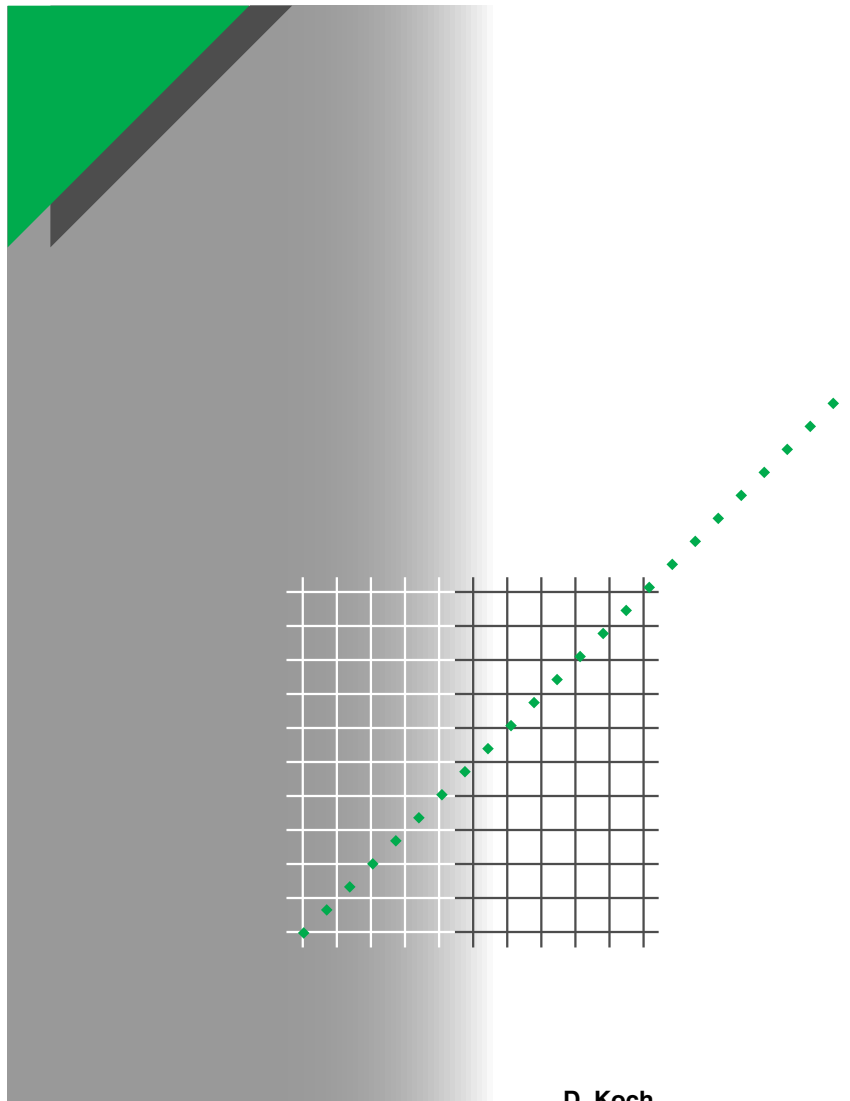


Cahier technique n° 188

Propriétés et utilisations du SF₆ dans les appareils MT et HT



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

D. Koch

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements. Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 188

Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils MT et HT



D. KOCH

Ingénieur diplômé de l'IEG Grenoble en 1979.

Il intègre la même année le groupe Merlin Gerin dans les transmissions HT, d'abord comme directeur technique des disjoncteurs MT, puis comme chef de produit.

Depuis 1995, dans la Direction T & D, il est responsable, au sein de l'équipe de marketing stratégique, de la standardisation, de la technologie et de l'environnement de l'offre T & D.

Il a également en charge du développement géographique en Europe de l'Est.

Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils MT et HT

Les propriétés générales du gaz SF₆ et les sous-produits du SF₆ sont présentés. Un bref historique de l'utilisation du SF₆ dans les appareils est donné. Les effets du SF₆ sur l'environnement sont abordés. Des directives concernant l'utilisation du gaz SF₆ et des appareils remplis de SF₆ en conditions normales et anormales de service sont données.

Le contenu du présent document est basé sur le bulletin technique CEI 61634 intitulé « Appareillage à haute tension — utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre (SF₆) dans l'appareillage HT. ».

Sommaire

1 Introduction	1.1 Bref historique de l'utilisation du SF ₆	p. 4
	1.2 Fabrication du SF ₆	p. 5
	1.3 Autres utilisations du SF ₆	p. 5
2 Propriétés physiques et chimiques du SF₆	2.1 Propriétés physiques	p. 6
	2.2 Propriétés chimiques	p. 8
3 Présentation des appareils isolés au SF₆	3.1 Appareils MT et HT	p. 11
	3.2 Consommation de SF ₆ et quantité d'appareils	p. 12
	3.3 Expérience d'EDF : 20 ans de SF ₆ en MT	p. 13
	3.4 Futures tendances	p. 13
4 Utilisation et manipulation du SF₆ dans les appareils	4.1 Remplissage de SF ₆ neuf	p. 14
	4.2 Fuites dans les appareils remplis de SF ₆	p. 15
	4.3 Maintenance des appareils remplis de SF ₆	p. 15
	4.4 Fin de service des appareils remplis de SF ₆	p. 16
	4.5 Anomalies	p. 16
	4.6 Le SF ₆ et l'environnement	p. 19
5 Conclusion		p. 21
Bibliographie		p. 22

1 Introduction

1.1 Bref historique de l'utilisation du SF₆

C'est en 1900, dans les laboratoires de la Faculté de Pharmacie de Paris, que Moissan et Lebeau réalisèrent pour la première fois la synthèse de l'hexafluorure de soufre. Ayant fait réagir du fluor obtenu par électrolyse sur du soufre, ils constatèrent une réaction fortement exothermique produisant un gaz d'une inertie remarquable.

Progressivement, les principales propriétés physiques et chimiques du SF₆ furent établies. Rappelons notamment les publications de Pridaux (1906), Schlumb et Gamble (1930), Klemm et Henkel (1932-35) et Yest et Clausson (1933) concernant plus particulièrement les caractéristiques chimiques et diélectriques.

Les premières recherches d'applications industrielles furent menées par General Electric Company qui, en 1937, proposa l'utilisation du gaz comme isolant dans les équipements électriques. En 1939, Thomson-Houston fit breveter le principe de l'utilisation du SF₆ pour l'isolement des câbles et des condensateurs.

Après la guerre, les publications et les applications se succédèrent :

- vers 1947, travaux sur l'isolement des transformateurs,
- en 1948, mise au point d'une méthode de fabrication industrielle du SF₆ aux États-Unis, par Allied Chemical Corporation et Pennsalt,

■ vers 1960, commercialisation à grande échelle du SF₆, utilisé dans la construction électrique aux États-Unis et en Europe coïncidant avec l'apparition des premiers disjoncteurs et interrupteurs au SF₆ en haute tension (HT) et très haute tension (THT).

Chez Merlin Gerin, les recherches concernant les possibilités d'utilisation du gaz SF₆ pour l'isolement et la coupure ont débuté vers 1955, en même temps que la sortie des premiers équipements industriels aux États-Unis.

Les premières applications industrielles chez Merlin Gerin sont apparues en THT, puis en moyenne tension (MT) :

- 1964 : premier poste isolé au SF₆, commandé par EDF et mis en service dans la région parisienne en 1966,
- 1967 : lancement des disjoncteurs autonomes FA et remplacement progressif des disjoncteurs à air comprimé largement employés en France et dans le monde depuis les années 40,
- 1971 : l'évolution des besoins de l'industrie conduit Merlin Gerin à lancer le disjoncteur MT Fluarc à coupure dans le SF₆.
- Plus récemment, la coupure dans le SF₆ a été appliquée aux interrupteurs MT, RM6, contacteurs et disjoncteurs, GIS, couvrant l'ensemble des besoins du secteur de la distribution électrique.

