant le câblage, le matériel de protection et de commande et les éléments électroniques. Les matériaux utilisés peuvent générer des produits de décomposition dangereux lorsqu'ils sont brûlés, quel que soit le type d'appareillage et de gaz d'isolation.

À l'inverse des autres scénarios, dans le cas d'un arc interne ou d'un feu, il est vivement recommandé de quitter la zone immédiatement et de ne pas y retourner sans protection individuelle avant qu'elle n'ait été suffisamment ventilée.

C.9.2.4.6 Valeurs TWA des produits de décomposition

Les effets potentiels sur la santé peuvent être estimés en examinant les valeurs TWA des produits de décomposition et leurs concentrations associées dans le local ou la zone à l'intérieur du local dans lequel se trouve le personnel pendant les différents scénarios décrits de C.9.2.4.2 à C.9.2.4.5.

Les valeurs TWA des produits de décomposition sont indiquées dans le Tableau C.11.

Une quantification générale ne peut pas être proposée, compte tenu de la forte dépendance à l'égard de la conception de l'appareillage et des matériaux utilisés. Des produits de décomposition supplémentaires ne peuvent pas être exclus pour la même raison.

Les produits de décomposition avec une faible valeur TWA et une concentration élevée dans le gaz utilisé demandent une attention particulière et des mesures de sécurité appropriées.

C.9.2.5 Conclusion

Les exemples de calculs ci-dessus démontrent qu'une fuite normale de l'appareillage électrique rempli d'air comprimé ne présente aucun risque pour la santé dû à une exposition aux produits de décomposition. Les produits de décomposition formés par l'arc à l'intérieur de l'appareillage électrique atteignent des concentrations négligeables sur le lieu de travail.

En cas de fuite anormale, de maintenance, d'entretien et de réparation limités à un seul compartiment, et si les concentrations de produits de décomposition sont légèrement supérieures à la valeur TWA, il convient de prendre des mesures appropriées (ventilation supplémentaire, diminution des pressions résiduelles, dilution du gaz, protection individuelle, etc.).

Si un défaut interne donne lieu à un rejet soudain d'air comprimé fortement décomposé, des concentrations importantes de produits de décomposition peuvent apparaître dans un local d'appareillage, qu'il est vivement recommandé de quitter immédiatement. Les procédures de sécurité de base, y compris les règles d'évacuation, sont conçues pour exposer le moins longtemps possible le personnel aux matériaux qui se sont échappés. De plus, la ventilation forcée et/ou l'évacuation assurent que les niveaux de concentration peuvent être réduits en quelques minutes. Il est uniquement possible d'entrer de nouveau dans le local d'appareillage sans protection individuelle lorsque la concentration en produits de décomposition est inférieure à la valeur TWA.

Pour les installations extérieures, et quel que soit le type de fuite ou de rejet, le volume d'air dans lequel l'air comprimé fortement décomposé s'échappe est important, les vents dominants et la grande vitesse d'échappement accélérant également la dispersion.

Il est nécessaire d'adapter les procédures de sécurité à chaque installation en tenant compte de tous les aspects susmentionnés.

C.10 Manipulation de l'air comprimé

C.10.1 Généralités

Le domaine d'application du présent article consiste à traiter les particularités de manipulation de l'air comprimé pendant l'installation, la mise en service, après une réparation ou une révision sur site et l'élimination en fin de vie de l'appareillage électrique.

C.10.2 Remplissage de compartiments sous gaz avec de l'air comprimé

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, 4.2, 4.3 ou 4.4 s'applique.

Si une inspection d'étanchéité est réalisée avec des gaz traceurs supplémentaires (de l'hélium, par exemple), la procédure de remplissage ou de complément de remplissage peut être différente de 4.2, 4.3 ou 4.4, et il convient de suivre la procédure donnée dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

C.10.3 Complément de remplissage des compartiments sous gaz avec de l'air comprimé à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la coupure

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, 5.1 s'applique.

C.10.4 Vérification de la qualité de l'air comprimé

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, 5.2 s'applique.

C.10.5 Récupération et régénération des mélanges contenant de l'air comprimé

Sauf spécification contraire dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique, 6.2 ou 6.3 s'applique avec les modifications suivantes:

- au lieu d'être récupéré (voir le Tableau 5, étapes 3 et 4, et le Tableau 6, étapes 3 et 4), l'air comprimé usagé peut être rejeté dans l'atmosphère;
- dans le cas de l'air comprimé très faiblement décomposé et faiblement décomposé, le compartiment sous gaz peut être ouvert dès que la pression ambiante p_{am} est atteinte (les étapes 4 et 5 du Tableau 5 sont ignorées);
- dans le cas de l'air comprimé fortement décomposé, le gaz est rejeté dans l'atmosphère par l'intermédiaire des filtres (voir C.6.2). Pour l'évacuation de la pression résiduelle p_{res} , une pompe à vide est reliée au compartiment sous gaz par l'intermédiaire de filtres (voir C.6.3).

C.11 Spécifications de l'air comprimé nécessaire au remplissage ou au complément de remplissage de l'appareillage électrique

Il convient que l'air comprimé destiné à remplir l'appareillage électrique ou avec lequel le complément de remplissage doit être réalisé satisfasse aux classes de pureté de l'ISO 8573-1 (voir 3.4.1). Il convient que la classe de pureté minimale soit spécifiée par le fabricant de l'appareillage électrique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Annexe D (informative)

Gaz d'origine naturelle

D.1 Propriétés gazeuses

D.1.1 Généralités

Les gaz d'origine naturelle (N_2 , O_2 et CO_2) et leurs mélanges présentent un potentiel de réchauffement climatique compris entre 0 et 1, et leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est nul.

D.1.2 Propriétés chimiques

N_2 , O_2 et CO_2 sont inodores, sans saveur, incolores, non toxiques, ininflammables, stables et inertes (à l'exclusion de l' O_2).

Le Tableau D.1 donne la liste des principales caractéristiques chimiques.

Tableau D.1 – Principales caractéristiques chimiques de N_2 , O_2 et CO_2

Formule chimique	N_2	O_2	CO_2
Numéro CAS ^a	7727-37-9	7782-44-7	124-38-9
Numéro d'enregistrement REACH	-	-	-
Poids moléculaire	28,013 g/mol	31,999 g/mol	44,01 g/mol
Température de décomposition	$\approx 7\,000\text{ °C}$	$\approx 4\,000\text{ °C}$	$> 2\,000\text{ °C}$
^a Le numéro CAS est attribué par le Chemical Abstracts Service, qui possède un registre des informations sur les substances chimiques. Il n'a pas de signification chimique. L'accès aux informations se fait par l'intermédiaire d'un service d'abonnement.			

D.1.3 Propriétés physiques

Dans l'appareillage électrique, la plage de pressions type de N_2 , O_2 et CO_2 est comprise entre 100 kPa et 1 500 kPa. La liquéfaction du N_2 , O_2 et CO_2 n'a pas lieu aux pressions et températures d'exploitation types de l'appareillage électrique. Le Tableau D.2 donne la liste des principales caractéristiques physiques.

Tableau D.2 – Caractéristiques physiques types du N₂, O₂ et CO₂

Formule chimique	N ₂	O ₂	CO ₂
Point d'ébullition à 101,3 kPa	-196 °C	-183 °C	-
Point de congélation à 101,3 kPa	-210 °C	-219 °C	-
Point de sublimation à 101,3 kPa	-	-	-79 °C
Densité du liquide au point d'ébullition	809 kg/m ³	1 141 kg/m ³	-
Densité du gaz à 20 °C et à 100 kPa	1,15 kg/m ³	1,31 kg/m ³	1,82 kg/m ³
Pression de vapeur à 20 °C	-	-	5 730 kPa
Température critique	-147 °C	-119 °C	+31 °C
Pression critique	3 399 kPa	5 043 kPa	7 383 kPa
Densité critique	314 kg/m ³	436 kg/m ³	468 kg/m ³
Potentiel de réchauffement climatique (GWP ₁₀₀)	0	0	1
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	0	0	0

D.1.4 Comportement d'isolation et de commutation

La rigidité diélectrique des gaz d'origine naturelle dépend du rapport de mélange spécifique. La rigidité diélectrique du N₂, O₂ ou CO₂ pur est inférieure à celle de leurs mélanges. Cette rigidité diélectrique est toujours inférieure à celle du SF₆ dans les mêmes conditions. Voir la brochure 730 du CIGRE [12].

Par exemple, la rigidité diélectrique d'un mélange N₂/O₂ est égale à environ 40 % de celle du SF₆ dans les mêmes conditions mais, compte tenu du caractère électronégatif du O₂, elle est considérablement meilleure que celle du N₂ pur. L'O₂ a légèrement tendance à se lier avec des électrons libres formant des ions lourds avec une faible mobilité rendant très difficile le développement d'avalanche d'électrons.

En comparaison avec le SF₆ à la même pression, les mélanges N₂/O₂ sont un support d'extinction d'arc modéré, qui présente toutefois des performances d'extinction d'arc suffisantes pour les opérations de coupure de courant faible (dans les sectionneurs ou les sectionneurs de mise à la terre, par exemple). Lorsqu'un arc électrique se refroidit dans des mélanges N₂/O₂, il reste conducteur à une température relativement basse, réduisant de ce fait le plus possible l'arrachement du courant avant un courant nul et évitant ainsi de fortes surtensions. De meilleures propriétés de support d'extinction d'arc peuvent être obtenues si des mélanges CO₂/O₂ sont utilisés [16] [17] [18].

Si du CO₂ ou un mélange CO₂/N₂ est utilisé comme gaz pour la coupure, un petit pourcentage de O₂ peut être ajouté, comme cela est spécifié par le fabricant de l'appareillage électrique, afin de réduire la possibilité de formation de suie. La formation de suie peut se produire en raison de la séparation des atomes de CO₂ à l'intérieur de l'arc électrique ou à partir de l'ablation de la buse ou d'autres matériaux plastiques au voisinage de l'arc.

D.2 Sécurité et premiers soins

D.2.1 Généralités

Avant de commencer tout travail de maintenance/service sur un appareillage électrique, il convient d'effectuer et de documenter une inspection détaillée de l'état de l'appareillage électrique. Outre les règlements locaux de sécurité, il convient de respecter au moins les règles de sécurité générales suivantes:

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

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

Le Tableau D.3 donne la liste des principaux points à surveiller en cas d'utilisation d'un appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle.

Tableau D.3 – Mesures à appliquer lors de l'utilisation de l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle

Élément	Travail au voisinage de l'appareillage électrique (exploitation de l'appareillage électrique, contrôle visuel, nettoyage du local)	Remplissage, complément de remplissage, récupération, évacuation des compartiments sous gaz	Ouverture des compartiments sous gaz, travail sur des compartiments sous gaz ouverts
Fiches techniques de sécurité/manuels d'exploitation des matériaux	Applicable	Applicable	Applicable
Formation	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Appareil de manipulation du gaz	Non exigé	Applicable ^b	Uniquement pour les gaz d'origine naturelle fortement décomposés
Matériel de nettoyage/neutralisation	Non exigé	Non exigé	Uniquement pour les gaz d'origine naturelle fortement décomposés
Équipement individuel de protection	Non exigé ^c	Uniquement pour les gaz d'origine naturelle fortement décomposés ^c	Uniquement pour les gaz d'origine naturelle fortement décomposés ^c
^a Il convient de spécifier les informations générales en fonction du type de travail et d'installation, en fonction des règlements locaux de sécurité. ^b Les gaz d'origine naturelle utilisés peuvent être rejetés dans l'atmosphère éventuellement par l'intermédiaire de filtres adaptés tant que la pression ambiante n'a pas été atteinte (il convient de prendre en considération les règlements locaux). Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifie les filtres adaptés. Aucune évacuation du compartiment sous gaz n'est exigée pour les gaz d'origine naturelle très faiblement ou faiblement décomposés. En cas de rejet d'un mélange de gaz avec une faible concentration en O₂ à l'intérieur d'un local d'appareillage, il convient de tenir compte du risque d'asphyxie. ^c Les règlements locaux peuvent exiger de porter des chaussures de sécurité, un casque et des lunettes de protection pour s'approcher de l'appareillage			

Il convient d'afficher une note d'instructions relatives aux premiers soins (voir D.2.8) en tout lieu où des gaz d'origine naturelle sont manipulés.

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

- utilise des outils et des appareils de manipulation adaptés;
- porte des vêtements de protection appropriés (voir D.2.5);
- observe une hygiène personnelle très stricte;
- se lave ainsi que ses appareils de manipulation, en utilisant des matériaux jetables, avant de quitter la zone de travail;
- retire les vêtements de protection et les lave soigneusement dès que possible après avoir quitté la zone de travail;
- assure que les vêtements, les outils et les éléments ayant été en contact avec des produits de décomposition soient emballés en toute sécurité dans des sacs scellés ou d'autres récipients scellés et soient ensuite traités pour neutraliser tous les résidus.

D.2.2 Protection du personnel

Il convient que le personnel qui manipule des gaz d'origine naturelle se conforme strictement aux instructions de sécurité données dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage. En cas de rejet d'un mélange de gaz avec une faible concentration en O₂ à l'intérieur d'un local d'appareillage, il convient de tenir compte du risque d'asphyxie. Il convient de se conformer strictement au manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique.