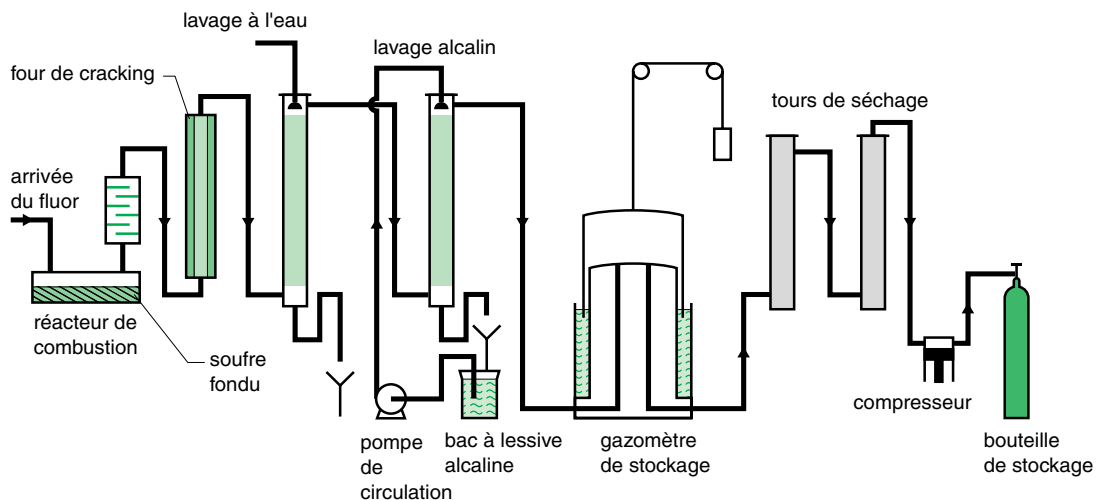


Fig. 1 : Schéma de principe de la synthèse du SF₆ par combinaison directe. La chaîne de purification est nécessaire pour obtenir un gaz de haute pureté. La qualité du SF₆ en sortie est définie par le document CEI 60376 qui spécifie les concentrations d'impuretés admissibles.

1.2 Fabrication du SF₆

Le seul procédé industriel actuellement utilisé est la synthèse de l'hexafluorure de soufre à partir de soufre et de fluor obtenu par électrolyse, selon la réaction exothermique suivante :



Plusieurs fluorures de soufre de valence inférieure sont également produits lors de la réaction, comme SF₄, SF₂, S₂F₂, S₂F₁₀, ainsi que des impuretés dues à la présence d'humidité, d'air et d'anodes de carbone dans les cellules d'électrolyse du fluor. Ces sous-produits sont éliminés par différents procédés de purification (cf. **fig. 1**).

1.3 Autres utilisations du SF₆

Les propriétés exclusives du SF₆ ont conduit à son adoption dans de nombreuses applications scientifiques et industrielles, par exemple :

- applications médicales : isolation électrique pour les appareils médicaux (appareillage de radiodiagnostic par exemple) ou l'instrumentation chirurgicale,
- isolation électrique des appareils scientifiques (microscope électronique, accélérateur de particules comme les générateurs de Van der Graf),

- isolation phonique des fenêtres à double vitrage,
- gaz traceur pour les études d'écoulement de l'air dans les systèmes de ventilation (par exemple dans les mines) ou la haute atmosphère,
- gaz traceur pour la détection des fuites dans les systèmes pressurisés,
- atmosphère spéciale pour usine métallurgique (transformation de l'aluminium et du magnésium) ou à usage militaire.

2 Propriétés physiques et chimiques du SF₆

2.1 Propriétés physiques

Le SF₆ est l'un des gaz les plus lourds connus (cf. **fig. 2**). Sa masse spécifique à 20 °C, sous une pression de 0,1 Mpa (c'est-à-dire une atmosphère), est égale à 6,139 kg/m³, soit cinq fois plus que celle de l'air. Sa masse moléculaire

est de 146,06. C'est un gaz incolore et inodore. Le SF₆ n'existe à l'état liquide que sous pression.

Équation d'état

L'hexafluorure de soufre se comporte comme un gaz parfait jusqu'à une température de 1200 K environ. Son équation d'état est du type Beattie-Bridgeman :

$$pv^2 = RT(v + b) - a \quad \text{où :}$$

p = pression (Pa)

v = volume (m³.mol⁻¹)

R = constante du gaz idéal (8,3143 J.mol⁻¹.K⁻¹)

T = température absolue (K)

$a = 15,78 \times 10^{-6} (1 - 0,1062 \times 10^{-3} v^{-1})$

$b = 0,366 \times 10^{-3} (1 - 0,1236 \times 10^{-3} v^{-1})$

Relation pression-température

La variation de la pression en fonction de la température est linéaire et relativement faible dans la gamme des températures de service (- 25 à + 50 °C), (cf. **fig. 3**).

Densité	6,14 kg.m ⁻³
Conductivité thermique	0,0136 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Point critique :	
■ Température	45,55 °C
■ Densité	730 kg.m ⁻³
■ Pression	3,78 MPa
Vitesse du son	136 m.s ⁻¹
Indice de réfraction	1,000783
Chaleur de formation	-1221,66 kJ.mol ⁻¹
Chaleur spécifique	96,6 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹

Fig. 2 : Caractéristiques physiques principales du SF₆ à la pression atmosphérique, à une température de 25 °C.

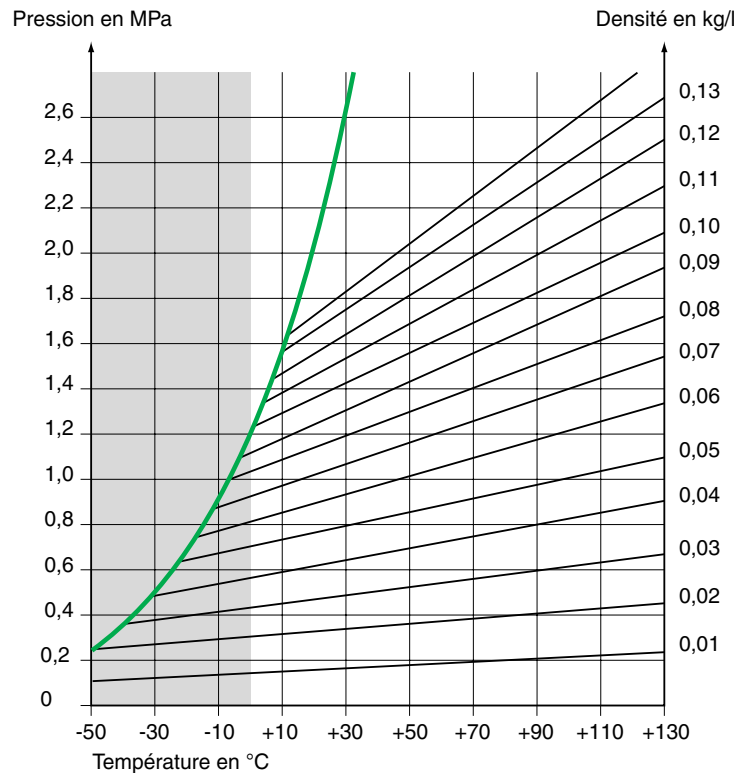


Fig. 3 : Courbes de pression de vapeur et lignes isodenses de gaz SF₆.

Chaleur spécifique

La chaleur spécifique du SF₆ rapportée à l'unité de volume est 3,7 fois plus élevée que celle de l'air. Ceci a des conséquences importantes pour la réduction des échauffements au sein de l'appareillage électrique.

Conductivité thermique

La conductivité thermique du SF₆ est inférieure à celle de l'air, mais son coefficient global de transfert de chaleur, tenant compte en particulier de la convection, est excellent, voisin de celui des gaz comme l'hydrogène ou l'hélium et plus élevé que celui de l'air.

À haute température, la courbe de conductivité thermique du SF₆ (cf. fig. 4) souligne l'une des qualités remarquables de ce gaz concernant l'extinction de l'arc par refroidissement thermique. Le pic de conductivité thermique correspond à la température de dissociation de la molécule de SF₆ (2100 à 2500 K) qui s'accompagne, lors de la reformation de la molécule à la périphérie de l'arc, d'une absorption importante de chaleur favorisant les échanges rapides de chaleur du milieu chaud vers le milieu froid.

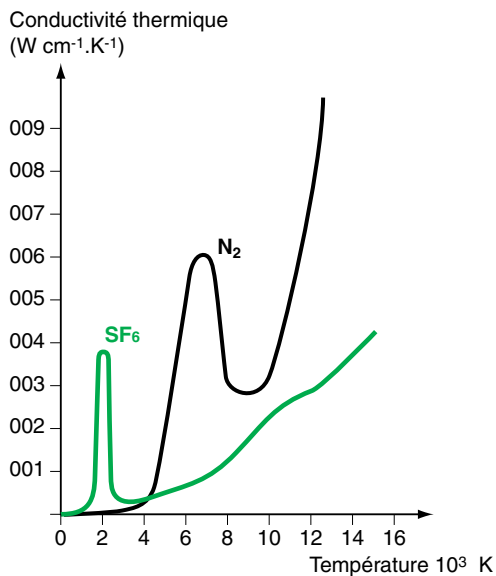
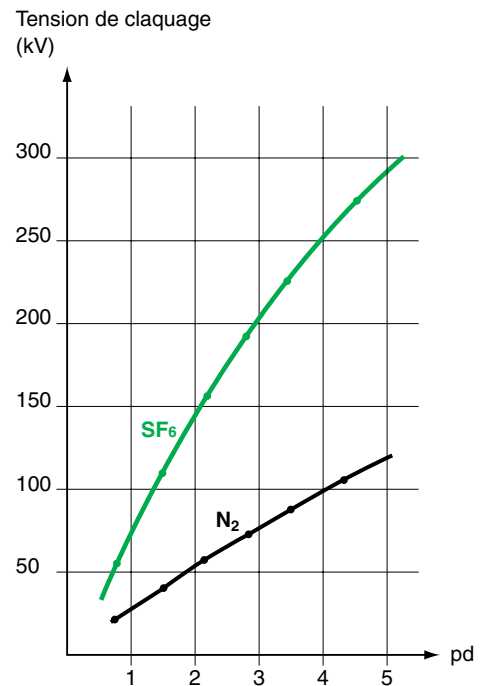


Fig. 4 : Conductivité thermique du SF₆ et de l'azote.

Caractéristiques électriques

Les excellentes propriétés diélectriques du SF₆ sont dues au caractère électronégatif de la molécule qui possède une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds et peu mobiles, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique. La rigidité diélectrique du SF₆ est 2,5 fois plus élevée que celle de l'air dans les mêmes conditions.



produit pd:

p : pression (MPa)

d : distance des électrodes (10⁻³ m)

Fig. 5 : Tension de claquage entre des sphères de 5 cm de diamètre en fonction du produit pd.

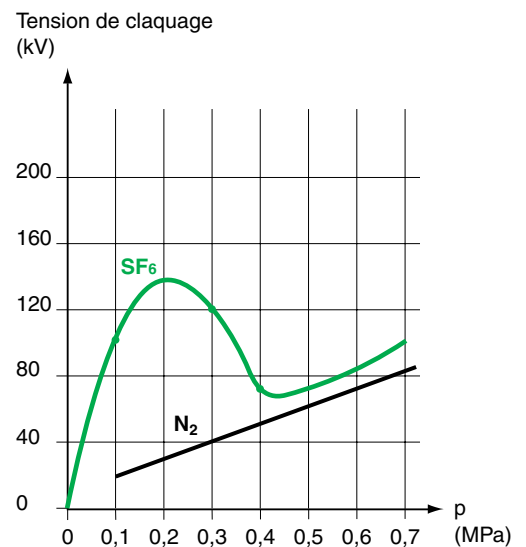


Fig. 6 : Tension de claquage en fonction de la pression pour un champ non uniforme.

La courbe (cf. fig. 5) illustre clairement l'avantage du SF₆ sur l'azote comme diélectrique. Pour les champs non uniformes (cf. fig. 6), on observe une tension de claquage maximale pour une pression voisine de 0,2 MPa.

Grâce à sa basse température de dissociation et à son énergie de dissociation élevée, le SF₆ constitue un excellent gaz d'extinction d'arc.

Lorsqu'un arc électrique se refroidit dans le SF₆, il demeure conducteur jusqu'à une température relativement basse, ce qui minimise le découpage du courant avant le zéro du courant et évite ainsi les surtensions élevées.

Pour plus d'informations, consulter le Cahier Technique Merlin Gerin n° 145.

La **figure 7** présente les caractéristiques électriques principales du SF₆.

Conductibilité sonore

La vitesse du son dans le SF₆ représente le tiers de celle dans l'air, ce qui fait du SF₆ un isolant phonique.

Champ de claquage en fonction de la pression	89 V.m ⁻¹ .Pa ⁻¹
Constante diélectrique relative à 25 °C, à une pression absolue de 1 bar	1,00204
Facteur de perte (tan δ) à 25 °C, à une pression absolue de 1 bar	< 2x10 ⁻⁷
Coefficient d'ionisation	α=A p E/(p - B) α : (m-1) E : (V.m-1) p : (Pa) A=2,8x10 ⁻² .V ² B=89 V.m ⁻¹ .Pa ⁻¹

Fig. 7 : Caractéristiques électriques principales du SF₆.

2.2 Propriétés chimiques

L'hexafluorure de soufre correspond à la valence maximale du soufre. Sa structure moléculaire est celle d'un octaèdre dont les six sommets sont occupés par des atomes de fluor.

La section efficace de collision de la molécule de SF₆ est de 4,77 Å. Les six liaisons sont covalentes, ce qui explique la stabilité exceptionnelle de ce composé :

- le SF₆ peut être chauffé sans décomposition jusqu'à 500 °C en l'absence de métaux catalytiques,
- le SF₆ est ininflammable,
- l'hydrogène, le chlore et l'oxygène sont sans action sur lui,
- le SF₆ est insoluble dans l'eau,
- il n'est pas attaqué par les acides.

L'absence de toxicité du SF₆ à l'état pur est confirmée régulièrement par un test sur les livraisons de gaz neuf, dans lequel des souris sont placées pendant 24 heures dans une atmosphère contenant 80 % de SF₆ et 20 % d'oxygène (test biologique recommandé par la norme CEI 60376).

Produits de décomposition par l'arc

À la température de l'arc électrique, qui peut atteindre 15 000 K, une petite proportion de SF₆ est décomposée. Les produits de décomposition se forment en présence :

- d'un arc électrique engendré par l'ouverture des contacts le plus souvent constitués d'alliages à base de tungstène, cuivre ou nickel, et contenant des résidus d'oxygène et d'hydrogène,
- d'impuretés dans le SF₆, comme de l'air, du CF₄ ou de la vapeur d'eau,
- de composants isolants constitués de matières plastiques à base de carbone, d'hydrogène ou de silice,
- d'autres matériaux métalliques ou non constituant l'appareil.

Ceci explique pourquoi les produits de décomposition solides ou gazeux contiennent, en dehors du soufre et du fluor, des éléments comme le carbone, le silicium, l'oxygène, l'hydrogène, le tungstène, le cuivre, etc.

Les principaux sous-produits gazeux, identifiés par les laboratoires qui ont travaillé sur ce sujet en associant la chromatographie en phase gazeuse et la spectrographie de masse, sont :

- l'acide fluorhydrique HF
- le dioxyde de carbone CO₂
- l'anhydride sulfureux SO₂
- le tétrafluorure de carbone CF₄
- le tétrafluorure de silicium SiF₄
- le fluorure de thionyle SOF₂
- le fluorure de sulfuryle SO₂F₂
- le tétrafluorure de soufre SF₄
- le décafluorure de soufre S₂F₁₀

Certains de ces sous-produits peuvent être toxiques, mais sont aisément adsorbés sur des matériaux comme l'alumine activée ou les tamis moléculaires. Certains sous-produits se forment également en quantités infimes (S₂F₁₀).

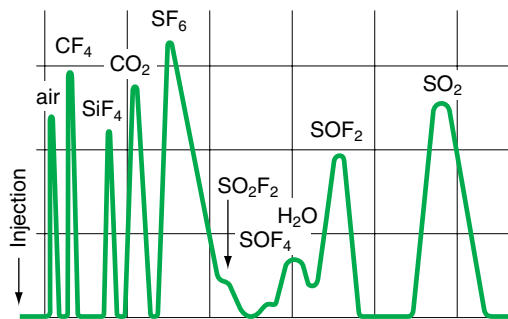
Si l'adsorbant (tamis moléculaire ou alumine activée) est présent dans l'appareil en quantité suffisante, le degré de corrosion dû aux produits de décomposition du SF₆ (HF notamment) est très faible voire négligeable. Ceci s'explique par l'action rapide et efficace des adsorbants qui empêchent les gaz corrosifs de demeurer assez longtemps pour réagir avec les autres matériaux présents.

Néanmoins, pour éviter tout risque, Merlin Gerin prohibe l'utilisation de certains matériaux et éléments ayant présenté des signes de dégradation à l'issue de tests prolongés, à des niveaux de pollution élevés, en l'absence d'adsorbants.

Analyse du gaz prélevé sur les appareils

De nombreux paramètres peuvent être étudiés à travers l'analyse du gaz et de ses produits de décomposition. Nous ne retiendrons ici que l'influence des adsorbants, en particulier celle des tamis moléculaires. Le chromatogramme **a** de la **figure 8** représente les résultats de l'analyse du gaz prélevé dans le pôle d'un appareil prototype en l'absence d'adsorbant. Le chromatogramme **b** de la **figure 8** représente les résultats de l'analyse du gaz prélevé dans le pôle d'un même appareil, soumis aux mêmes contraintes électriques, mais en présence d'un tamis moléculaire.

a - Chromatogramme sans adsorbant



b - Chromatogramme avec adsorbant (tamis moléculaire)

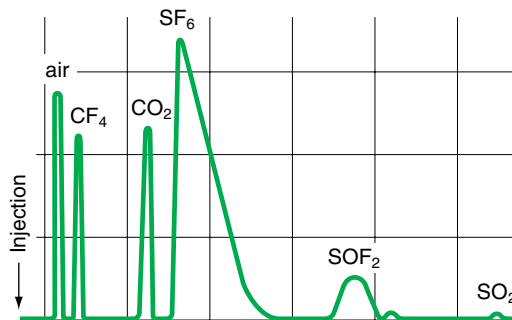


Fig. 8 : Analyse du gaz prélevé sur les appareils.