Le Tableau D.4 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel et des outils de sécurité exigés lors de l'ouverture ou de l'accès à un compartiment sous gaz. Aucune différence substantielle entre les conditions d'entrée et de sortie n'est indiquée lorsque l'opérateur ouvre le compartiment sous gaz ou y accède.

Tableau D.4 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments sous gaz

		Risque potentiel	Mesures de sécurité	Matériel et outils de sécurité
Gaz d'origine naturelle très faiblement et faiblement décomposés	Gaz d'origine naturelle fortement décomposés	Fumées ou substances de nettoyage	Ventilation	Ventilateur d'aspiration
		Asphyxie (pour les compartiments sous gaz dont la concentration en O ₂ est inférieure à 16 %)	Ventilation Mesurage de la concentration en O ₂ avant d'entrer, avec la valeur minimale exigée pour l'entrée = 16 %. Port d'équipement individuel de protection	Ventilateur d'aspiration Dispositif de mesure de la concentration en O ₂ Appareil respiratoire autonome
		Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilation Port d'équipement individuel de protection Mesurage de la concentration en produits de décomposition gazeux réactifs résiduels	Ventilateur d'aspiration Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome (de préférence) ou au moins masque de protection respiratoire (filtre)
		Produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs	Élimination des produits de décomposition solides et matériaux des absorbeurs Port d'équipement individuel de protection Protection des produits de décomposition solides contre l'hydrolyse	Aspirateur Tenue de protection à usage unique, chaussure de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral et appareil respiratoire autonome (de préférence) ou au moins masque de protection respiratoire Lunettes de sécurité Protection de l'environnement contre la pluie ou le vent

Une concentration supérieure à 84 % de N₂ dans l'atmosphère constitue un risque potentiel d'asphyxie. Ceci est dû au fait qu'il diminue la concentration en O₂ à moins de 16 %, constituant le seuil d'asphyxie généralement admis. Il convient donc de mesurer la concentration en O₂ dans le compartiment sous gaz après la ventilation et avant d'y accéder. De plus, en présence d'un volume important de gaz d'origine naturelle à l'intérieur de l'appareillage électrique, il convient de vérifier la concentration en O₂ dans l'environnement ambiant en cas de travail dans des espaces confinés. De même, il convient de vérifier la concentration dans les mélanges de CO₂, car une concentration supérieure à 10 % de CO₂ dans l'atmosphère est considérée comme présentant un risque potentiel de mort subite. La valeur TWA du CO₂ est 5 000 µl/l (ppmv).

Il est interdit de manger, de boire et de fumer en cas d'accès à un compartiment sous gaz ayant contenu des gaz d'origine naturelle fortement décomposés. Il convient de changer de vêtements et de se laver la peau dès que possible après le travail de manière à éviter tout danger potentiel d'irritation ou de brûlure.

Les concentrations en CO₂ supérieures à la valeur TWA peuvent provoquer une insuffisance circulatoire, des maux de tête, des nausées et des vomissements, ce qui peut donner lieu à une perte de conscience ou à la mort même si la concentration en O₂ est maintenue à 21 %.

En cas de fuite de gaz et étant donné que le CO_2 est plus lourd que l'air, il peut s'accumuler dans les lieux clos, en particulier s'ils se trouvent au-dessous du niveau du sol, et ainsi provoquer également l'asphyxie.

Les concentrations en O_2 comprises entre 16 % et 50 % ne présentent aucun risque. Sous 16 %, il existe un risque d'asphyxie. 21 % de O_2 est la valeur optimale pour les êtres humains. Des concentrations en O_2 plus élevées, en particulier pendant une période prolongée, peuvent s'avérer dangereuses, et il convient de les réserver aux consultations médicales.

Des concentrations en O_2 supérieures à 22 % peuvent accroître l'inflammabilité des matériaux environnants.

D.2.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés

Le matériel et les outils de sécurité non réutilisables ayant été en contact avec des produits de décomposition solides ou des matériaux des absorbeurs sont considérés comme étant contaminés. Ils sont récupérés ultérieurement et placés dans des sacs en plastique. Les sacs en plastique sont scellés avec un ruban adhésif et étiquetés. Leur élimination est effectuée conformément aux règlements locaux.

Il convient de nettoyer le matériel et les outils de sécurité réutilisables, par exemple en les lavant et en les neutralisant dans une solution eau/soude avec 10 % en poids de soude liquide ou équivalent, puis en les rinçant à l'eau claire. Des temps de neutralisation identiques à ceux indiquées dans l'IEC 60480:2019, Tableau 11 peuvent être utilisées.

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

D.2.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression

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

Tous les matériels et outils utilisés lors de la manipulation des gaz d'origine naturelle sont susceptibles de contenir des gaz d'origine naturelle sous haute pression. Il convient de les manipuler avec soin.

D.2.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel

L'utilisation d'équipement de sécurité et de protection du personnel n'est pas liée à la présence de l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle eux-mêmes. Pour accéder au voisinage de l'appareillage, des chaussures de sécurité, un casque et des lunettes de protection peuvent être exigés en fonction des règlements locaux.

En cas de rejet soudain de gaz d'origine naturelle fortement décomposés (dû à un feu extérieur ou à un défaut d'arc interne, par exemple), des règles de sécurité supplémentaires s'appliquent pour pénétrer dans un local d'appareillage, conformément à D.2.7.

Il convient que les manuels d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifient l'équipement de protection exigé.

Pour manipuler des gaz d'origine naturelle très faiblement ou faiblement décomposés, peu ou pas d'équipement de sécurité et de protection du personnel (voir ci-dessous) n'est nécessaire selon la conception de l'appareillage électrique et les règlements locaux. Il convient que le

manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique spécifie l'équipement de protection exigé.

Selon le type de travail à exécuter sur le site et conformément au Tableau D.4, les travailleurs impliqués dans la manipulation des gaz d'origine naturelle fortement décomposés sont dotés de l'équipement de sécurité et de protection individuelle suivant:

- gants de protection: gants adaptés, résistants aux acides, par exemple en néoprène, en PVC ou en caoutchouc;
- lunettes de protection: lunettes industrielles de type chimique selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 166 [3]);
- masque de protection respiratoire: à utiliser en même temps que les gants de protection, le masque de protection respiratoire aide à protéger la bouche et le nez contre la poussière, et il convient de l'utiliser en cas d'exposition à des zones peu poussiéreuses seulement;
- masque facial intégral/demi-masque: pour une inspection de courte durée et un travail où une ventilation peut être assurée, mais où la concentration en produits de décomposition peut dépasser le niveau maximal approprié, il convient d'utiliser un masque facial avec filtre à charbon actif remplaçable conformément aux règlements locaux (par exemple, les Normes européennes EN 140 [4], EN 14387 [5] et EN 143 [6] spécifient respectivement des masques, filtres à gaz et filtres à particules. Des filtres combinés de type A2/A2/B2/E2/K2/P3 ou A3/B3/E3/K3/P3 fabriqués selon ces normes sont disponibles, en présence des produits de décomposition du No_x et du CO le filtre combiné peut également présenter un avantage);
- tenue de protection à usage unique: vêtements de protection antipoussière à porter au-dessus des vêtements normaux, couvre-chaussures, protection capillaire, tenue jetable à capuche de qualité industrielle sans poches, non perméable (par exemple, en polypropylène lié) comportant des serrages de chevilles et de poignets couvrant les chaussures et les gants;
- appareil respiratoire autonome (respirateur): lors de l'entrée et/ou des manœuvres dans des applications intérieures après une fuite anormale ou un rejet soudain dû à un arc interne, lorsque la concentration en CO_2 ou que la teneur en produits de décomposition dépasse les valeurs TWA (voir D.9.2.4.6); un respirateur est utilisé selon les règlements locaux (par exemple, la Norme européenne EN 136 [7]);
- pour les mélanges de gaz d'origine naturelle contenant moins de 16 % de O_2 : dispositif de mesure de la concentration en O_2 pour surveiller en permanence la concentration en O_2 dans l'environnement;
- dispositif de mesure de la concentration en CO_2 ;
- appareil de mesure du CO portatif pour mesurer la concentration en CO ;
- protection de l'environnement pour les emplacements de travail à l'extérieur: abris temporaires pour empêcher la pénétration de pluie et la dispersion par le vent de produits de décomposition solides (le cas échéant) lorsque le compartiment sous gaz est ouvert;
- aspirateur: aspirateur spécifique à haut rendement équipé d'un filtre capable de piégeage selon la classe de poussières H (risque élevé). Les classes de poussières sont spécifiées à l'Annexe AA de l'IEC 60335-2-69:2021;
- ventilateur d'aspiration: matériel permettant de forcer la ventilation d'espaces fermés et d'autres zones inaccessibles. Ce matériel peut être portable ou installé de façon permanente, en fonction de la taille de l'installation.

D.2.6 Équipements et services

Lorsque les compartiments sous gaz qui contiennent des gaz d'origine naturelle fortement décomposés sont ouverts (après la récupération des gaz d'origine naturelle), il convient de mettre à la disposition des travailleurs des équipements de lavage appropriés, et une réserve d'eau pour préparer des solutions de nettoyage.

D.2.7 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet soudain de gaz d'origine naturelle

En cas de rejet soudain de gaz d'origine naturelle dû à un arc interne ou à un feu extérieur, il convient d'évacuer immédiatement les locaux concernés.

Après avoir ventilé les locaux et vérifié la présence possible de produits de décomposition toxiques, seul le personnel formé et qualifié est autorisé à entrer de nouveau et à nettoyer le local d'appareillage ou à accéder à l'appareillage électrique.

Le Tableau D.4 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel et des outils de sécurité exigés.

NOTE Les pompiers peuvent entrer dans le local d'appareillage selon les termes décrits dans les règlements locaux.

Les mêmes règles s'appliquent aux zones situées au-dessous du niveau du sol auquel le rejet s'est produit et qui sont mal ventilées ou non ventilées (par exemple, tranchées de câbles, puits d'inspection, systèmes de drainage). La durée de ventilation exigée dépend du type et de la quantité de gaz rejeté. Si le risque d'asphyxie ne peut pas être négligé, il convient d'installer une ventilation forcée temporaire.

Il convient qu'une deuxième personne en contact visuel et audible permanent soit présente lors de la pénétration dans des zones pouvant présenter une faible concentration en O₂ et/ou une forte concentration en produits de décomposition.

Le matériel extérieur nécessite d'appliquer des mesures normalisées pour conditions extérieures (par exemple, protection contre la pluie, protection contre le vent).

D.2.8 Équipements et traitement de premiers soins

D.2.8.1 Généralités

L'équipement de premiers soins comporte:

- l'équipement industriel normal de premiers soins incluant un équipement de lavage des yeux contenant une solution saline;
- pour les gaz d'origine naturelle fortement décomposés, si des substances fluorées décomposées peuvent être présentes (PTFE, par exemple) à l'intérieur de l'appareillage électrique: gel de gluconate de calcium (gel antidote du HF);
- un moyen pour entrer en contact avec les services de secours;
- des recommandations de médecins.

Il convient que l'application des règles générales de sécurité (voir D.2.1) réduise le plus possible la probabilité d'accident. En cas d'accident, il convient d'appliquer un traitement de premiers soins comme cela est décrit dans les articles suivants.

D.2.8.2 Irritation de la peau

En cas de signes d'irritation de la peau après un contact avec des gaz d'origine naturelle fortement décomposés, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Les vêtements contaminés sont retirés et la partie affectée est lavée à l'eau courante fraîche. S'il existe un risque de substances fluorées fortement décomposées: appliquer du gel de gluconate de calcium après avoir retiré l'acide fluorhydrique sur la peau. Il convient de rechercher les conseils de médecins.

D.2.8.3 Irritation des yeux

En cas de signes d'irritation des yeux après un contact avec des gaz d'origine naturelle fortement décomposés, il convient que tout le personnel quitte immédiatement la zone concernée et se dirige vers de l'air frais. Une irrigation de l'œil ou des yeux est effectuée immédiatement et sans interruption jusqu'à ce qu'un médecin conseille au patient de l'interrompre.

D.2.8.4 Difficultés respiratoires

Il convient que l'ensemble du personnel évacue immédiatement la zone concernée contenant des gaz d'origine naturelle fortement décomposés et se dirige vers de l'air frais. Il convient d'enlever les vêtements contaminés portés par une personne ayant des difficultés respiratoires et de couvrir cette personne d'une couverture en la maintenant au calme et en observation continue. Il convient de rechercher une assistance médicale d'urgence sans tarder. Si le patient arrête de respirer, il convient qu'un personnel formé et qualifié commence immédiatement à pratiquer la respiration artificielle. Un défibrillateur externe automatique peut être utilisé conformément aux règlements locaux.

D.3 Impact sur l'environnement

D.3.1 Généralités

Toute activité humaine a un effet sur l'environnement. L'impact d'une activité particulière dépend de son importance sur les matériaux impliqués. Les activités dans lesquelles des gaz sont produits ou utilisés peuvent provoquer des rejets vers l'atmosphère. Trois aspects principaux sont pris en considération:

- l'écotoxicologie: matériaux et gaz toxiques ayant un effet sur l'environnement et toutes les formes de vie;
- l'appauvrissement en ozone: augmentation des dimensions des trous dans la couche d'ozone stratosphérique;
- le réchauffement de la planète/changement climatique: augmentation de l'effet de serre.