Le tableau de la **figure 9** permet de comparer les proportions de produits de décomposition gazeux dans les deux cas. L'efficacité de l'adsorbant apparaît clairement.

Données épidémiologiques du SF₆ pur

Le SF₆ pur ne présente aucun effet écotoxique, mutagène ou carcinogène (génomotoxique ou épigénétique) sur la santé. Les tests effectués

Gaz	Sans adsorbant (%)	Avec adsorbant (tamis moléculaire) (%)
Air	0,17	0,03
CF ₄	2,83	2,80
SiF ₄	2,88	0,25
CO ₂	0,24	—
SF ₆	résidus	résidus
SO ₂ F ₂	0,12	—
SOF ₂	3,95	traces
H ₂ O + HF	0,20	0,05
SO ₂	2,90	traces

Fig. 9 : Résultats d'analyse du SF₆ prélevé sur les disjoncteurs avec et sans tamis moléculaire.

chez l'animal montrent l'absence d'effet adverse en atmosphère contenant jusqu'à 80 % de SF₆ pour 20 % d'O₂.

Même s'il est possible par conséquent que l'atmosphère ambiante contienne une proportion élevée de SF₆ sans effet délétère, une concentration maximale de 1000 ppmv (6000 mg/m³) a été définie sur les lieux de travail où le personnel passe jusqu'à huit heures quotidiennement, cinq jours par semaine.

Cette VME (valeur limite de moyenne d'exposition) correspond à celle de gaz inoffensifs normalement absents de l'atmosphère.

En raison du procédé de fabrication, le SF₆ commercialisé n'est pas parfaitement pur. La manipulation du SF₆ neuf nécessite donc l'adoption de procédures pour garantir que la concentration maximale spécifiée ne sera pas dépassée.

Les taux maximum d'impuretés sont spécifiés par la norme CEI 60376. Ces taux sont indiqués dans le tableau de la **figure 10**.

Impureté	Maximum admissible
CF ₄	500 ppm (en masse)
O ₂ , N ₂	500 ppm (en masse)
Eau	15 ppm (en masse)
HF	0,3 ppm (en masse)
Fluorures hydrolysables	1,0 ppm (en masse) exprimés en HF

Fig. 10 : Concentrations d'impuretés admissibles maximales dans le SF₆ neuf.

Appréciation du risque sanitaire posé après formation d'arc dans le SF₆

Le niveau de risque sanitaire lié à une exposition à du SF₆ usagé dépend de plusieurs facteurs :

- degré de décomposition du SF₆ et types de produits de décomposition présents,
- degré de dilution du SF₆ usagé dans l'atmosphère ambiante,
- durée d'exposition de l'individu à l'atmosphère contenant le SF₆ usagé.

Définition de la VME (Valeur limite de moyenne d'exposition)

Les gaz potentiellement toxiques sont associés à un paramètre connu sous le nom de VME, exprimé en concentration rapportée à l'air, habituellement en parties par million en volume (ppmv). Cette VME est une moyenne dans le temps des concentrations auxquelles aucun effet adverse sur la santé n'est attendu à long terme, pour une exposition quotidienne de 8 heures, jusqu'à 40 heures par semaine.

Évaluation de la toxicité sur la base de la concentration de SOF₂

Bien que le SF₆ usagé contienne un mélange d'agents chimiques, un composant en particulier est déterminant pour la toxicité. Il s'agit d'un produit de décomposition gazeux, le fluorure de thionyle SOF₂. Le rôle déterminant de ce composé résulte de son taux de production élevé (volume formé par énergie d'arc, exprimé en litres / kJ) par rapport à ceux des autres produits de décomposition, conjugué à son taux de toxicité. La VME du SOF₂ est de 1,6 ppmv.

Le SOF₂ peut réagir encore avec l'eau pour produire de l'anhydride sulfureux SO₂ et de l'acide fluorhydrique HF. Cependant, en raison de concentrations et de VME voisines, la toxicité globale du SOF₂ est similaire à celle de ses produits d'hydrolyse.

Le tableau de la **figure 11** compare les trois produits de décomposition :

- Fluorure de thionyle SOF₂
- Fluorure de sulfuryle SO₂F₂
- Décafluorure de soufre S₂F₁₀

Les deux premiers représentent les produits de décomposition les plus abondants suite à la formation d'arc dans le SF₆ alors que le dernier est reconnu comme le plus toxique.

Pour présenter un effet toxique, un agent chimique doit être présent en quantité suffisante par rapport à sa VME. L'« indice de risque » de ce tableau donne une indication des contributions relatives des trois produits de décomposition sur la toxicité globale. Dans un échantillon typique de SF₆ après formation d'arc, la contribution du SOF₂ à la toxicité est près de 200 fois supérieure à celle du SO₂F₂ et près de 10 000 fois supérieure à celle du S₂F₁₀. La contribution du S₂F₁₀ est manifestement négligeable, comme peut l'être celle du SO₂F₂.

Dans le chapitre 4, les quantités de SOF₂ produites dans différentes circonstances seront calculées et utilisées pour estimer le niveau des risques encourus par les personnes, en prenant en compte le degré de dilution du SF₆ usagé dans l'atmosphère ambiante et la durée d'exposition probable.

	Fluorure de thionyle SOF ₂	Fluorure de sulfuryle SO ₂ F ₂	Décafluorure de soufre S ₂ F ₁₀
Taux de production (l/kJ)	3,7 x 10 ⁻³	0,06 x 10 ⁻³	2,4 x 10 ⁻⁹
VME (ppmv)	1,6	5	0,01
Taux de production en fonction de SOF ₂ = Pr	1	0,016	0,65 x 10 ⁻⁶
Toxicité en fonction de SOF ₂ = Tr	1	0,32	160
Indice de risque = Pr x Tr	1	5,12 x 10 ⁻³	0,104 x 10 ⁻³

Fig. 11 : Comparaison de trois produits de décomposition du SF₆ par l'arc.

3 Présentation des appareils isolés au SF₆

3.1 Appareils MT et HT

Comme indiqué précédemment, les fabricants mettent à profit la rigidité diélectrique ou/et les caractéristiques de coupure remarquables de ce gaz lors de la conception de leurs appareils. Utilisations principales du SF₆ dans les appareils MT et HT et leur importance résumées dans le tableau de la **figure 12**.

Usage du SF ₆	Appareils	MT (≤ 52 kV)	HT (> 52 kV)
Isolement	HT (GIS)	+++	+++
	Compâct MT (RM6)	+++	N/D
Coupure	Disjoncteur	++	+++
	Interrupteur	++	+++

Part du marché mondial :

Faible +
Moyenne ++
Élevée +++

Fig. 12 : La place du SF₆ dans les appareils.

En HT, le SF₆ sera bientôt, au plan mondial, la seule technologie utilisée pour la conception des GIS (cf. **fig. 13**) et des disjoncteurs (cf. **fig. 14**) ; les anciennes technologies à l'huile ou à air comprimé sont en passe de disparaître en raison des nombreux avantages offerts par le SF₆.

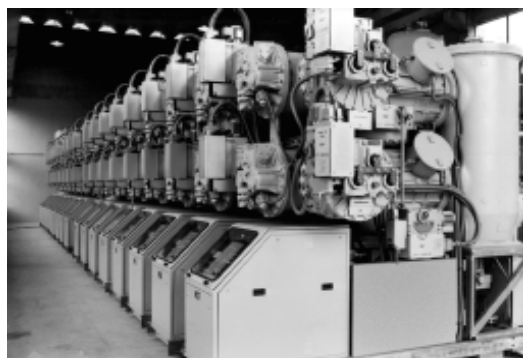


Fig. 13 : GIS (Merlin Gerin).



Fig. 14 : Disjoncteur pour poste HT (disjoncteur SB6 - Merlin Gerin).

En MT, lorsque la compacité des appareils est un impératif, le SF₆ est la seule solution proposée (GIS, RM6) (cf. **fig. 15 et 16**). Pour les éléments démontables cependant, la technologie à SF₆ partage le marché avec la technologie à air pour les interrupteurs à coupure en charge, mais la part de marché de la technologie à air diminue rapidement au profit du SF₆ ou de la technologie à vide dans le cas des disjoncteurs. Les disjoncteurs à SF₆ et à vide représentent des solutions modernes dont la part va croissante alors que l'influence de la technologie à faible volume d'huile se réduit.



Fig. 15 : Equipement compact pour la distribution MT ; la sortie, protégée par le disjoncteur, est placée au centre (RM6 - Merlin Gerin).