D.3.2 Écotoxicologie

D.3.2.1 Définition

L'écotoxicologie est définie comme "la branche de toxicologie consacrée à l'étude des effets toxiques provoqués par les polluants d'origine naturelle ou synthétique sur les constituants des écosystèmes, les animaux (y compris les êtres humains), les végétaux et les microorganismes, dans un contexte intégré".

D.3.2.2 Toxicologie

Respirer de l'O₂ à des pressions partielles inférieures à 50 kPa n'a pas d'effet toxique sur l'organisme humain [19]. Quoi qu'il en soit, les concentrations en O₂ supérieure à 22 % peuvent accroître l'inflammabilité des matériaux environnants ; elles ne sont pas utilisées dans les appareillages électriques. Par conséquent, aucune toxicité de l'oxygène ne peut se produire.

La valeur TWA de CO₂ est de 5 000 µl/l (ppmv). Respirer de l'air dont la concentration en CO₂ est supérieure à 10 %, est réputé représenter un potentiel risque de mort subite. Il convient de ne pas pénétrer dans des locaux et des zones qui contiennent des concentrations en CO₂ supérieures à la valeur TWA sans une ventilation adéquate ni équipement individuel de protection.

D.3.2.3 Toxologie environnementale

Les gaz d'origine naturelle sont les principaux gaz de notre écosystème et sont donc inoffensifs pour lui. Les gaz d'origine naturelle ne présentent aucun risque signalé d'écotoxicité aiguë ou chronique. Ils ne présentent aucun danger pour l'eau de surface et la nappe phréatique ou pour le sol. L'accumulation biologique dans le cycle de nutrition n'a aucun impact. De plus, les gaz d'origine naturelle sont:

- non cancérigène: il ne provoque pas de cancer;
- non mutagène: il n'endommage pas la constitution génétique;
- non nitrifiant: il n'enrichit pas la chaîne alimentaire.

Les gaz d'origine naturelle ne doivent pas être manipulés dans un cycle fermé, afin d'éviter tout rejet volontaire dans l'environnement. Si cela est pertinent, la récupération et la réutilisation du gaz ne sont pas nécessaires, car les gaz usagés peuvent être rejetés dans l'atmosphère, éventuellement par l'intermédiaire de filtres, et remplacés par de nouveaux gaz d'origine naturelle soit depuis des récipients prévus à cet effet soit des dispositifs de remplissage. (voir D.10.5).

Les pertes de gaz ne doivent pas être consignées, et aucune contrainte légale particulière ne s'applique à l'utilisation de gaz d'origine naturelle dans l'appareillage électrique.

D.3.3 Appauvrissement en ozone

Les gaz d'origine naturelle et ses produits de décomposition ne contiennent ni chlore, ni brome et ne nuisent donc pas à la couche d'ozone stratosphérique.

D.3.4 Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)

Les gaz d'origine naturelle ne contribuent que très peu à l'effet de serre et présentent un potentiel de réchauffement climatique compris entre zéro et un. Le potentiel de réchauffement climatique du CO₂ est défini sur 1. L'impact sur le réchauffement mondial du CO₂ utilisé dans l'appareillage électrique est négligeable en raison des très faibles quantités utilisées, même s'il est rejeté dans l'atmosphère.

D.3.5 Impact des produits de décomposition sur l'environnement

Des défaillances majeures provoquant un rejet de gaz d'origine naturelle fortement décomposés sont rares. Les quantités rejetées dans de tels cas extrêmes sont limitées en raison du fait que la conception normalisée des produits est compartimentée, limitant le défaut à l'emplacement dont il provient. Les quantités de gaz concernées sont donc de petites fractions de la quantité totale de gaz contenu dans un appareillage électrique.

Les produits de décomposition peuvent être convertis en produits neutres. Les procédures permettant leur traitement, leur manipulation et leur élimination assurent qu'ils ont un impact négligeable sur l'environnement.

D.4 Formation et certification

D.4.1 Généralités

Les gaz d'origine naturelle très faiblement ou faiblement décomposés n'ont aucun impact négatif sur l'environnement. Par conséquent, les aspects de sécurité fonctionnelle et d'environnement pour l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle ne sont pas étroitement liés et ne doivent donc pas être traités en même temps.

Il convient d'assurer la sécurité fonctionnelle pendant une intervention sur un appareillage électrique nécessitant la manipulation de gaz (par exemple, mise au point, fabrication, essai, mise en place, mise en service, maintenance, réparation, entretien et démontage en fin de vie) en suivant les instructions de sécurité indiquées dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique. En particulier, il convient de décrire les mesures de sécurité en matière de manipulation de systèmes sous pression.

Pour un fonctionnement sûr, en particulier lorsque du gaz fortement décomposé doit être manipulé, une option complémentaire consiste à former le personnel dans le cadre de formations qui peuvent être suivies, par exemple, dans un centre spécial de formation de l'utilisateur, en usine ou sur le site lors de la mise en place, la mise en service et la maintenance de l'appareillage électrique installé. En fonction des tâches que doit réaliser le personnel formé, la formation peut être choisie de manière à couvrir différents domaines d'application allant, par exemple, de la simple formation de base à la formation approfondie. Il convient que la formation concerne une conception spécifique (par exemple, disjoncteur à cuve sous haute tension, appareillage moyenne tension, appareillage à haute tension isolé au gaz), des conceptions différentes exigeant des formations différentes.

Dans tous les cas, il convient de fonder la formation sur les règlements locaux, les manuels d'instructions d'exploitation de l'appareillage électrique, les manuels d'instructions d'exploitation de l'appareil de manipulation, les fiches techniques de sécurité (SDS), les fiches techniques des matériels, les normes internationales, les brochures du CIGRE et les paragraphes de l'Annexe D.

D.4.2 Formation

Il convient que les travailleurs manipulant des gaz d'origine naturelle soient habitués aux aspects de sécurité, de réglementation et d'environnement, aux propriétés des gaz, aux outils et matériels de manipulation de gaz et aux procédures permettant de garantir la continuité du service et de réduire le plus possible les émissions. Des formations particulières pour la manipulation du gaz d'origine naturelle peuvent être proposées par les fabricants d'appareillage électrique, car le type d'appareillage électrique et les mélanges de gaz peuvent être différents.

Les différents aspects que doit couvrir une formation peuvent être les suivants:

- sécurité et premiers soins (voir l'Article D.2), en particulier:
 - règlements locaux, plans d'urgence et instructions, par exemple en cas d'asphyxie, de défauts d'arc interne;
 - matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel;
 - matériel de sécurité exigé pour travailler sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche;
 - matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel, travaillant sur des compartiments sous gaz ouverts en relation avec la tâche, neutralisation et manipulation des produits de décomposition;
- connaissance de base des questions liées à l'environnement;
- caractéristiques physiques, chimiques, isolantes et de commutation des gaz d'origine naturelle;

- utilisation des gaz d'origine naturelle dans les appareillages électriques (isolation, commutation);
- existence de règlements locaux et de normes internationales en relation avec la tâche;
- manipulation des gaz d'origine naturelle, dangers et caractéristiques pour la santé;
- conception de l'appareillage électrique (propriétés et applications/fonctionnalités);
- vérification de la qualité des gaz d'origine naturelle;
- les manuels d'instructions d'exploitation donnés par le fabricant de l'appareillage électrique en relation avec les tâches;
- types de compartiments sous gaz remplis de gaz d'origine naturelle;
- instruments et procédures pour vérifier la qualité des gaz d'origine naturelle;
- procédures de manipulation des gaz d'origine naturelle:
 - complément de remplissage des systèmes à pression autonomes;
 - évacuation de l'air, remplissage de gaz et complément de remplissage;
 - récupération et régénération des gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés, faiblement décomposés et fortement décomposés; manipulation, neutralisation et élimination des produits de décomposition, manipulation des matériels et outils de sécurité qui ont été en contact avec des produits de décomposition solides;
- méthodes de détection des fuites et techniques de réparation;
- catégories des gaz d'origine naturelle (voir 3.5);
- stockage et transport de CO₂, O₂, N₂ et/ou de leurs mélanges (voir l'Article D.5);
- appareils de manipulation des gaz d'origine naturelle en relation avec les tâches (voir l'Article D.6);
- procédures pour pénétrer dans le local d'appareillage en cas de fuite anormale et/ou de rejet soudain de gaz d'origine naturelle du(e) à un feu ou un défaut d'arc interne (voir D.2.7);
- démontage de l'appareillage électrique et tri des pièces (voir l'Article 7);
- fonctionnement du système de perçage étanche, si nécessaire (voir 7.4).

D.4.3 Certification

Réussite complète à la formation conduisant à une certification maison, dans laquelle "certification maison" signifie un certificat de compétence ou autre confirmation écrite, délivré par un employeur à l'un de ses propres employés ou à des personnes externes ayant terminé avec succès un cours de formation relatif au travail correspondant. Des sessions d'examens théoriques et pratiques sont organisées pour prouver la compétence et l'aptitude obtenues. Toutefois, toute certification exigée par les règlements locaux prévaut sur le présent document.

Il convient de conserver des archives suivantes:

- le contenu de la formation;
- la date à laquelle la formation a été effectuée.

La limitation des tâches à exécuter au personnel qui a obtenu une certification pour les niveaux de compétence respectifs et maintien d'un haut niveau d'expertise.

D.5 Stockage et transport

D.5.1 Généralités

Il convient de toujours stocker et transporter les gaz d'origine naturelle, soit dans des récipients, soit dans un appareillage électrique, conformément aux règlements locaux et internationaux.

D.5.2 Stockage des récipients remplis de gaz d'origine naturelle

En règle générale, les gaz d'origine naturelle sont stockés à l'état gazeux à des pressions atteignant 30 000 kPa, en fonction du mélange individuel. Le stockage gazeux présente l'avantage de réduire les temps de remplissage par rapport au stockage liquide. Pour la manipulation de volumes de gaz plus importants, la génération sur site de gaz d'origine naturelle, par exemple à l'aide d'appareils de mélange et de remplissage de gaz prévus à cet effet (voir D.6.16), est un autre moyen d'alimentation en gaz. Pour les mélanges avec du CO₂, il est important de savoir qu'à 20 °C, le stockage gazeux pur de CO₂ est possible à une pression atteignant environ 5 700 kPa. Il convient d'en tenir compte lors du stockage de gaz d'origine naturelle avec du CO₂ à des pressions élevées, car la liquéfaction partielle du CO₂ peut se produire, faisant de ce fait varier le rapport de mélange dans la phase gazeuse restante.

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

Il convient que les récipients qui contiennent des gaz oxydants (plus de 22 % d'O₂, par exemple) soient maintenus à plusieurs mètres au moins des récipients qui contiennent des gaz inflammables ou qu'ils soient séparés par un écran incombustible d'une hauteur minimale et d'une durée minimale de résistance au feu, conformément aux règlements locaux. Il convient que les récipients soient rechargeables et clairement étiquetés pour identifier leur contenu.

Lorsque des échantillons de gaz d'origine naturelle usagés sont stockés pour procéder à une analyse du gaz hors site, il convient que les récipients de stockage satisfassent aux règlements locaux et internationaux concernant les récipients sous pression. Il convient également que l'étiquetage du récipient satisfasse aux règlements locaux et internationaux.

Le Tableau D.5 donne des exemples de récipients types. Dès que possible, il est recommandé d'utiliser des récipients de stockage transportables pour des raisons pratiques.

Tableau D.5 – Exemples de types de récipients exigés pour le stockage et le transport de gaz d'origine naturelle

Gaz	Caractéristique	Type de récipient
Gaz d'origine naturelle de qualité technique ^a	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8]. (N ₂ – noir; CO ₂ – gris; O ₂ – blanc).
Gaz d'origine naturelle usagés	Gaz comprimé	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa.
CO ₂ usagé	Gazeux ou gaz liquéfié	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8], et, tout particulièrement, de les marquer afin d'éviter toute confusion entre le CO ₂ usagé ou de qualité technique.
Mélange usagé avec teneur en CO ₂	Gazeux ou gaz liquéfié	Convient pour des gaz comprimés jusqu'à une pression de 30 000 kPa. Recommandation: Il convient de peindre les récipients conformément aux règlements locaux, par exemple l'EN 1089-3 [8] et, tout particulièrement, de les marquer afin d'éviter toute confusion entre les mélanges de CO ₂ usagé ou de qualité technique.
^a Éviter toute contamination des récipients spécifiques aux gaz d'origine naturelle.		

D.5.3 Transport des récipients remplis de gaz d'origine naturelle

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

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

Les règlements internationaux applicables au transport des gaz d'origine naturelle, dont la teneur en O₂ est inférieure à 22 %, sont résumés dans le Tableau D.6.

La numérotation UN, la classification, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport pour les gaz d'origine naturelle fortement et/ou faiblement décomposés peuvent dépendre de la conception et de l'emploi de l'appareillage électrique. Il convient de les définir dans la fiche technique de sécurité du fabricant de l'appareillage électrique.

NOTE De plus amples informations sur la numérotation UN, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport sont données en [20].

Tableau D.6 – Règlements internationaux applicables au transport de gaz d'origine naturelle

Fluide/gaz	Caractéristique	Classe	Classification finale ^{a, b}	Document de transport ^a
Gaz d'origine naturelle de qualité technique dépourvus de CO ₂ liquifié et Gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés dépourvus de CO ₂ liquifié	Gaz comprimé	1A	UN 1956 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. 2.2	UN 1956 GAZ COMPRIMÉ N.S.A. (azote et/ou oxygène et/ou dioxyde de carbone) 2.2
Gaz d'origine naturelle de qualité technique contenant du CO ₂ liquifié et Gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés contenant du CO ₂ liquifié	Gaz liquéfié	2A	UN 1058 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 1058 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (azote et/ou oxygène, dioxyde de carbone) 2.2
Gaz d'origine naturelle faiblement décomposés, contenant du CO ₂ liquifié ^c	Gaz liquéfié	2A	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. 2.2	UN 3163 GAZ LIQUÉFIÉ N.S.A. (azote et/ou oxygène, dioxyde de carbone) 2.2
Gaz d'origine naturelle fortement décomposés, contenant du CO ₂ liquifié ^d	Gaz liquéfié toxique ^e	2T	UN 3162 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE N.S.A. 2.3	UN 3162 GAZ LIQUÉFIÉ TOXIQUE N.S.A. (azote et/ou oxygène, dioxyde de carbone, fluorure d'hydrogène et monoxyde de carbone) 2.3
^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies [20]. ^b Numéro d'identification des dangers (par exemple, H280) sont énumérés dans la fiche technique de sécurité du fabricant de l'appareillage électrique. ^c Gaz d'origine naturelle qui contiennent une faible quantité de produits de décomposition et dont la valeur LC50 est > 5 000 µl/l (ppmv). ^d Gaz d'origine naturelle qui contiennent une grande quantité de produits de décomposition (généralement après un défaut d'arc interne, un défaut d'interruption ou un dernier chiffre de fonctionnement de la coupure en court-circuit) et dont la valeur LC50 est < 5 000 µl/l (ppmv). ^e Conformément aux règlements UN pour le transport, un gaz est classé "toxique" lorsque sa valeur LC50 est < 5 000 µl/l (ppmv). N.S.A.: "Non Spécifié par Ailleurs".				

D.5.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle

Il convient de stocker et de transporter les appareillages électriques remplis de gaz d'origine naturelle conformément aux règlements locaux et internationaux.

Des règlements internationaux relatifs au transport sont disponibles pour le transport routier (ADR), ferroviaire (RID), maritime (code IDMG) et aérien (IATA – DGR). Ils sont similaires en ce qui concerne la numérotation UN, la classification, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport.

Conformément aux codes de transport ADR, RID et IATA, il convient que la pression de remplissage ne dépasse pas 200 kPa (relative) à 20 °C.

D.5.5 Responsabilités

Le propriétaire de l'appareillage électrique utilisant des gaz d'origine naturelle est responsable de la bonne utilisation, du transport et de l'élimination de l'appareillage électrique et du gaz. Il n'est pas exigé de consigner les informations relatives aux gaz d'origine naturelle contenus

D.6 Description des appareils de manipulation

D.6.1 Généralités

D.6.1.1 Présentation

La présente partie de l'annexe donne des informations relatives aux appareils de manipulation qui peuvent être exigés pour manipuler des gaz d'origine naturelle. Ces appareils de manipulation sont exigés lors de l'élaboration des essais, de la fabrication, de l'installation, de l'entretien, de la réparation et du traitement de fin de vie. Certains des appareils de manipulation peuvent également être utilisés par l'utilisateur final de l'appareillage électrique.

Il convient de choisir le type et la taille appropriés de l'appareil de manipulation en fonction de la quantité de gaz d'origine naturelle à manipuler. La Figure D.1 représente l'aménagement fonctionnel de base. Les fonctions types sont les suivantes:

- évacuation de l'air du compartiment sous gaz;
- préparation des mélanges de gaz;
- remplissage de gaz d'origine naturelle dans le compartiment sous gaz;
- récupération des gaz d'origine naturelle du compartiment sous gaz;
- stockage des gaz d'origine naturelle;
- rejet contrôlé de gaz d'origine naturelle du compartiment sous gaz dans l'atmosphère;
- élimination de polluants;
- remplissage du compartiment sous gaz avec l'air ambiant;
- transfert de récipient à récipient.

Selon la conception de l'appareillage électrique, tous les appareils de manipulation répertoriés figurant dans la liste peuvent ne pas être disponibles et/ou exigés. Il s'agit dans une plus large mesure d'un aperçu théorique des solutions techniques possibles.

Les appareils de manipulation suivants sont écrits ci-après:

- pompe à vide;
- compresseur principal, compresseur de sortie et compresseur à vide;
- unité de mélange de gaz;
- unité de récupération de gaz;
- dispositifs de stockage et de transport du gaz usagé;
- dispositifs de mesure du gaz;
- détecteurs de fuite de gaz;

- appareil d'essai de fuite de gaz;
- bouteilles d'échantillonnage de gaz;
- détecteurs du système d'alarme.

Certains des appareils de manipulation ci-dessus peuvent être combinés pour effectuer des tâches spécifiques.

En fonction des concentrations en CO₂ et/ou O₂, de la quantité de gaz d'origine naturelle et du site d'installation du compartiment sous gaz (zones intérieures confinées ou zones extérieures, par exemple), il convient de récupérer les gaz d'origine naturelle ou de pouvoir les rejeter dans l'atmosphère (voir D.2.2).

En cas de récupération ou de rejet dans l'atmosphère des gaz d'origine naturelle fortement décomposés, des filtres peuvent être utilisés pour absorber les éventuels produits de décomposition qu'ils peuvent contenir. Il convient d'éviter tout rejet de gaz d'origine naturelle fortement décomposés en intérieur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

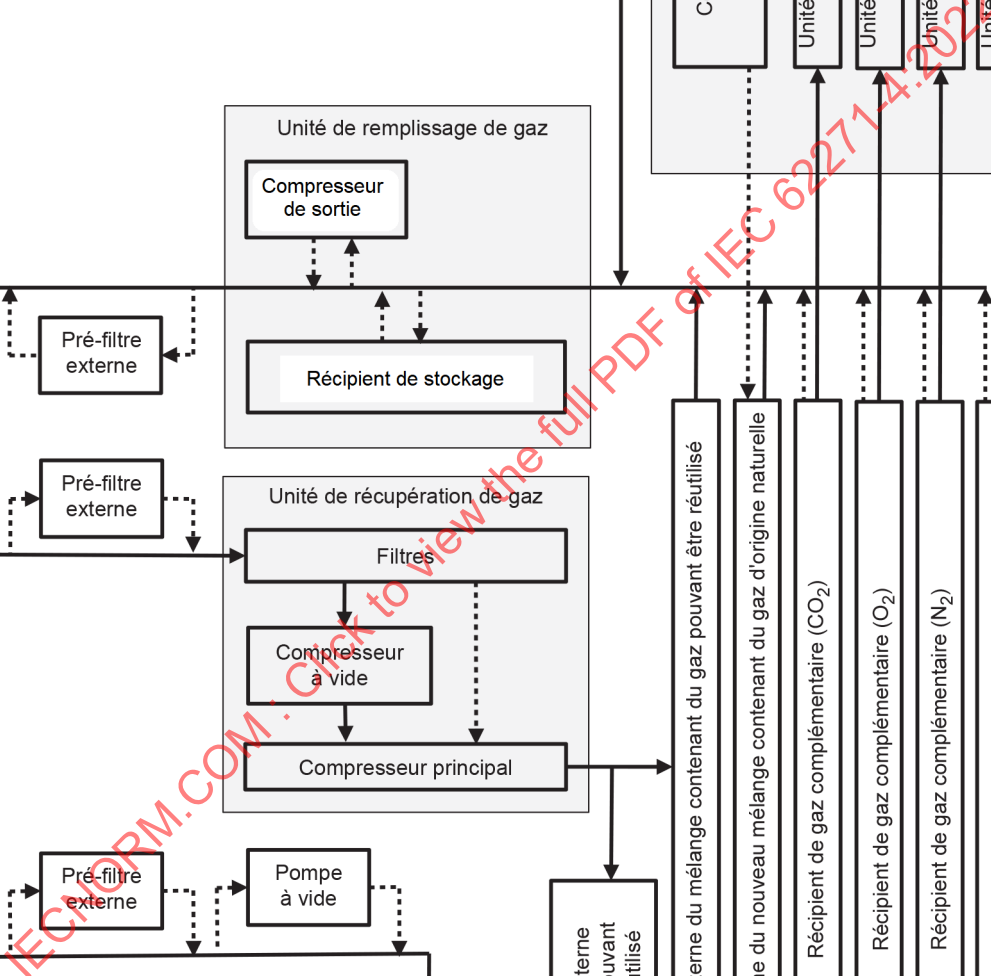


Figure D.1 – Vue schématique d'un exemple d'appareil de manipulation des gaz d'origine naturelle

D.6.1.2 Qualification des appareils de manipulation

Avant d'utiliser un appareil de manipulation, il convient de vérifier qu'il peut être utilisé pour la tâche prévue. Un appareil de manipulation prévu pour exécuter la même tâche, mais destiné à un autre gaz et qui n'est pas qualifiée pour les gaz d'origine naturelle peut être endommagé, faire l'objet d'un dysfonctionnement ou donner des relevés erronés, et donc présenter un risque pour l'opérateur ou pour l'appareil de manipulation ou l'appareillage électrique.

D.6.2 Filtres

D.6.2.1 Généralités

Des filtres doivent éliminer les produits de décomposition gazeux réactifs, l'humidité et les particules solides ou les gouttelettes d'huile avant le stockage des gaz d'origine naturelle dans un récipient ou le rejet des gaz d'origine naturelle fortement décomposés dans l'atmosphère.

Le Tableau D.7 présente des types de filtres classiques utilisés lors du rejet des gaz d'origine naturelle fortement décomposés dans l'atmosphère, qui peuvent être les mêmes que ceux utilisés pour la régénération du SF₆.

Tableau D.7 – Types de filtres classiques utilisés lors du rejet des gaz d'origine naturelle dans l'atmosphère

Type de filtre	Tâches	Caractéristiques principales
Filtre à particules	Élimine les produits de décomposition solides et les autres particules.	Dimension des pores inférieure à 1 µm.
Filtre sec	Élimine les produits de décomposition gazeux réactifs et l'humidité.	Humidité résiduelle inférieure à 100 µl/l (ppmv). Pas de concentration en NO _x et/ou CO résiduelle. Pour les valeurs d'OEL, voir le Tableau D.11. Aptitude à la rétention de particules.
Filtre à huile	Élimine l'huile lorsqu'exigé.	Filtre spécial utilisant du charbon actif.

D.6.2.2 Types de filtres

D.6.2.2.1 Filtre à particules

Certains produits de décomposition qui sont générés pendant les opérations de coupe sont constitués de fines particules solides (par exemple, des particules métalliques). La face interne du filtre à particules est constituée de papier ou d'un tissu lié approprié capable de retenir les particules de dimension supérieure à 1 µm. Le filtre à particule est normalement installé à la sortie de l'appareillage électrique afin de protéger l'appareil de manipulation et le récipient de stockage du gaz ou éviter le rejet de particules dans l'atmosphère, si les gaz d'origine naturelle sont rejetés dans l'atmosphère.

D.6.2.2.2 Filtre d'humidité et de produits de décomposition gazeux (filtre sec)

Les filtres appropriés peuvent absorber l'humidité et les produits de décomposition gazeux réactifs, tels que les oxydes d'azote (NO_x), l'ozone (O₃) ou le monoxyde de carbone (CO). Il convient d'utiliser des tamis moléculaires dont la dimension des pores est inférieure à 0,5 nm. Si une plus grande taille de pores est utilisée, dans certaines conditions, des réactions thermodynamiques exothermiques peuvent se produire avec l'humidité et/ou le CO₂, produisant une surchauffe importante du filtre. Toujours consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique pour savoir si des matériaux de filtrage sont nécessaires à certains mélanges de gaz d'origine naturelle. Vérifier également la taille du filtre, de sorte qu'il soit suffisamment grand pour obtenir l'humidité résiduelle exigée.

D.6.2.2.3 Filtre combiné

En lieu et place de filtres à particules et à humidité séparés, et de filtres de produits de décomposition gazeux, des filtres combinant ces deux principes de filtration peuvent être installés.

D.6.2.2.4 Filtre à huile

Il convient d'insérer un piège à huile contenant du charbon actif dans le cycle de gaz d'origine naturelle si une machine lubrifiée par de l'huile est utilisée ou si un composant électrique lubrifié à l'huile est intégré dans l'appareillage électrique utilisant des gaz d'origine naturelle. L'élimination de l'huile est effectuée en plusieurs étapes de manière à éviter la diffusion de l'huile.

D.6.3 Pompe à vide

La pompe à vide est utilisée pour vider l'appareillage électrique de l'air ou d'autres gaz pouvant être rejetés dans l'atmosphère, mais qui ne satisfont pas aux spécifications des gaz d'origine naturelle à utiliser dans l'appareillage électrique. La pompe à vide est également utilisée pour vider de l'appareillage électrique, par l'intermédiaire de filtres, les gaz d'origine naturelle fortement décomposés.