Pour être complet en termes d'application, nous devons mentionner les transformateurs isolés au SF₆, principalement utilisés au Japon, et les câbles HT isolés au gaz, qui emploient une technologie tout à fait similaire à la technologie GIS HT.



Fig. 16 : Cellule de disjoncteur MT (SM6 - Merlin Gerin).

3.2 Consommation de SF₆ et quantité d'appareils

La consommation mondiale de SF₆ se répartit entre les équipements électriques et les applications non électriques : la CEI estime que la consommation annuelle totale est de 5000 à 8000 tonnes, répartie de façon à peu près équivalente entre ces deux types d'utilisation.

Pour appréhender la proportion relative de SF₆ en MT et HT, il est utile d'estimer le parc installé total dans le monde et les quantités annuelles mises en service (cf. les tableaux de la **figure 17**).

a - Appareils MT

	Masse de SF ₆ par unité (kg)	Parc total installé		Appareils supplémentaires installés chaque année	
		Quantité	Masse de SF ₆ (t)	Quantité	Masse de SF ₆ (t)
RM6/ interrupteurs	0,6	3 000 000	1850	240 000 RM6 + 70 000 interrupt.	140 8
GIS	6	50 000	300	7000	42
Disjoncteur	0,3	500 000	150	40 000	17
Total	—	—	2000 - 2500	—	≈ 200

b - Appareils HT

	Masse de SF ₆ par unité (kg)	Parc total installé		Appareils supplémentaires installés chaque année	
		Quantité	Masse de SF ₆ (t)	Quantité	Masse de SF ₆ (t)
GIS	500	20.000	10 000	3000	1500
Disjoncteur type ouvert	50	100 000	5000	8000	400
Câbles isolés au gaz		30 000 m	1000	3000 m	100
Total	—	—	20 000	—	≈ 2000

Fig. 17 : Taille des marchés du SF₆ en MT et HT.

Ces tableaux illustrent clairement que l'utilisation du SF₆ est prédominante en HT : 90 % du volume de SF₆ utilisé dans les appareils sont destinés aux applications HT, et 10 % seulement

aux applications MT. En MT, la consommation de SF₆ concerne principalement les RM6-interrupteurs et GIS ; la part occupée par les disjoncteurs MT étant quasiment négligeable.

3.3 Expérience d'EDF : 20 ans de SF₆ en MT

EDF est probablement la seule compagnie de distribution d'électricité ayant une telle expérience : 20 ans d'expérience du SF₆ dans les disjoncteurs et les interrupteurs MT avec un parc Merlin Gerin installé de plus de 20 000 disjoncteurs et 200 000 interrupteurs de type modulaire ou compact (chiffres de 1995).

EDF a récemment effectué une vérification complète de certains de ses plus anciens appareillages ayant les nombres d'heures de service les plus élevés. Des tests de court-circuit, des diélectriques, et d'échauffement, des mesures d'étanchéité et d'endurance mécanique, d'usure des contacts et d'analyse des gaz, etc., ont été effectués pour estimer la durée de service restante.

Les résultats de ces tests ont été publiés par l'IEE en 1994 et communiqués lors de la conférence CIREC de 1995. Plus précisément,

concernant les estimations de l'usure des disjoncteurs, les mesures des contacts ont montré une usure maximale de 25 %. Une analyse des gaz a aussi été effectuée pour évaluer la toxicité potentielle dans deux cas de figure différents : fuite standard et dégagement accidentel dû à un défaut.

- Dans le premier cas, les concentrations de sous-produits dans l'appareil sont extrêmement basses (environ 10 000 fois inférieures à la VME).
- Dans le second cas, qui se produit de façon exceptionnelle, les concentrations de sous-produits demeurent bien en deçà des valeurs représentant un danger.

Il apparaît par conséquent que la durée de service potentielle des appareils à SF₆ en conditions réelles de service sur site est d'au moins 30 ans.

3.4 Futures tendances

Les appareils à SF₆ répondent totalement aux attentes de l'industrie en termes de compacité, de fiabilité, de maintenance réduite, de sécurité des personnes, de durée de service, etc. On peut s'attendre à l'avenir à une poursuite de la diminution de l'énergie mécanique grâce à la maîtrise de nouveaux principes de coupure comme une combinaison de l'arc tournant et de l'auto-expansion (cf. **fig. 18**) aboutissant à une fiabilité accrue (cf. Cahier Technique n° 171). Les pressions de remplissage diminueront également, contribuant ainsi à une sécurité optimale des personnes. Concernant la maintenance, nous pouvons envisager des fonctions diagnostiques capables de suivre, en temps réel, l'état des appareils et de communiquer ces informations à l'utilisateur lorsque des interventions de maintenance sont nécessaires.

Concernant l'étanchéité, on peut s'attendre à un développement des appareils HT à taux de fuite plus faibles, de l'ordre de 0,1 à 0,5 % par an. Le CIGRE WG 23.10 travaille à la rédaction d'un guide de recyclage du SF₆, couvrant la définition de la pureté du SF₆ destiné à être réutilisé dans l'équipement énergétique. Ainsi, Merlin Gerin envisage l'utilisation du SF₆ en cycle fermé, ce qui contribuera à minimiser les émissions dans l'atmosphère.



Fig. 18 : Disjoncteur LF Merlin Gerin.

4 Utilisation et manipulation du SF₆ dans les appareils

Ce chapitre a été écrit pour répondre aux préoccupations de l'utilisateur concernant les effets éventuels du gaz SF₆ et de ses produits de décomposition sur la sécurité des

personnes et l'intégrité de l'environnement. Pour plus d'informations, consulter le bulletin technique CEI 61634.

4.1 Remplissage de SF₆ neuf

Le SF₆ neuf est fourni en bouteilles sous forme liquide. La pression du gaz SF₆ au-dessus du liquide est de 22 bars environ. Le SF₆ neuf doit être conforme à la norme CEI 60376 qui spécifie les limites des concentrations d'impuretés.

Le SF₆ neuf peut être manipulé à l'extérieur sans précautions particulières. Mais lorsqu'il est manipulé à l'intérieur il faut considérer les points suivants.

- La VME du SF₆ neuf est de 1000 ppmv, ce qui signifie que les travailleurs peuvent être exposés à une concentration moyenne allant jusqu'à 1000 ppmv pendant huit heures par jour et cinq jours par semaine. La VME n'est pas basée sur la toxicité potentielle, il s'agit plutôt d'un paramètre attribué aux gaz normalement absents de l'atmosphère.
- Une température supérieure à 500 °C ou la présence de certains métaux à une température supérieure à 200 °C provoque la décomposition du SF₆. À une température seuil, cette décomposition peut être extrêmement lente. Dans

une zone où l'atmosphère peut contenir du SF₆ il ne faut donc pas fumer ou souder (excepté en atmosphère neutre), ni utiliser une flamme nue ou d'autres sources de chaleur dont la température est proche des températures seuils.

Dans tous les cas il faut veiller à :

- respecter les précautions d'usage concernant la manipulation des bouteilles de gaz sous pression. Par exemple, un brusque dégagement de gaz comprimé s'accompagne d'un abaissement de la température pouvant entraîner une congélation rapide. Le personnel exposé à ce type de risque doit porter des gants calorifugés.
- respecter les consignes du fabricant pour remplir l'appareil de SF₆ neuf afin :
 - de s'assurer que la qualité du SF₆ présent à l'intérieur de l'appareil est adéquate,
 - d'éliminer le risque de surpression dans l'enceinte en cours de remplissage.
- éviter tout dégagement de SF₆ dans l'atmosphère lors du remplissage.

Étude de cas en HT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		700
B	Volume de l'enceinte disjoncteurs (m ³)		0,5
C	Pression de remplissage (Mpa)		0,5
D	Volume de SF ₆ /disjoncteur (m ³)	B x C	0,25
E	Nombre de disjoncteurs		7
F	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
G	Tension de l'arc (V)		500
H	Durée de l'arc (s)		0,015
I	Énergie de l'arc (1 claquage/1 pôle) (kJ)	F x G x H	236,25
J	Énergie de l'arc (3 claquages/3 pôles) (kJ)	9 x I	2126
K	Taux de production de SOF ₂ (l/kJ)		3,7 x 10 ⁻³
L	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	K x J	7,87
M	Quantité totale de SOF ₂ (l)	E x L	55,07
N	Taux de fuite typique (% annuel)		1
P	Volume de SOF ₂ dégagé en 1 an (l)	M x N/100	0,55
Q	Concentration au bout d'1 an (ppmv)	P/A x 10 ³	0,79

Fig. 19 : Fuite de SF₆ dans un poste HT (145 kV) d'intérieur.

4.2 Fuites dans les appareils remplis de SF₆

Cette section examine les implications de fuites de gaz SF₆ et de produits de décomposition gazeux dans l'atmosphère ambiante en intérieur. La toxicité potentielle de l'atmosphère est calculée d'après la concentration de fluorure de thionyle SOF₂.