Il convient que la pression résiduelle à l'entrée de la pompe à vide soit inférieure à 0,1 kPa. Pour accélérer l'évacuation des compartiments sous gaz, l'utilisation de pompes à vide avec une pression résiduelle à l'entrée inférieure à 0,01 kPa est recommandée.

La pompe à vide est équipée d'un manomètre à vide. Il convient que la résolution du manomètre à vide soit au moins inférieure à 0,1 kPa (la valeur recommandée est inférieure à 0,01 kPa). Des manomètres à vide indépendants du type de gaz sont généralement recommandés.

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

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

D.6.4 Compresseur principal et à vide

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

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

NOTE 1 Presque tous les types de compresseurs de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile. Les compresseurs les plus récents peuvent obtenir une pression de 0,1 kPa à l'entrée.

NOTE 2 Par exemple: Une pression de sortie assignée de 10 000 kPa du compresseur est utilisée pour stocker du CO₂ ou des mélanges CO₂/O₂ sous forme gazeuse. Un dispositif de refroidissement supplémentaire peut être utilisé pour accélérer la récupération de gaz.

D.6.5 Compresseur de sortie

Lorsque la pression dans le récipient de stockage est supérieure à la pression dans le compartiment sous gaz, il est plus rapide de permettre une expansion directe du gaz. Dans tous les autres cas, un compresseur doit procéder au remplissage de gaz. Le compresseur de sortie, utilisant habituellement un compresseur de type à piston, fonctionne entre une pression d'entrée de gaz d'environ 100 kPa (généralement supérieure à 50 kPa) et la pression dans le compartiment sous gaz.

NOTE Presque tous les types de compresseurs de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile.

D.6.6 Récipient de stockage de gaz externe et interne

Des récipients de stockage de gaz sont utilisés pour stocker des gaz d'origine naturelle à une pression élevée. Ils sont portables, fixes ou installés dans l'appareil de manipulation. Il convient que la pression maximale du récipient de stockage soit appropriée à la pression finale du compresseur, en tenant compte également des températures élevées. Il convient de respecter les règlements locaux pour l'exploitation des récipients sous pression.

D.6.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz

Si le gaz d'origine naturelle est un mélange de gaz composé de CO₂ ou de CO₂ pur, un évaporateur ou un appareil de chauffage pour le stockage du gaz peut s'avérer utile. Si le CO₂ est stocké sous forme liquide et utilisé en tant que gaz, des pertes thermiques dues à l'évaporation à l'intérieur du récipient provoquent le refroidissement du CO₂ jusqu'à une température à laquelle la vitesse d'évaporation diminue considérablement.

Pour remplir rapidement de grands volumes, il convient de concevoir l'appareil de manipulation de manière à extraire le CO₂ liquide qui est ensuite vaporisé à l'intérieur d'un évaporateur. L'évaporateur est conçu de sorte qu'aucun liquide ne puisse atteindre le compartiment sous gaz ou le récipient de stockage interne.

De plus, des appareils de chauffage des récipients de stockage de gaz peuvent être utilisés, et il convient de les concevoir de manière à éviter une surchauffe accidentelle et à ne pas dépasser une température de gaz de 60 °C.

D.6.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries

Il convient de concevoir les conduites de gaz et les connexions de tuyauteries de façon à éviter les fuites et la corrosion. À cet effet, l'acier inoxydable est préféré. Il convient que la conception à la fois de la tuyauterie et des connexions tienne compte des vibrations de sorte que des opérations périodiques telles qu'un resserrage des connexions ne soient pas nécessaires.

D.6.9 Instruments de contrôle

Il convient de prévoir des jauges de contrôle pour indiquer la pression de gaz dans le compartiment sous gaz et le récipient de stockage, le niveau de vide, la température du gaz, etc. Il convient de les disposer dans une position telle qu'elles puissent être observées lors du remplissage des compartiments sous gaz et du rejet des gaz d'origine naturelle dans l'atmosphère. Il convient que l'exactitude et la résolution des jauges soient adéquates pour permettre la conservation des conditions de fonctionnement de sécurité.

D.6.10 Soupapes de sûreté

Des soupapes de sûreté sont utilisées dans le cycle de gaz d'origine naturelle pour limiter la pression. Les règlements locaux de sécurité sont respectés.

D.6.11 Connexions de tuyaux flexibles

Les éléments de filtrage, l'appareil de manipulation, le récipient de stockage de gaz et le compartiment sous gaz sont reliés par l'intermédiaire de connexions de tuyaux flexibles. Pour les opérations de remplissage uniquement, il convient d'apporter un soin particulier de manière à éviter la présence d'autres composés que les gaz d'origine naturelle à l'intérieur des tuyaux afin de diminuer la possibilité de contamination du gaz. Pour cette raison, des connexions de tuyaux avec couplage à fermeture automatique et étanchéité au vide sont exigées. Des tuyaux appropriés, généralement réalisés en caoutchouc synthétique ou en acier inoxydable flexible, capables de supporter le vide et la perméation sont exigés.

D.6.12 Dispositifs portables de mesure de gaz

D.6.12.1 Généralités

Le Tableau D.8 fournit une étude des dispositifs de mesure de gaz possibles incluant les valeurs recommandées pour la plage, la température d'exploitation et l'exactitude minimale. Ces grandeurs sont généralement déclarées par le fabricant de dispositifs portables de mesure de gaz dans la fiche technique.

Tableau D.8 – Dispositifs de mesure de gaz

Dispositif	Mesurage	Plage	Température d'exploitation	Exactitude minimale
Hygromètre (appareil de mesure de point de gelée/rosée)	Humidité (point de gelée/rosée)	40 µl/l (ppmv) à 6 000 µl/l (ppmv) (< -50 °C à 0 °C)	-10 °C à 40 °C	(±2 °C)
Dispositif de mesure de la concentration en He (uniquement en cas de détection de fuite)	Concentration en He	0 % à 10 %	-10 °C à 40 °C	±0,1 %
Dispositif de mesure de la concentration en CO ₂	Concentration en CO ₂	0 % à 100 % CO ₂	-10 °C à 40 °C	±0,25 %
Dispositif de mesure de la concentration en O ₂	Concentration en O ₂	0 % à 25 % O ₂		
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Les produits de décomposition sont par exemple CO, NO, NO ₂	1 µl/l (ppmv) à 25 µl/l (ppmv)	-10 °C à 40 °C	±15 % de la plage complète
Manomètre	Pression	0 kPa à 2 000 kPa	-10 °C à 40 °C	±10 kPa ou ±1 % de la plage complète
Thermomètre	Température	-25 °C à 70 °C	-25 °C à 70 °C	±1 °C

Par convention, les valeurs de pression sont consignées à 20 °C. Utiliser un manomètre à compensation de température ou calculer de nouveau en fonction de la température réelle du gaz pendant le mesurage.

Des mesurages de qualité de gaz peuvent être effectués dans les conditions de laboratoire ou sur le site. Les articles qui suivent décrivent les appareils portables les plus couramment utilisés sur le site pour le mesurage de:

- la teneur en humidité dans le gaz et/ou le point rosée ou de gelée;
- la concentration en CO₂;
- la concentration en O₂;
- la concentration en He (uniquement en cas de détection de fuite);
- la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs.

Aucun pompage en retour des gaz d'origine naturelle après le mesurage n'est exigé si le volume de gaz pour le mesurage est limité comparé au volume de gaz dans l'appareillage électrique.

D.6.12.2 Appareil de mesure de point de gelée/rosée

La teneur en humidité peut être mesurée en utilisant différents principes de mesure et instruments de mesure. Cependant, un appareil de mesure de point de gelée/rosée est l'appareil portable le plus courant utilisé à cet effet. Cet appareil mesure le point de gelée/rosée de l'humidité à l'intérieur du gaz, exprimé en °C, et peut le convertir en concentration volumique relative, exprimée en µl/l (ppmv).

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- capteur résistant aux traces d'huile et aux gaz corrosifs;
- tuyaux résistant à la perméation utilisant des connexions de robinet auto-obturants;
- tuyaux en acier inoxydable et connexions réalisées en matériaux hydrophobes;
- étalonnés ou capables d'étalonnage sur le site;
- petites quantités de gaz utilisées par mesurage;
- durée moyenne pour obtenir la lecture inférieure à 5 min.

D.6.12.3 Dispositif de mesure de la concentration en gaz

D.6.12.3.1 Dispositif de mesure de la concentration en CO₂

Les dispositifs de mesure de la concentration en CO₂ utilisent les techniques suivantes:

- capteur infrarouge non dispersif (NDIR);
- dispositifs généraux de mesurage par absorption à infrarouge qui peuvent être réglables pour mesurer la concentration en CO₂ (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, par exemple);
- spectrométrie de masse;
- mesurage de la vitesse du son, qui peut être un moyen aisé d'analyser la concentration dans les mélanges binaires de N₂ ou O₂.

D.6.12.3.2 Dispositif de mesure de la concentration en O₂ ou de He

Les détecteurs de O₂ (pour des installations portables ou fixes à usage en laboratoire) reposent souvent, par exemple, sur des détecteurs électrosensibles, des détecteurs paramagnétiques ou des méthodes optiques. Ces détecteurs peuvent être utilisés pour vérifier la concentration en O₂ des gaz d'origine naturelle selon le manuel d'instructions du fabricant de l'appareillage électrique.

Des détecteurs d'hélium (pour des installations portables ou fixes à usage en laboratoire) peuvent être exigés pour procéder aux essais de fuite sur site d'un appareillage électrique utilisant des gaz d'origine naturelle, qui est provisoirement rempli d'une certaine quantité d'hélium afin de localiser les zones de fuite anormales. Voir la brochure 430 du CIGRE [13]. Ils reposent, par exemple, sur des mesurages de la vitesse du son, de la spectrométrie de masse ou de la conductivité thermique.

Il convient que le fabricant de l'appareillage électrique définisse la concentration maximale admissible d'hélium qui peut être présent dans l'appareillage électrique pour un fonctionnement sûr après avoir procédé aux essais de fuite.

D.6.12.4 Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs

De différentes méthodes sont disponibles pour l'essai des produits de décomposition gazeux réactifs. La pratique courante et recommandée consiste à soumettre à l'essai le niveau d'oxydes d'azote No_x , c'est-à-dire principalement le NO_2 et le NO) et le niveau de monoxyde de carbone (CO) dans les gaz d'origine naturelle. Ces essais peuvent être réalisés en utilisant soit des tubes à réaction (les tubes à réaction changent de couleur initiale si des gaz d'origine naturelle contenant du No_x les traversent) soit en utilisant d'autres détecteurs (un détecteur électrochimique, par exemple) ou des détecteurs fonctionnant selon les principes d'absorption infrarouges. De même, la spectrométrie de masse (MS), la chromatographie en phase gazeuse combinée à une spectrométrie de masse (GC-MS) ou des détecteurs de conductivité thermique peuvent être utilisés.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- sensibilité connue au No_x , CO , à l'ozone, HF ;
- tuyaux de connexion résistant aux produits de décomposition gazeux réactifs et utilisant des connexions de robinet auto-obturants.

L'utilisation de tubes à réaction sensibles au HF n'est pas recommandée, car le HF réagit très rapidement avec les surfaces métalliques en formant une couche de surface de fluorures métalliques et le rendant donc presque impossible à détecter. Ces tubes à réaction peuvent uniquement donner une indication qualitative de la présence de HF dans les gaz d'origine naturelle fortement décomposés.

D.6.13 Contrôleur de fuite de gaz

Outre l'application d'un vaporisateur de détection de fuite, des détecteurs portables d'hélium peuvent être utilisés pour procéder aux essais de fuite sur site d'un appareillage électrique utilisant des gaz d'origine naturelle, qui est provisoirement rempli d'une certaine quantité d'hélium afin de localiser les zones de fuite anormales. Voir la brochure 430 du CIGRE [13]. Les détecteurs d'hélium reposent, par exemple, sur des mesurages de la vitesse du son, de la spectrométrie de masse ou de la conductivité thermique. D'autres approches ont été consignées en fonction soit de leur méthode d'essai cumulative (avec des capteurs de CO_2 , par exemple) soit de la méthode de reniflage utilisant l'ozone comme gaz traceur en lieu et place de l'hélium.

D.6.14 Systèmes d'alarme de concentration en gaz

Des systèmes d'alarme de concentration en gaz peuvent être installés pour surveiller la concentration en CO , CO_2 ou No_x dans un local. Ces systèmes d'alarme exigent des détecteurs ayant une très grande stabilité à long terme. Les systèmes d'alarme comportant des détecteurs de substances mentionnées ci-dessus ne sont généralement utilisés que lorsque de très grands volumes de gaz d'origine naturelle sont contenus dans l'appareillage électrique en intérieur, par exemple, dans des installations d'appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse.

D.6.15 Bouteilles d'échantillonnage de gaz

Des bouteilles d'acier inoxydable d'un volume inférieur à 1 l sont recommandées. Il convient d'échantillonner directement le gaz depuis le compartiment sous gaz en utilisant des connexions appropriées. Si la pression dans le compartiment sous gaz dépasse la pression maximale admissible de la bouteille, il convient alors d'utiliser un régulateur de pression et un manomètre.

D.6.16 Unité de mélange de gaz

Une unité de mélange de gaz est présentée en haut à droite de la Figure D.1. Elle permet de mélanger différents gaz d'origine naturelle selon un rapport de gaz sélectionné à l'avance lors du remplissage ou du complément de remplissage de l'appareillage électrique ou du récipient de stockage externe. Il est également possible d'utiliser des gaz vecteurs prémélangés (par exemple, de l'air synthétique qui est un mélange de 20 % de O₂ et 80 % de N₂).

Les flux de gaz d'origine naturelle sont commandés par les unités de commande de flux pour remplir le récipient de stockage avec le mélange sélectionné à l'avance. La pression de sortie (c'est-à-dire, la pression de remplissage du compartiment sous gaz ou du récipient de stockage) est réglée par le compresseur de sortie.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- concentrations en gaz ajustables (rapports de mélange) et pressions de sortie (c'est-à-dire la pression de remplissage);
- pression de sortie maximale à 20 °C: jusqu'à 2 000 kPa;
- possibilité de mélanger de petites et de grandes quantités de gaz.

Une autre pratique d'apport de gaz d'origine naturelle de qualité technique consiste à utiliser des récipients préremplis disponibles dans le monde entier. Dans ce cas, l'appareillage électrique est directement rempli depuis le récipient prérempli en utilisant des réducteurs de pression prévus à cet effet limitant la pression à la pression de remplissage pour l'isolation et/ou la commutation.

D.6.17 Unité de remplissage de gaz

Une unité de remplissage de gaz est représentée au centre de la Figure D.1. Elle est utilisée pour remplir successivement le compartiment sous gaz avec les composants individuels du mélange de gaz (voir E.10.2.2) ou avec un mélange de gaz prémélangé (voir D.10.2).

D.6.18 Unité de récupération de gaz

Une unité de récupération de gaz est également représentée au centre de la Figure D.1. Les dispositifs de récupération de gaz sont généralement composés d'un ensemble de composants, y compris un filtre à particules, un filtre sec, un compresseur à vide, un compresseur et un récipient de stockage des gaz d'origine naturelle usagés.

L'unité de récupération de gaz est destinée à récupérer les gaz d'origine naturelle d'un compartiment sous gaz en cas de maintenance, de réparation ou de fin de vie.

D.6.19 Dispositifs de stockage et de transport du gaz usagé

Des récipients sous pression ou des récipients de stockages spéciaux pour gaz d'origine naturelle usagés sont disponibles en tant que récipients de stockage de gaz. Il s'agit de dispositifs mobiles ou fixes. Seuls des récipients spécialement approuvés pour le stockage et le transport des gaz d'origine naturelle usagés sont admis. Il convient que la pression maximale du récipient de stockage soit appropriée à la pression finale du compresseur. Il convient de respecter les règlements locaux pour l'exploitation des récipients sous pression.

Lors de la compression des gaz d'origine naturelle contenant du CO₂, le CO₂ peut commencer à se liquéfier à une pression et une température spécifiques. Il convient d'en tenir compte au moment de choisir le compresseur, et la pression maximale du récipient sous pression est définie.

D.7 Procédures de régénération

D.7.1 Généralités

Les gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés récupérés depuis l'appareillage électrique peuvent contenir de l'humidité et de l'air ambiant, ce qui n'a aucun impact sur l'environnement. La régénération est uniquement nécessaire lors du rejet des gaz d'origine naturelle fortement décomposés dans l'atmosphère. Dans ce cas, il convient d'utiliser des filtres pour absorber les éventuels produits de décomposition. Les gaz d'origine naturelle très faiblement décomposés peuvent être rejetés dans l'atmosphère et il n'est pas nécessaire de les régénérer. Il convient de rejeter les gaz dans un endroit bien ventilé, de préférence en extérieur, et de ne pas le faire à proximité de sous-sols, de puits d'extraction ou équivalents, afin d'éviter l'accumulation locale de CO₂ (si le mélange en contient). Il convient de tenir compte des règlements locaux.

En principe, les gaz d'origine naturelle faiblement décomposés peuvent contenir de petites quantités de produits de décomposition toxiques. Cela dépend du mélange de gaz d'origine naturelle, de l'application, des produits de décompositions générés et de leur toxicité. Compte tenu de la variété des applications de coupure, il convient de consulter le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique quant à la manière de procéder avec des gaz d'origine naturelle faiblement décomposés.

NOTE Les appareils électriques types utilisant des gaz d'origine naturelle faiblement décomposés et leurs mélanges sont: Sectionneur de mise à la terre d'un poste à isolation gazeuse (après coupure de faibles courants induits) et sectionneur d'un poste à isolation gazeuse (après coupure de faibles courants ou courants de transfert de bus) et interrupteur de charge moyenne tension après coupure et interruption des courants assignés.

Les gaz d'origine naturelle fortement décomposés contiennent des produits de décomposition toxiques (principalement CO et NO₂ ou NO), mais également d'autres composants formés par la combustion de différents métaux et plastiques présents à l'intérieur de l'appareillage électrique. Si des gaz d'origine naturelle fortement décomposés sont rejetés dans l'atmosphère, il convient d'utiliser des filtres pour absorber les éventuels produits de décomposition. Les éléments filtrants utilisés pour le SF₆ s'appliquent également pour filtrer les gaz d'origine naturelle usagés.

Il convient que les filtres satisfassent aux exigences suivantes:

- il convient qu'ils éliminent de manière fiable les polluants mentionnés;
- il convient que les filtres soient de type à cartouche pour une élimination sûre et aisée;
- il convient que l'entrée et la sortie soient équipées des mêmes coupleurs auto-obturants;
- il convient que le changement de filtres ne nécessite pas le démontage d'accessoires, tubes ou autre raccord pour éliminer la possibilité de fuite;
- il est recommandé de remplacer le filtre pour chaque procédure de régénération.

D.7.2 Recommandations en matière de filtrage

Il convient que la qualité des gaz d'origine naturelle filtrés satisfasse aux exigences données dans le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique et qu'elle soit conforme aux règlements locaux.

Tous les polluants qui apparaissent peuvent être éliminés sur site. Le Tableau D.9 donne la liste des types de polluants et les méthodes recommandées pour les éliminer.

Tableau D.9 – Exemples d'opérations de filtrage

Contamination	Humidité	Produits de décomposition gazeux	Produits de décomposition solides	Contaminé par de l'huile minérale (si nécessaire)
Méthode de filtrage	Absorption avec un tamis moléculaire	Absorption avec de l'oxyde d'aluminium actif ou un tamis moléculaire	Rétention avec des filtres solides	Filtre à charbon actif

Différents types de matériaux absorbants sont disponibles pour éliminer les polluants des gaz d'origine naturelle (voir le Tableau D.10). Par la manipulation correspondante avec des éléments filtrants, le gaz est filtré et finalement rejeté dans l'atmosphère.

Tableau D.10 – Absorbants types des différents polluants des gaz d'origine naturelle

Absorbant	Polluants éliminés
Tamis moléculaire 4A	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Tamis moléculaire 13X	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂ (n'absorbe que peu de gaz d'origine naturelle)
Oxyde d'aluminium actif	H ₂ O, NO ₂ , NO, O ₃ , CO ₂ , HNO ₃ , HNO ₂
Charbon actif	Vapeur d'huile

D.7.3 Transport par route de gaz d'origine naturelle usagés dans des bouteilles de gaz et des récipients

Le transport des gaz d'origine naturelle usagés n'est pas nécessaire. Seul le transport pour l'analyse hors site du gaz est exigé. Pour les gaz d'origine naturelle usagés, les règlements en matière de transport routier et d'étiquetage sont les mêmes que pour les gaz d'origine naturelle de qualité technique (voir D.5.3). Toutefois, il convient de tenir compte des règlements locaux.

Le présent document ne définit pas de concentration ou de quantité minimale pour les produits de décomposition dangereux. Il convient d'appliquer les règlements locaux ou les lignes directrices locales, le cas échéant.

D.8 Produits de décomposition

D.8.1 Généralités

Le présent paragraphe décrit les aspects généraux de la décomposition et les caractéristiques des produits de décomposition. Les quantités dépendent de la composition du gaz, des polluants et de l'énergie introduite. Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique donne davantage de précisions et les aspects spécifiques conformément à l'IEC/IEEE 82079-1:2019, 7.11 [14].

D.8.2 Décomposition des gaz d'origine naturelle

D.8.2.1 Généralités

Lorsqu'un arc se produit dans des gaz d'origine naturelle, différents produits de décomposition sont générés en même temps et en différentes quantités. À des températures au-dessus de quelques 1 000 °C, les molécules de N₂, O₂ ou CO₂ commencent à se décomposer. Le taux de décomposition est lié à l'énergie d'arc totale. Lorsque la température chute de nouveau, la plupart des atomes se recombinaient pour former du CO, CO₂, N₂ ou O₂ et du C solide, alors que d'autres se combinent avec l'humidité et différentes substances de l'appareillage électrique (les métaux d'électrode vaporisés, les parois du récipient, la buse en PTFE ou d'autres plastiques, par exemple) pour former une variété de produits finaux instables ou stables.

Parmi les produits de décomposition toxiques, le CO et le HF (provenant principalement de la buse en PTFE) sont considérés comme étant les plus critiques.

D.8.2.2 Décomposition des gaz d'origine naturelle en faibles décharges de courant

Bien qu'une tension de service soit appliquée à l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle, la possibilité de faibles décharges de courant telles qu'un effet couronne, une étincelle et des décharges partielles, ne peut pas être éliminée. Toutefois, les concentrations en produits de décomposition résultant de telles décharges sont très faibles.

D.8.2.3 Décomposition des gaz d'origine naturelle dans un arc électrique

Pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut, un arc électrique atteignant des températures de l'ordre de 10 000 °C se forme. Selon la composition des gaz d'origine naturelle, de nombreux processus de décomposition différents peuvent se produire. Parmi les produits de décomposition toxiques, qui sont générés en raison d'un arc électrique, le CO et le HF (en cas de doute, du PTFE ou d'autres types de fluor qui contiennent du plastique sont utilisés) sont considérés comme étant les plus critiques.

D.8.2.4 Décomposition des gaz d'origine naturelle en raison d'une défaillance d'arc interne

Les mécanismes de décomposition décrits en D.8.2.3 sont similaires en cas de défaillance d'arc interne. Des produits de décomposition gazeux supplémentaires et des produits de décomposition solides (des oxydes métalliques, par exemple) peuvent apparaître dans le cadre d'une interaction de l'arc interne avec différents matériaux présents dans l'appareillage électrique.

D.8.2.5 Réaction chimique des gaz d'origine naturelle avec le matériau

En l'absence d'une quantité significative de produits de décomposition, la corrosion est la seule réaction chimique à prendre en considération lorsque des gaz d'origine naturelle sont utilisés pour l'isolation et/ou la commutation. Pour plus d'informations, voir D.8.3.

D.8.3 Comportement de corrosion des gaz d'origine naturelle et de leurs produits de décomposition

En fonctionnement normal, des quantités importantes de produits de décomposition n'apparaissent pas et sont absorbées par les matériaux absorbants.

Uniquement dans le cas des gaz d'origine naturelle fortement décomposés présentant une concentration importante de produits de décomposition corrosifs (en cas de défauts d'arc interne, par exemple), les métaux habituellement utilisés, tels que l'aluminium, l'acier, le cuivre et le laiton, peuvent être attaqués et se corroder.

N₂ est un gaz inerte. La corrosion n'a donc aucune chance d'être provoquée directement par le N₂ lui-même.

L'impact du O₂ en présence d'eau sur le comportement de corrosion dans l'appareillage électrique est bien connu et pris en considération dans les normes correspondantes (IEC 62271-1:2017 ou IEC TR 60943 [15], par exemple). Toutefois, en présence d'eau, les produits de décomposition primaires et secondaires peuvent former des acides nitreux ou nitriques corrosifs et de l'ozone, ce qui peut endommager certains matériaux utilisés à l'intérieur de l'appareillage électrique.

De même, le CO₂ pur n'est pas corrosif, mais avec de l'eau, il peut former de l'acide carbonique qui peut être très corrosif. Toutefois, le manque de stabilité du H₂CO₃ n'a pas d'impact sérieux sur l'appareillage électrique. Néanmoins, l'appareillage électrique équipé d'un agent déshydratant approprié permet d'éviter tout risque de corrosion.

Certains matériaux, tels que les matériaux polymères et analogues, sont plus vulnérables aux attaques par l'ozone. Toutefois, l'impact de l'ozone sur les propriétés du matériau dépend dans une très large mesure du matériau spécifique utilisé dans l'appareillage électrique.

Il est important que la conception et le manuel d'instructions d'exploitation de l'appareillage électrique tiennent compte des propriétés corrosives de O₂ et des produits de décomposition.

D.8.4 Mesures pour le retrait des produits de décomposition

L'humidité et les produits de décomposition à l'intérieur de l'appareillage électrique peuvent être réduits à des niveaux acceptables par absorption. Des matériaux tels que l'alumine, les tamis moléculaires ou leurs mélanges conviennent à cet effet. Ils absorbent très efficacement la plupart des produits de décomposition gazeux et en même temps, assurent que le point de rosée/point de gelée reste faible.

L'élimination des produits de décomposition enlevés de l'appareillage électrique est directe. Les composants acides (acide nitreux et acide nitrique) sont dégradés au moyen de composés alcalins, en particulier le carbonate de sodium (Na₂CO₃).