Deux études de cas (HT et MT) sont présentées. Dans les deux cas, l'hypothèse la plus défavorable a été retenue :

- le local des appareils est étanche à l'atmosphère extérieure, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune ventilation,
- le local des appareils contient 7 et 15 disjoncteurs respectivement,
- les effets des adsorbants dans les enceintes à interrupteurs sont négligés,
- les disjoncteurs ont chacun interrompu leur courant de défaut nominal à trois reprises,

■ le taux de production du SOF₂ est de $3,7 \times 10^{-3}$ litres par kJ d'énergie d'arc (valeur la plus fréquemment citée dans la presse scientifique). Les tableaux des **figures 19 et 20** rassemblent les données et les calculs correspondants.

Les résultats montrent, dans les deux cas, que la VME du SOF₂ (1,6 ppmv) n'est pas atteinte au bout d'une année, au taux de fuite maximal, dans un local étanche. En réalité, une ventilation normale diluerait plus encore le SOF₂ présent jusqu'à une concentration négligeable de SOF₂.

Par conséquent une « fuite normale »* d'appareils contenant du SF₆ usagé ne présente aucun risque pour la santé.

(*) fuite résultant du vieillissement des matériaux ou de phénomènes physiques naturels (diffusion, fluage).

4.3 Maintenance des appareils remplis de SF₆

Les appareils MT scellés ne nécessitent aucune maintenance des éléments à l'intérieur des enceintes à SF₆ et ne sont, par conséquent, pas abordés dans cette section.

Cependant certaines conceptions de GIS MT peuvent nécessiter une maintenance et la plupart des types de disjoncteurs HT doivent faire l'objet d'une maintenance régulière. Il faut aussi noter que pour l'extension d'un tableau GIS, MT ou HT la vidange du SF₆ peut être nécessaire.

La réglementation locale et les consignes des fabricants prescrivent les méthodes de travail de

sécurité à appliquer dans ces circonstances. Ces prescriptions, communes, soulignent les précautions à prendre suivantes.

- Pour vidanger du SF₆ susceptible de contenir des produits de décomposition.
- Ne pas respirer le SF₆ évacué d'un appareil,
- Ne pas l'évacuer dans l'atmosphère ambiante, mais le recueillir dans un récipient de stockage. en cas d'impossibilité, porter un masque anti-vapeurs muni d'un filtre capable d'éliminer les gaz décrits au paragraphe « Produits de décomposition par l'arc ».

Étude de cas en MT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		120
B	Volume de l'enceinte à disjoncteurs (m ³)		45×10^{-3}
C	Pression de remplissage (Mpa)		0,3
D	Volume de SF ₆ /disjoncteur (m ³)	B x C	$13,5 \times 10^{-3}$
E	Nombre de disjoncteurs		15
F	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
G	Tension de l'arc (V)		200
H	Durée de l'arc (s)		0,015
I	Énergie de l'arc (1 claquage/1 pôle) (kJ)	F x G x H	94,5
J	Énergie de l'arc (3 claquages/3 pôles) (kJ)	9 x I	850,5
K	Taux de production de SOF ₂ (l/kJ)		$3,7 \times 10^{-3}$
L	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	K x J	3,147
M	Quantité totale de SOF ₂ (l)	E x L	47,2
N	Taux de fuite typique (% annuel)		0,1
P	Volume de SOF ₂ dégagé en 1 an (l)	M x N/100	0,0472
Q	Concentration au bout d'1 an (ppmv)	P/A x 10 ³	0,39

Fig. 20 : Fuite de SF₆ dans un poste MT (12 kV) d'intérieur.

- Avant d'ouvrir les enceintes
- Les vidanger de façon à laisser le moins de gaz SF₆ résiduel possible. Dans certains cas, le lavage des enceintes à l'azote ou à l'air sec est recommandé avant l'ouverture. Dans tous les cas, le personnel doit être conscient de la présence de SF₆ résiduel lors de l'ouverture initiale des enceintes et porter un masque anti-vapeurs en permanence.
- La ventilation du lieu de travail doit être appropriée pour évacuer rapidement les gaz dégagés.
- Vis-à-vis des poudres de fluorure métallique chimiquement plus actives en présence

d'humidité, il importe de les maintenir à l'état sec avant et pendant leur élimination. De fines poussières peuvent rester en suspension dans l'air pendant une durée prolongée ; en leur présence des masques munis de filtres anti-poussières submicroniques doivent être utilisés et les yeux doivent être tout particulièrement protégés.

- Emballer les éléments, les fluorures métalliques pulvérulents et les adsorbants éliminés des appareils en service dans des récipients étanches afin de les traiter ultérieurement.

4.4 Fin de service des appareils remplis de SF₆

Les appareils remplis de SF₆ retirés du service peuvent être traités afin de neutraliser les produits de décomposition résiduels après vidange du SF₆. Pour des raisons environnementales, le SF₆ usagé ne doit pas être relâché dans l'atmosphère, (voir le paragraphe « Le SF₆ et l'environnement »). La nécessité de son traitement dépend du degré de décomposition. Le tableau de la **figure 21** indique les degrés de décomposition attendus.

Procédure générale

Avant traitement des appareils, le SF₆ doit être vidangé et stocké pour être recyclé. Les appareils doivent être ensuite traités conformément aux normes et selon degré de décomposition attendu. Après traitement, les appareils peuvent être détruits comme des déchets ordinaires en respectant la réglementation en vigueur, par exemple dans une décharge contrôlée, ou recyclés pour récupérer les métaux. Les solutions chimiques utilisées lors

du processus de neutralisation peuvent être éliminées comme des déchets ordinaires.

Le traitement des surfaces au contact du SF₆

En cas de décomposition moyenne à élevée il est recommandé de neutraliser les surfaces internes des enceintes contenant le gaz à l'aide d'une solution de chaux (oxyde de calcium) préparée en diluant 1 kg de chaux dans 100 l d'eau. Remplir l'enceinte à traiter avec la solution de chaux et la laisser agir pendant 8 heures, si possible. S'il s'avère nécessaire ensuite de travailler sur l'enceinte, la laver tout d'abord à l'eau claire.

Lorsque le remplissage est impossible pour des raisons pratiques (enceinte de grandes dimensions), éliminer les fluorures pulvérulents à l'aide d'un aspirateur muni d'un filtre adéquat pour les neutraliser séparément. Laver ensuite les surfaces internes avec une solution de chaux et laisser agir au moins une heure avant de les rincer à l'eau claire.

Application	Degré de décomposition du SF ₆ attendu
Interrupteur à coupure en charge MT (GIS et RM6)	de zéro à quelques dixièmes de pourcent ■ aucun dépôt pulvérulent visible
Disjoncteur MT et HT	moyen : jusqu'à quelques pourcent ■ légers dépôts pulvérulents
Toute enceinte où s'est produit anormalement un arc	élevé : peut dépasser 10 % ■ dépôts pulvérulents moyens à importants

Fig. 21 : Niveaux de décomposition de SF₆ attendus pour différents types d'appareils.

4.5 Anomalies

Cette section concerne l'évaluation des risques encourus par les personnes à la suite d'une anomalie aboutissant à un dégagement incontrôlé de gaz SF₆ dans l'atmosphère. Ces anomalies, qui ne se produisent que très rarement, sont :

- un défaut d'étanchéité de l'enceinte à SF₆,
- défaut interne résultant d'une formation d'arc incontrôlée à l'intérieur de l'enceinte à SF₆,
- incendie externe entraînant une fuite anormale.

Fuite anormale

La méthode d'évaluation des risques est similaire à celle utilisée à la section « Fuites dans les appareils remplis de SF₆ » qui concerne les fuites normales. Les mêmes données d'études de cas seront reprises pour les situations en HT et MT. Dans les calculs qui suivent, nous faisons l'hypothèse que la totalité du SF₆ présent dans un disjoncteur se dégage soudainement et, comme précédemment, que le local est étanche et la ventilation inopérante.

Ainsi, dans un poste HT, si la totalité du SF₆ contenu dans un disjoncteur s'échappait, la concentration de SOF₂ atteindrait 9,0 ppmv, soit environ 6 fois la VME (cf. fig. 22). En pratique, le capteur de pression installé sur le disjoncteur détecterait cette fuite anormale. De tels capteurs

se déclenchent normalement à 80 % de la pression de remplissage nominale, ce qui correspond à une perte de 20 % du SF₆ qui, dégagé dans l'atmosphère, produit une concentration de SOF₂ de 1,8 ppmv.

Dans un poste MT d'intérieur (cf. fig. 23), en cas de fuite anormale et totale de SF₆ d'un disjoncteur, le SOF₂ présent dans le local atteindrait 17,5 ppmv ; mais pour une perte de pression relative de 20 % (niveau habituel d'alarme) la concentration de SOF₂ dans le local serait donc de 3,5 ppmv.

Dans les deux cas, la VME du SOF₂ (1,6 ppmv) peut être dépassée, mais dans une proportion relativement faible. Dans ces circonstances, une exposition de courte durée représenterait un risque négligeable. L'odeur âcre et désagréable du SOF₂ est perceptible dès 1 ppmv, ce qui

Étude de cas en HT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		700
B	Volume de l'enceinte à disjoncteurs (m ³)		0,5
C	Pression de remplissage (Mpa)		0,5
D	Volume de SF ₆ /disjoncteur (m ³)	B x C	0,25
E	Nombre de disjoncteurs		7
F	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
G	Tension de l'arc (V)		500
H	Durée de l'arc (s)		0,015
I	Énergie de l'arc (1 claquage/1 pôle) (kJ)	F x G x H	236,2
J	Énergie de l'arc (3 claquages/3 pôles) (kJ)	9 x I	2126
K	Taux de production de SOF ₂ (l/kJ)		3,7 x 10 ⁻³
L	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	K x J	7,87
M	Pression de remplissage par rapport à la pression atmosphérique (Mpa)	C - 0,1	0,4
N	Quantité de SOF ₂ susceptible de fuir (l)	L x M/C	6,3
P	Concentration de SOF ₂ dans le local (ppmv)	N/D	9,0

Fig. 22 : Fuite anormale de SF₆ dans un poste HT (145 kV) d'intérieur.

Étude de cas en MT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		120
B	Volume de l'enceinte à disjoncteurs (m ³)		45 x 10 ⁻³
C	Pression de remplissage (Mpa)		0,3
D	Volume de SF ₆ /disjoncteur (m ³)	B x C	13,5 x 10 ⁻³
E	Nombre de disjoncteurs		15
F	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
G	Tension de l'arc (V)		200
H	Durée de l'arc (s)		0,015
I	Énergie de l'arc (1 claquage/1 pôle) (kJ)	F x G x H	94,5
J	Énergie de l'arc (3 claquages/3 pôles) (kJ)	9 x I	850,5
K	Taux de production de SOF ₂ (l/kJ)		3,7 x 10 ⁻³
L	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	K x J	3,147
M	Pression de remplissage par rapport à la pression atmosphérique (Mpa)	C - 0,1	0,2
N	Quantité de SOF ₂ susceptible de fuir (l)	L x M/C	2098
P	Concentration de SOF ₂ dans le local (ppmv)	N/D	17,5

Fig. 23 : Fuite anormale de SF₆ dans un poste MT (12 kV) d'intérieur.

signifie que la plupart des opérateurs pourront interpréter cette odeur comme révélatrice d'une concentration voisine de la VME. L'olfaction ne constitue cependant pas une méthode de détection recommandée.

Défaut interne

Un défaut interne peut se produire en cas de formation anormale d'arc entre les conducteurs principaux d'un élément d'un appareil ou entre un conducteur principal et une partie conductrice mise à la terre. Cette formation anormale d'arc produit une élévation rapide de la pression pouvant entraîner l'expulsion de gaz chauds et d'autres produits. Mais un tel défaut, qui peut se produire dans n'importe quel type d'enceinte HT, survient très rarement.

Dans des enceintes remplies de SF₆. Il y a trois cas de figure possibles pour ces défauts internes :

- 1 - Défaut n'entraînant pas de dégagement anormal de SF₆. Cas possible lorsque l'énergie fournie est insuffisante pour entraîner une brûlure perforante ou une décompression de l'enceinte.
- 2 - Défaut par lequel la chaleur de l'arc fond et vaporise la paroi de l'enceinte (habituellement métallique et formant une électrode de l'arc) qui se trouve perforée. Ce type de défaut peut se produire dans les appareils GIS HT.
- 3 - Défaut par lequel l'élévation de pression dans l'enceinte est suffisante pour déclencher une opération de limitation de pression. Cette opération est réalisée par un dispositif limiteur (soupape) ou par une zone de décompression de l'enceinte permettant un dégagement orienté des gaz chauds.

Seuls les défauts de type 2 et 3 présentent, pour les personnes, des risques associés à l'utilisation du SF₆, risques calculés d'après la quantité de SOF₂ dégagée dans l'atmosphère. Mais les effets potentiellement nocifs des autres gaz toxiques sans rapport avec l'utilisation du SF₆ seront également envisagés. Nous verrons que ces autres sous-produits, également présents lors d'un défaut interne dans un appareil de n'importe quel type, peuvent être les déterminants majeurs de la toxicité.

Pour calculer les concentrations de SOF₂ observables lors d'un défaut interne (cf. **fig. 24 et 25**), les hypothèses suivantes ont été faites.

- Pour les appareils MT contenant de faibles volumes de SF₆, on suppose que la majorité du gaz est expulsée de l'enceinte en moins de 50 ms. Cette hypothèse est confortée par les mesures de pression effectuées au cours des tests de défaut interne. La quantité de SOF₂ formée est par conséquent calculée sur une période de production de 50 ms.
- Pour les appareils HT, une période de production de SOF₂ de 100 ms sera retenue, car les durées de défaut dans les systèmes HT sont habituellement limitées à 100 ms environ.
- Le local est étanche à l'environnement extérieur.
- Les effets des adsorbants sont estimés négligeables pendant la période considérée.
- La totalité du SOF₂ produit au cours de la période de défaut est dégagée dans le local.

Les résultats indiquent que des concentrations significatives de SOF₂ peuvent être retrouvées dans le local. Mais aucune donnée toxicologique détaillée concernant le SOF₂ n'est disponible, et l'on admet que les grands mammifères (lapins) peuvent supporter une exposition d'une heure à des concentrations allant jusqu'à 500 ppmv (voir la section 4.2.2. de la norme CEI 61634 -1995). D'autres substances potentiellement toxiques, notamment des vapeurs de métal et de plastique, sont produites lors d'un défaut interne avec n'importe quel type d'appareil rempli ou non de SF₆ (voir les sections C 4.7.2. et C 4.7.3 de la norme CEI 61634 -1995). Or ces produits inévitables et sans rapport avec l'utilisation du SF₆, peuvent s'avérer déterminants pour la toxicité globale de l'atmosphère. Ainsi, par exemple, à l'occasion d'un défaut de jeu de barres, lorsque seulement 10 g de cuivre sont évaporés dans l'atmosphère du local MT, la concentration – en négligeant les effets de l'oxydation – sera de 83 mg/m³ [masse du Cu / volume du local]. La VME de la vapeur de cuivre est de 0,2 mg/m³. Ceci signifie que la concentration de la vapeur de cuivre pourrait

Étude de cas en HT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		700
B	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
C	Tension de l'arc (V)		1000
D	Durée de l'arc (s)		0,1
E	Énergie de l'arc (2 arcs, phase-phase) (kJ)	B x C x D	6300
F	Taux de production de SOF ₂ (électrodes Al) (l/kJ)		10 x 10 ⁻³
G	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	E x F	94,5
H	Concentration de SOF ₂ dans le local (ppmv)	G/A	135

Fig. 24 : Défaut interne dans un poste GIS HT (145 kV) d'intérieur.

atteindre 400 fois la VME. De même, la vaporisation totale de seulement 32 g de PVC (équivalant à l'isolation de 1,2 m de câble 1 mm² standard) pourrait produire une concentration dans l'atmosphère égale à 100 fois la VME (2,6 mg/m³) de chlorure de vinyle.

On peut donc en conclure qu'en toute situation de défaut interne, des vapeurs corrosives et/ou toxiques sont produites en présence ou en l'absence de SF₆. Dans les cas où ces vapeurs sont dégagées dans l'atmosphère du local, les produits sans rapport avec le SF₆ sont le plus souvent les déterminants majeurs de la toxicité. Ceci conforte l'idée que l'utilisation du SF₆ dans les appareils n'augmente pas significativement les risques associés à un défaut interne.

Incendie externe

Les incendies qui surviennent dans les installations extérieures sont rarement sources de problème en raison de l'absence relative de matériau inflammable à proximité des appareils. Dans le cas des installations intérieures, notamment des postes MT grand public, il existe un risque accru d'incendie à proximité des appareils. Pour le personnel situé à proximité d'un équipement au SF₆ ce risque équivaut à celui d'une fuite suivie d'une décomposition du gaz échappé.

Les recherches montrent que la température des incendies dépasse rarement 800 °C et la température à proximité des enceintes de SF₆, qui sont protégées par des enveloppes métalliques, est vraisemblablement bien inférieure. Il est fort peu probable qu'un incendie provoque un dégagement de SF₆ ; si cela se produisait, le SF₆ rapidement dissipé par convection vers les zones de température encore inférieure ne serait pas décomposé (une décomposition significative nécessite une température supérieure à 500 °C). De plus, le SF₆ est ininflammable et aura un effet extincteur. Le personnel amené à éteindre l'incendie devra cependant revêtir les protections d'usage contre les vapeurs provenant de la combustion des plastiques.