D.8.5 Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition

Les produits de décomposition des gaz d'origine naturelle peuvent provoquer une irritation de la peau, des yeux et des muqueuses, par exemple des voies respiratoires, et en forte concentration, peuvent provoquer un œdème pulmonaire (O₃, par exemple) si le temps d'exposition est suffisant.

Les gaz d'origine naturelle fortement décomposés contenant des produits de décomposition ont une odeur d'eau de javel ou une odeur âcre désagréable qui est associée en elle-même à un effet irritant. Les seuils olfactifs, en particulier pour NO₂ et O₃, sont du même ordre que les valeurs limites données dans le Tableau D.11. Du fait de ces caractéristiques, même de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent conduire à des indications d'avertissement manifestes en quelques secondes, sans qu'aucun risque d'empoisonnement ne puisse apparaître.

Lorsque du monoxyde de carbone CO est produit, sa détection est primordiale. Le monoxyde de carbone CO est inodore et toxique en cas d'inhalation. Il entraîne des maux de tête, de la nausée, du vertige, de l'évanouissement et il est parfois mortel. Une inhalation prolongée ou répétée peut provoquer des lésions au cœur.

D.9 Procédure d'évaluation des effets potentiels des composants gazeux et des produits de décomposition sur la santé

D.9.1 Généralités

Le présent paragraphe propose des procédures d'évaluation des risques pour la santé des gaz d'origine naturelle fortement décomposés contenant une quantité importante de produits de décomposition rejetés dans l'atmosphère locale après une fuite normale ou anormale, et en cas de rejet soudain dû à un défaut d'arc interne ou à un feu extérieur.

Les gaz d'origine naturelle très faiblement et faiblement décomposés lorsqu'ils sont capturés dans des compartiments sous gaz n'ayant aucun impact potentiel sur la santé des personnes, ils ne sont pas pris en considération à cet égard.

Pendant le fonctionnement normal, les gaz d'origine naturelle restent à l'intérieur de l'appareillage électrique et les produits de décomposition gazeux formés sont présents à de faibles concentrations. Les gaz d'origine naturelle et leurs produits de décomposition peuvent être présents dans l'atmosphère en raison d'une fuite ou si un compartiment sous gaz ne parvient pas à contenir le gaz (en cas de défaut d'arc interne, par exemple). Lors de l'évaluation du risque pour la santé, il est nécessaire d'effectuer une différenciation claire entre les conditions de fuite et les situations de défaut d'arc interne conduisant à un rejet soudain de gaz d'origine naturelle et de leurs produits de décomposition.

En cas de fuite, il est nécessaire de tenir compte des effets d'une exposition à long terme aux produits de décomposition gazeux des gaz d'origine naturelle. Il convient que les concentrations de ces produits de décomposition dans l'air restent inférieures à leurs valeurs TWA. Il convient que les produits de décomposition soient capturés par des matériaux absorbants à l'intérieur de l'appareillage électrique, de sorte que des conditions de fuite combinées à une ventilation normale du local ne puissent pas donner lieu à des concentrations anormales de produits de décomposition dans l'environnement.

En cas de rejet soudain de gaz d'origine naturelle et de leurs produits de décomposition en raison d'un défaut d'arc interne, la procédure d'urgence exigée par le règlement local peut donner lieu à une exposition de courte durée. Des concentrations plus élevées de produits de décomposition sont tolérables si la durée d'exposition est considérablement réduite. Dans ce cas, il convient de tenir compte de toutes les sources possibles d'émissions toxiques, ce qui exige d'avoir une connaissance détaillée de tous les produits de décomposition formés. Il convient qu'une analyse complète tienne compte des contributions de la vapeur métallique, des plastiques brûlés, de l'isolation des câbles, de la peinture, etc., sur une base légale à ce qui peut être attribué aux gaz d'origine naturelle et leurs produits de décomposition gazeux.

Les paragraphes suivants fournissent des exemples de calculs pour l'évaluation des risques associés à la présence de produits de décomposition, en matière de quantité et de toxicité, en raison d'une fuite normale ou anormale dans l'atmosphère. Les quantités dépendent de la composition du gaz, des polluants et de l'énergie d'arc introduite. Il convient que le manuel d'instructions d'exploitation du fabricant de l'appareillage électrique donne davantage de précisions et les aspects spécifiques.

D.9.2 Formation de produits de décomposition et effets sur la santé

D.9.2.1 Formation de produits de décomposition pendant un arc

Pendant les opérations de coupure du courant de charge ou du courant de défaut dans les gaz d'origine naturelle, le cœur de l'arc atteint des températures de l'ordre de 10 000 °C. À ces températures, les molécules de gaz sont entièrement rompues en leurs atomes parents, N, O et C, comme cela est consigné à l'Article D.8. Tous les polluants, tels que l'eau, sont dissociés d'une manière similaire. Le résultat en est une région localisée ne contenant que des atomes uniques de N, O, C et divers ions. Le chauffage des électrodes et des parties isolantes par l'arc ajoute à cette atmosphère des vapeurs de Ag, Cu, W, C et Al, par exemple.

Après extinction de l'arc ou dans les régions dans lesquelles le refroidissement commence, ces atomes commencent à se lier à nouveau ensemble et reforment principalement du N_2 , O_2 , CO_2 ou CO . Toutefois, des réactions chimiques se produisent avec les contaminations présentes et en particulier avec l'eau, donnant naissance à des produits de décomposition d'arc supplémentaires. Les quantités formées sont directement associées à l'énergie électrique injectée dans le volume de gaz.

Dans le cas des disjoncteurs, contenant des gaz d'origine naturelle (en général une quantité importante de CO_2) et qui utilisent des pièces en PTFE, le HF peut également se former en tant que produit de décomposition critique. Dans le scénario le plus défavorable, il convient d'admettre que pour ce type d'exemple de disjoncteur, les deux produits de décomposition CO et HF sont toujours présents lorsque le gaz décomposé est rejeté dans l'atmosphère.

En cas d'arc et de décharges électriques de faible énergie, les produits de décomposition gazeux les plus souvent rencontrés sont: NO_2 , O_3 et CO .

D.9.2.2 Effets sur la santé des composants gazeux et des produits de décomposition

D.9.2.2.1 Généralités

Si des gaz d'origine naturelle décomposés sont évacués sur le lieu de travail, le risque potentiel sur la santé dépend de la concentration de chaque composant gazeux et produit de décomposition dans l'air, et donc du volume du local contenant l'appareillage électrique. Il convient que les estimations de toxicité tiennent compte de la concentration de chaque composant et produit de décomposition gazeux en relation avec les concentrations admissibles pendant la durée d'exposition appropriée. Il convient d'adopter la formule ci-dessous pour calculer le risque total associé aux composants gazeux et aux produits de décomposition (voir D.9.2.4 pour des exemples de calcul, qu'il convient d'appliquer pour chaque compartiment sous gaz et chaque produit de décomposition survenu).

$$Risk_{tot} = \sum_i \frac{\text{concentration (produits de décomposition)}_i}{\text{Seuil (produits de décomposition)}_i} \leq 1$$

En principe, quatre principaux cas de contact avec des gaz d'origine naturelle, y compris leurs produits de décomposition, peuvent se produire:

- **fuite normale:** fuite de gaz de l'appareillage électrique dans les limites des taux de fuite admissibles de 0,5 %/a ou 0,1 %/a, par exemple;
- **fuite anormale:** fuite de gaz de l'appareillage électrique au-dessus des limites des taux de fuite admissibles de 0,5 %/a ou 0,1 %/a, par exemple;
- **maintenance:** entrée dans le compartiment sous gaz après récupération des gaz d'origine naturelle pour la maintenance, la réparation ou le traitement de fin de vie;
- **défaillance:** ouverture d'un compartiment sous gaz après un arc interne ou un feu extérieur.

La principale différence est la concentration en produits de décomposition dans le local d'appareillage. En cas de feu extérieur ou de défaillance d'arc interne, d'autres substances dangereuses peuvent également être générées. Ces substances supplémentaires ne sont pas couvertes par cette analyse, car elles ne dépendent pas uniquement du gaz d'isolation, mais également des autres matériaux utilisés et de leur comportement en cas de feu ou d'arcs d'énergie élevée.

NOTE Selon les dimensions du local, les gaz qui ont fuit peuvent temporairement ne plus d'être distribué uniformément dans le local d'appareillage et de plus fortes concentrations peuvent survenir localement.

D.9.2.2.2 Effets sur la santé des gaz d'origine naturelle décomposés

Pour les mélanges de plusieurs composants, les toxicologues définissent quatre cas généraux:

- chaque composant agit d'une manière différente ou sur des organes cibles différents; les effets ne sont donc pas cumulatifs et chaque composant est traité séparément;
- les composants agissent de manière similaire sur les mêmes organes cibles; leur effet est donc cumulatif et les calculs en tiennent compte;
- si un composant surpasse largement la contribution des autres; il convient d'estimer l'effet toxique global en étudiant la concentration en ce seul composant;
- il y a un effet synergétique entre les composants, ce qui implique un impact plus important sur la santé.

Le risque total pour la santé du personnel, dû aux gaz d'origine naturelle fortement décomposés, dépend de façon prédominante des concentrations en CO_2 et des produits de décomposition NO_2 et CO (O_3 est une molécule instable dont la durée de vie est courte dans l'atmosphère).

Une hydrolyse du NO_2 peut se produire en présence de concentrations significatives d'eau, produisant HNO_2 et HNO_3 , comme cela est consigné en D.8.1. Jusqu'à présent, les valeurs TWA de HNO_3 ont été définies sur 2 µl/l (ppmv).

D.9.2.2.3 Durée d'exposition et dilution dans l'air

Il existe deux notions essentielles pour toute évaluation du risque pour la santé dû à des substances toxiques:

- la concentration de la substance dans le volume environnant;
- la durée d'exposition.

Lorsqu'une situation de fuite est calculée, il convient d'utiliser la valeur TWA. Un exemple de calcul de la valeur TWA est donné en 3.1.28.

L'exposition à des concentrations mesurables de composants ou produits de décomposition gazeux n'est pas prévue pendant le fonctionnement normal de l'appareillage électrique. Les concentrations aérogènes de composants ou produits de décomposition gazeux sont en général bien inférieures à la valeur TWA pour ces substances.

En cas de rejet soudain (l'ouverture d'un dispositif limiteur de pression, par exemple, en raison d'un défaut d'arc interne), il convient que le personnel quitte immédiatement le local d'appareillage, donnant lieu à une exposition à court terme à des concentrations mesurables de produits de décomposition. En quittant le local, il peut être évité que le personnel puisse potentiellement être exposé à des concentrations de composants ou produits de décomposition supérieures à leurs valeurs C, à leurs valeurs STEL ou à cinq fois leurs valeurs TWA.

Les limites d'exposition professionnelle (OEL) pour NO_2 , NO , O_3 et HNO_3 sont données dans le Tableau D.11. De plus, le Tableau D.11 est différent selon qu'il s'agit de molécules instables (courte durée de vie dans l'atmosphère) ou de molécules stables (longue durée de vie dans l'atmosphère).

Tableau D.11 – OEL pour NO₂, NO, O₃, CO et HNO₃

OEL	NO ₂	HNO ₃	CO	NO	O ₃
	Molécule stable dans l'air ambiant à la température ambiante			Molécule instable dans l'air ambiant à la température ambiante	
TWA [μl/l (ppmv)]	0,2 à 0,5	2	35 ^a	25	0,05 à 0,1
STEL [μl/l (ppmv)]	5	4	420 ^b	non défini	0,3
C [μl/l (ppmv)]	115	67	200 ^a	115	12,6
NOTE 1 Les valeurs sont conformes à l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ou l'AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals). NOTE 2 Si aucune valeur C n'est disponible, la valeur LC50 est ajoutée à sa place. ^a Selon USA NIOSH. ^b Selon www.epa.gov – Niveaux AEGL 2 pour CO pendant 10 min.					

D.9.2.3 Estimation quantitative des produits de décomposition gazeux

Le taux de production des produits de décomposition gazeux formés pendant un arc électrique fait en général référence à l'énergie, en Joule, dissipée dans le gaz. Les résultats expérimentaux sont généralement exprimés en mol/J.

À l'exception des disjoncteurs ou après des défauts d'arc interne, seuls les gaz d'origine naturelle très faiblement et faiblement décomposés, et donc seules de très faibles concentrations en NO₂, NO, O₃, CO et HNO₃, doivent être attendus pendant le fonctionnement de l'appareillage électrique contenant un type et une quantité adaptés de matériaux absorbants.

Les faibles concentrations en NO₂, NO, O₃ et CO formées pendant un arc ou une décharge électrique normal(e) sont réduites dans une plus large mesure compte tenu de leur absorption par les matériaux absorbants. La concentration en HNO₃ à prévoir est négligeable compte tenu de la très faible concentration d'eau. De plus, les matériaux absorbants permettant d'absorber HNO₃ réduisent dans une plus large mesure la concentration maximale de HNO₃.

Il convient que la concentration estimée en NO₂, NO, O₃, CO et HNO₃ due à un arc dans les disjoncteurs soit indiquée par le fabricant de l'appareillage électrique.

D.9.2.4 Procédure d'évaluation du risque pour la santé

D.9.2.4.1 Généralités

Les procédures d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition gazeux dans les gaz d'origine naturelle faiblement ou fortement décomposés sont fondées sur les hypothèses suivantes:

- le local d'appareillage est totalement fermé;
- le gaz émis se mélange uniformément avec l'air dans le local d'appareillage en une courte durée par rapport à la journée de travail ou à la durée d'exposition.