Étude de cas en MT, conditions et calculs

A	Volume du local (m ³)		120
B	Intensité de défaut du disjoncteur (kA)		31,5
C	Tension de l'arc (V)		1000
D	Durée de l'arc (s)		0,5
E	Énergie de l'arc (2 arcs, phase-phase) (kJ)	B x C x D	1575
F	Taux de production de SOF ₂ (électrodes Cu) (l/kJ)		3,7 x 10 ⁻³
G	Quantité de SOF ₂ produite dans le disjoncteur (l)	E x F	5,83
H	Concentration de SOF ₂ dans le local (ppmv)	G/A	48,6

Fig. 25 : Défaut interne dans un poste MT (12 kV) d'intérieur.

4.6 Le SF₆ et l'environnement

Les polluants atmosphériques produits par l'activité humaine se répartissent en deux catégories principales en fonction de leurs effets :

- appauvrissement en ozone stratosphérique (trou de la couche d'ozone),
- réchauffement du globe (effet de serre).

Le SF₆ ne contribue pas de façon significative à l'appauvrissement en ozone stratosphérique, car il ne contient pas de chlore, qui est le principal agent responsable de la catalyse de l'ozone, ni à l'effet de serre en raison des très faibles quantités présentes dans l'atmosphère (voir

l'annexe D de la norme CEI 61634 (1995) et Electra n° 164 (2), 1996).

Politique environnementale

Conscient de la nécessaire protection de notre environnement, le Groupe Schneider a défini un ensemble de règles pour fournir des produits et des systèmes qui permettent une utilisation en toute sécurité de l'électricité. Des actions de protection de l'environnement sont menées non seulement à l'intérieur de l'entreprise, mais aussi à l'extérieur en communiquant les informations appropriées à ses clients, fournisseurs et partenaires.

Concernant la manipulation du SF₆, des réglementations et des procédures de référence ont été instituées à usage interne et à l'usage des installateurs et des exploitants.

■ Les procédures internes spécifient la qualité du SF₆ nécessaire afin de garantir les performances des appareils pour les applications diélectriques ou de coupure.

Les critères sont basés sur la norme CEI 60376 pour la sécurité des personnes et de l'environnement. Des procédures et des appareils de référence (couplage, pompage) ont été choisis pour minimiser le dégagement de SF₆ à chaque étape :

□ dans les installations du Groupe Schneider (remplissage, recyclage)

□ lors de la maintenance (lavage, réapprovisionnement) :

□ lors de la mise au rebut en fin de service.

■ Dans les notices des appareils destinées à l'exploitant (client) sont indiquées les informations nécessaires dans différents cas de figure (utilisation normale, maintenance, etc.). Cependant, pour des raisons tenant à la sécurité des personnes et de l'environnement, il est conseillé de faire effectuer ou superviser la maintenance (en particulier la maintenance lourde) par des spécialistes du Groupe Schneider, si possible dans ses locaux ou dans des installations spécialement conçues à cet effet.

Dans ces procédures, les interventions spéciales sont décrites en termes de traitement du gaz. Ainsi un gaz non conforme aux valeurs spécifiées peut être traité sur site en utilisant des bouteilles de gaz adaptées. Le traitement des produits de décomposition du gaz après formation d'arc peut également être effectué, selon une méthode brevetée qui utilise une solution de chaux pour la neutralisation afin de répondre aux exigences des clients, par exemple pour la mise au rebut en fin de service.

Appauvrissement en ozone

La communauté internationale a pris conscience des risques sanitaires et environnementaux résultants de la destruction de la couche d'ozone. La destruction de l'ozone (O₃) par les CFC (chlorofluorocarbones) est due à la présence d'atomes de chlore que libèrent les molécules de CFC exposées au rayonnement ultraviolet. Elle se fait selon le cycle catalytique de la **figure 26**.

Les liaisons covalentes de la molécule de CFC sont rompues par le rayonnement ultraviolet et des atomes de chlore libres sont libérés (1). Ceux-ci réagissent avec l'ozone pour produire du ClO qui, à son tour, réagit avec l'oxygène libre en libérant l'atome de chlore qui peut ainsi participer à une nouvelle réaction 2. Un même atome de chlore peut participer des dizaines de milliers de fois à ce cycle avant d'être neutralisé par une réaction n'impliquant pas l'ozone.

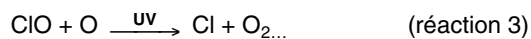
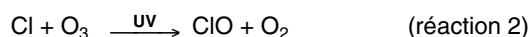


Fig. 26 : Le cycle catalytique de destruction de l'ozone par les CFC.

En ce qui concerne le SF₆, il faut noter qu'il n'est pas sujet à la photo décomposition à l'altitude de la couche d'ozone (32 à 44 km), aussi très peu d'atomes de fluor sont libérés, et ceux qui le sont ont fortement tendance à se combiner avec l'hydrogène libre plutôt qu'avec l'ozone. En outre, la concentration de SF₆ est 1000 fois inférieure à celle du CFC.

Effet de serre

La température à la surface de la terre s'élève pendant la journée grâce au rayonnement solaire et chute pendant la nuit par dissipation thermique due au rayonnement infrarouge. Une partie de ce rayonnement infrarouge, notamment aux longueurs d'ondes comprises entre 7 et 13 μm, est réfléchi vers la surface de la terre et ne s'échappe pas. La réflectivité de l'atmosphère à ces longueurs d'onde est accrue en présence de gaz à effet de serre comme CO₂, H₂O et O₃, et particulièrement par les gaz résultant de l'activité humaine comme :

- le CO₂ issu de la combustion des combustibles fossiles,
- le N₂O produit par l'agriculture intensive,
- les CFC des aérosols et des réfrigérateurs,
- et le CH₄ issu de l'élevage intensif du bétail.

Le SF₆ possède un spectre d'absorption infrarouge et est considéré comme un gaz à effet de serre mineur dont la durée de vie dans l'atmosphère est très grande, mais sa concentration extrêmement faible dans l'atmosphère fait qu'il est très peu contributif au réchauffement du globe (cf. **fig. 27**).

Gaz	Concentration (ppbv)	Contribution
CO ₂	353x10 ³	60
CH ₄	1,7x10 ³	15
N ₂ O	310	5
O ₃	10-50	8
CFC-11	0,28	4
CFC-12	0,48	8
SF ₆	0,002	10 ⁻²

Fig. 27 : Estimation de la contribution de différents gaz à l'effet de serre.

La contribution du SF₆ est inférieure au dix millième de la contribution totale des autres agents et à ce titre négligeable. Cependant, des considérations environnementales à très long terme plaident en faveur du recyclage du SF₆ lors des interventions de maintenance ou du traitement en fin de service des appareils l'utilisant.

5 Conclusion

L'adoption du SF₆ dans les appareils électrotechniques, tant pour l'isolation que pour la coupure, a permis d'améliorer leurs performances et leur fiabilité tout en réduisant leur encombrement, leur poids et leur coût global. Le coût total de possession, qui inclut les frais de maintenance, peut être bien plus bas qu'avec les anciens types d'appareils. Par exemple, dans le cas des disjoncteurs MT,

EDF a réduit le temps de maintenance cumulée total pendant la durée de vie d'un disjoncteur de 350 heures à 30 heures. L'expérience accumulée en service confirme que l'utilisation du SF₆ ne présente aucun risque pour les personnes ou l'environnement aussi longtemps que les méthodes de travail adéquates sont employées.

Bibliographie

Normes

- CEI/TR2 61634 : Appareillage à haute tension - Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre (SF₆) dans l'appareillage à haute tension, première édition.
- CEI 60376 : Spécifications et réception de l'hexafluorure de soufre neuf ; (Complément A-1973) (Complément B-1974).

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Étude thermique des tableaux électriques BT, Cahier Technique n° 145, janvier 1990 - C. KILINDJIAN
- La coupure par autoexpansion, Cahier Technique n° 171, décembre 1993 - G. BERNARD

Autres publications

- CIGRE WG 23-01 Task force 01 (08.96) : SF₆ recycling guide.
- CIRED (1995) : Développement et suivi du palier technique EDF utilisant de l'appareillage moyenne tension SF₆ - B. JOYEUX, G. PERRISSIN, M. REBOUL
- ELECTRA N°164 (02.96) : SF₆ and the Global Atmosphere (Task force 01 of WG 23.10).
- IEE (1994) : MV switchgear breaking in SF₆ : the situation after 20 years in service.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Fax: 33 (0)4 76 57 98 60
E-mail : fr.tech-com@mail.schneider.fr

Edition : Schneider Electric

- 100 FF -