Il convient que le fabricant de l'appareillage électrique évalue les concentrations possibles de produits de décomposition, en prenant les scénarios les plus défavorables, tels que les essais de type des commutateurs et la concentration en fin de vie (pour les disjoncteurs au gaz HT, également les conditions liées aux intervalles d'entretien définis) et les résultats partagés avec l'utilisateur final. Dans les conditions les plus défavorables, l'utilisateur final se trouve toujours

du côté sûr. Les chiffres réels peuvent uniquement être donnés dans le cadre d'une analyse pertinente d'un échantillon de gaz.

D.9.2.4.2 Fuite normale

Le paragraphe 6.16.1 de l'IEC 62271-1:2017 donne le taux de fuite admissible des gaz utilisés dans les locaux d'appareillage. Souvent, de faibles taux de fuite sont indiqués par le fabricant de l'appareillage électrique et sont vérifiés lors des essais de type. Ces essais couvrent les trois aspects relatifs à une fuite:

- une fuite de gaz entre les surfaces d'interface (entre le joint et la surface d'étanchéité, par exemple) des connexions statiques;
- une fuite de gaz entre les surfaces d'interface (entre le joint et la surface d'étanchéité, par exemple) des connexions dynamiques, lorsque le gaz s'échappe pendant le fonctionnement des axes de translation ou des arbres de rotation;
- la perméation du gaz à travers un élastomère (un joint, par exemple) ou un matériau thermoplastique.

Le taux de fuite admissible est valable à une température ambiante de 20 °C. Pour des températures plus élevées, le taux de fuite temporaire admis peut être jusqu'à trois fois plus élevé (voir l'IEC 62271-1:2017, Tableau 15). Cela s'explique essentiellement par le fait que la perméation du gaz dépend fortement de la température. De même, pour des températures inférieures à 0 °C, le taux de fuite temporaire admis peut être jusqu'à trois à six fois supérieur (voir l'IEC 62271-1:2017, Tableau 15), résultant essentiellement de la souplesse réduite des joints dans les connexions dynamiques.

Pour vérifier que l'appareillage électrique ne présente aucun défaut de fabrication donnant lieu à des taux de fuite plus élevés, un essai d'étanchéité individuel de série est à la pointe du progrès. Toutefois, en raison de sa courte durée, cet essai ne détecte en général que les fuites de gaz entre les interfaces (la détection de l'effet de perméation peut prendre des semaines). Les essais d'étanchéité individuels de série sont suffisants pour détecter les problèmes de fabrication (lorsque les fuites au niveau des interfaces et qu'une perméation modérée sont les causes dominantes).

La quantité de gaz qui a fui et de ses produits de décomposition peut être calculée en connaissant le taux de fuite, le volume de tous les compartiments sous gaz, la pression totale du gaz et la durée. La ventilation du local d'appareillage joue un rôle important. Le gaz qui s'échappe et ses produits de décomposition s'accumulent dans le local d'appareillage uniquement à de très faibles vitesses de ventilation ou en l'absence totale de ventilation.

La perméation des différents composants de mélange de gaz peut être différente et dépend du coefficient de perméation spécifique du gaz, qui est fonction du matériau et de la différence de pression partielle des composants gazeux à l'intérieur et à l'extérieur du compartiment sous gaz.

La perméation étant un effet plus ou moins constant dans le temps et réparti sur de nombreux emplacements du compartiment sous gaz, un mélange homogène de composants gazeux à l'intérieur du local d'appareillage peut être pris pour hypothèse.

Le Tableau D.12 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations de composants ou produits de décomposition gazeux dans la zone environnante. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:

Un appareillage MT est choisi, dans lequel le CO₂ à une concentration de 90 % est utilisé comme support d'extinction et du gaz d'origine naturelle faiblement décomposé est présent.

V_{eq}	Volume total de gaz des compartiments sous gaz
V_{room}	Volume total du local
p_{re}	Pression de remplissage
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration du composant ou produit de décomposition gazeux
F_{rel}	Taux de fuite relatif admissible
t	Durée de ventilation du local
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$Q = V_{room} / t$	Taux de ventilation du local
$R_{total} = V_{eq} \times p_{re} / p_{am} \times F_{rel}$	Taux de fuite absolu total
$R = R_{total} \times x$	Taux de fuite absolu de composant ou produit de décomposition gazeux
$y = R / Q$	Concentration de composant ou produit de décomposition gazeux dans le local
$S = y / TWA$	Facteur de sécurité du composant ou produit de décomposition gazeux

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-4:2022

Tableau D.12 – Exemple de calcul d'une fuite normale

Composant ou produit de décomposition gazeux		CO	CO ₂
V_{eq}	[m ³]	5	5
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	150	150
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[µl/l (ppmv)]	20 000	900 000
F_{rel}	[%/an]	1	1
t	[année]	0,005	0,005
Q	[m ³ /an]	20 000	20 000
R_{total}	[m ³ /an]	0,075	0,075
R	[m ³ /an]	0,001 50	0,067 5
y	[µl/l (ppmv)]	0,075	3,38
TWA	[µl/l (ppmv)]	35	5 000
S		0,002 14	0,000 675
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $1 < S \leq 3$: il convient de quitter le local d'appareillage dans les 30 min qui suivent. Si $S > 3$: il convient de quitter le local d'appareillage immédiatement. NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres composants ou produits de décomposition gazeux.			

D.9.2.4.3 Fuite anormale

Les défauts sont l'exception, mais ils ne peuvent pas être totalement exclus. Dans ce contexte, le principal type de défaut est une fuite due aux défauts dans les composants qui sont en principe étanches au gaz. Cela peut être dû à un joint endommagé ou à une traversée fissurée. Ces défauts peuvent se traduire par une augmentation des taux de fuite. Dans le cas le plus défavorable, la surpression peut devenir nulle en quelques semaines, quelques jours, voire quelques minutes. Dans ce cas, la quantité de gaz qui fuit dans l'air ambiant dépend de la surpression. Aujourd'hui, les appareillages sous enveloppe métallique à isolation gazeuse étant composés de plusieurs compartiments sous gaz étanches sans connexion de gaz, la quantité de gaz par compartiment est limitée. Dans la plupart des cas, ce type de défauts n'affecte qu'un ou deux compartiments sous gaz.

De même, une erreur humaine (un trou percé dans un compartiment sous gaz, l'ouverture accidentelle d'un couvercle ou le fonctionnement incorrect d'un robinet, par exemple) peut donner lieu à une perte de gaz et à une réduction de la pression à la pression ambiante dans le compartiment sous gaz.

Il s'agit d'un effet à court terme localisé à un endroit précis. La présence d'une personne à cet endroit au moment de la défaillance est le risque le plus important. Dans ce cas, la concentration locale de composants gazeux et de produits de décomposition est provisoirement plus élevée, mais ils se diluent rapidement dans le local d'appareillage et donnent finalement un mélange homogène. Des simulations ont démontré que cela prend de quelques minutes à quelques heures.

Il convient que l'appareillage électrique, affecté par une fuite anormale donnant lieu à une réduction de la pression du gaz isolant à la pression ambiante, soit arrêté et mis à la terre dès

que possible. Il s'agit d'éviter un contournement à la terre imprévu à l'intérieur du compartiment sous gaz, pouvant générer un arc interne.

Le Tableau D.13 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations de composants ou produits de décomposition gazeux dans la zone environnante. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:	
Un appareillage MT est choisi, dans lequel le CO ₂ à une concentration de 90 % est utilisé comme support d'extinction et du gaz d'origine naturelle faiblement décomposé est présent.	
Cet exemple de calcul est le scénario le plus défavorable, dans lequel toute la surpression à l'intérieur du compartiment sous gaz le plus volumineux de l'appareillage électrique est libérée en peu de temps dans le local, en beaucoup moins de temps que celui nécessaire à la ventilation du local. Le calcul ne tient donc pas compte de la durée de ventilation du local.	
Si le taux de fuite est anormal, mais qu'il se trouve toujours dans une plage mesurable de quelques pourcents par jour, il convient de tenir compte de la ventilation, et un calcul similaire à celui présenté en D.9.2.4.2 peut être effectué.	
V_{comp}	Volume total de gaz du compartiment sous gaz le plus volumineux
V_{room}	Volume total du local
p_{re}	Pression de remplissage
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration du composant ou produit de décomposition gazeux
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$V_{\text{tot}} = V_{\text{comp}} \times (p_{\text{re}} - p_{\text{am}}) / p_{\text{am}}$	Volume de fuite total
$V_{\text{leak}} = V_{\text{tot}} \times x$	Volume de fuite du composant ou produit de décomposition gazeux
$y = V_{\text{leak}} / V_{\text{room}}$	Concentration de composant ou produit de décomposition gazeux dans le local
$S = y / TWA$	Facteur de sécurité du composant ou produit de décomposition gazeux

Tableau D.13 – Exemple de calcul d'une fuite anormale

Composant ou produit de décomposition gazeux		CO	CO ₂
V_{comp}	[m ³]	1	1
V_{room}	[m ³]	100	100
p_{re}	[kPa]	150	150
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[μl/l (ppmv)]	20 000	900 000
V_{tot}	[m ³]	0,5	0,5
V_{leak}	[m ³]	0,010	0,450
y	[μl/l (ppmv)]	100	4 500
TWA	[μl/l (ppmv)]	35	5 000
S		2,86	0,900
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $1 < S \leq 3$: il convient de quitter le local d'appareillage dans les 30 min qui suivent. Si $S > 3$: il convient de quitter le local d'appareillage immédiatement. NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres composants ou produits de décomposition gazeux.			

D.9.2.4.4 Maintenance, entretien et réparation à l'intérieur des compartiments sous gaz

S'il s'avère nécessaire, il convient de procéder à des opérations de maintenance, d'entretien ou de réparation sur l'appareillage électrique contenant des gaz d'origine naturelle très faiblement et faiblement décomposés, le gaz peut s'échapper dans l'atmosphère, et les compartiments sous gaz peuvent être ouverts ultérieurement en prenant en considération les mesures de sécurité définies en D.2.2.

Avant d'ouvrir des compartiments sous gaz contenant des gaz d'origine naturelle fortement décomposés, il convient de régénérer le gaz en le rejetant dans l'atmosphère par l'intermédiaire de filtres, de vider le compartiment sous gaz avec une pompe à vide par des filtres, puis de le rincer avec l'air ambiant. Lors de l'ouverture du compartiment sous gaz, de faibles concentrations de produits de décomposition peuvent être encore présentes. il convient d'utiliser un matériel et des outils de sécurité (voir le Tableau D.4).

Le Tableau D.14 présente les résultats d'un exemple de calcul. L'exemple de calcul présente la manière systématique de calculer les concentrations restantes de composants gazeux ou de produits de décomposition dans le compartiment sous gaz après la récupération du gaz. Les résultats dépendent de différents paramètres, et il convient de les considérer séparément pour des installations réelles.

Exemple de calcul:

Un appareillage est choisi, dans lequel le CO₂ à une concentration de 90 % est utilisé comme support d'extinction et du gaz d'origine naturelle faiblement décomposé est présent. Après la récupération complète du gaz, jusqu'à la pression résiduelle p_{res} , et à l'aide de la pompe à vide décrite en D.6.3 ou d'une unité de récupération décrite en D.6.17, le compartiment sous gaz est rempli d'air ambiant et la concentration de composants ou produits de décomposition gazeux restants à l'intérieur du compartiment sous gaz est calculée.

Si le gaz d'origine naturelle est rejeté dans l'atmosphère sans l'aide de la pompe à vide ou d'une unité de récupération, et donc sans remplir le compartiment sous gaz avec l'air ambiant avant l'ouverture, les concentrations de composants ou produits de décomposition gazeux à l'intérieur du compartiment sous gaz ne varient pas et peuvent être nettement supérieures à leurs valeurs TWA.

p_{res}	Pression résiduelle
p_{am}	Pression ambiante
x	Concentration de composant ou produit de décomposition gazeux avant récupération
TWA	Valeur TWA
Étapes du calcul:	
$c = x \times p_{\text{res}} / p_{\text{am}}$	Concentration restante de composant gazeux ou de produit de décomposition à l'intérieur du compartiment sous gaz après récupération
$S = c / TWA$	Facteur de sécurité du composant ou produit de décomposition gazeux

Tableau D.14 – Exemple de calcul pour la maintenance

Composant ou produit de décomposition gazeux		CO	CO ₂
p_{res}	[kPa]	0,5	0,5
p_{am}	[kPa]	100	100
x	[μl/l (ppmv)]	20 000	900 000
c	[μl/l (ppmv)]	100	4 500
TWA	[μl/l (ppmv)]	35	5 000
S		2,86	0,900
Si $S \leq 1$: il convient qu'aucune action ne soit prise. Si $S > 1$: il convient d'éliminer les éventuels produits de décomposition solides du compartiment sous gaz, le cas échéant, et de ventiler suffisamment le compartiment avant de s'en approcher sans protection complète NOTE La méthode de calcul de cet exemple peut également être utilisée pour calculer les taux de fuite et les concentrations d'autres composants ou produits de décomposition gazeux.			