

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication : **2 977 708**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **11 56064**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 H 33/22 (2013.01), H 02 B 13/055**

①2 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

A1

②2 **Date de dépôt** : 05.07.11.

③0 **Priorité** :

④3 **Date de mise à la disposition du public de la demande** : 11.01.13 Bulletin 13/02.

⑤6 **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire** : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 **Références à d'autres documents nationaux apparentés** :

⑦1 **Demandeur(s)** : ALSTOM GRID SAS Société par actions simplifiée — FR.

⑦2 **Inventeur(s)** : KIEFFEL YANNICK, GIRODET ALAIN, PICCOZ DANIEL et MALADÉN ROMAIN.

⑦3 **Titulaire(s)** : ALSTOM GRID SAS Société par actions simplifiée.

⑦4 **Mandataire(s)** : BREVALEX Société à responsabilité limitée.

⑤4 **UTILISATION D'UNE HYDROFLUOROOLEFINE COMME MILIEU D'ISOLATION ET/OU D'EXTINCTION D'ARC EN HAUTE TENSION ET APPAREIL ELECTRIQUE HAUTE TENSION A ISOLATION GAZEUSE LE COMPRENANT.**

⑤7 L'invention se rapporte à l'utilisation d'un milieu gazeux comprenant une hydrofluorooléfine, éventuellement associée à un gaz de dilution comme milieu d'isolation électrique et/ou d'extinction des arcs électriques dans un appareil électrique haute tension.

Elle se rapporte également à un appareil électrique haute tension dans lequel l'isolation électrique et/ou l'extinction des arcs électriques est (sont) assurée (s) par un milieu comprenant une hydrofluorooléfine, éventuellement associée à un gaz de dilution.

FR 2 977 708 - A1



**UTILISATION D'UNE HYDROFLUOROOLEFINE COMME MILIEU D'ISOLATION
ET/OU D'EXTINCTION D'ARC EN HAUTE TENSION ET APPAREIL
ELECTRIQUE HAUTE TENSION A ISOLATION GAZEUSE LE COMPRENANT**

5

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention se rapporte au domaine de l'isolation électrique et de l'extinction des arcs électriques dans des appareils haute tension.

Plus précisément, elle se rapporte à l'utilisation de milieux gazeux qui comprennent un alcène particulier, à savoir une hydrofluorooléfine à trois atomes de carbone, en tant que gaz d'isolation et/ou d'extinction d'arc dans des appareils électriques de sous-station et, en particulier, dans des appareils haute tension. L'hydrofluorooléfine peut être utilisée seule ou en mélange avec un gaz de dilution dont le potentiel de réchauffement global est inférieur au sien, notamment inférieur ou égal à un.

Elle se rapporte également à des appareils électriques de sous-station de haute tension dans lesquels l'isolation électrique et/ou l'extinction d'arc électrique sont assurées par un milieu gazeux comprenant au moins une hydrofluorooléfine, ce composé présentant le plus fort potentiel de réchauffement global des gaz présents dans le milieu gazeux.

Un tel appareil électrique peut notamment être un transformateur électrique tel qu'un transformateur d'alimentation ou de mesure, une ligne à isolation gazeuse pour le transport ou la distribution de l'électricité, un jeu de barres ou encore un appareil électrique de

connexion/déconnexion (aussi appelé appareil de coupure) tel qu'un disjoncteur, un interrupteur, un combiné interrupteur-fusibles, un sectionneur, un sectionneur de mise à la terre ou un contacteur.

5 **ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

Dans ce qui précède et ce qui suit, les termes « moyenne tension » (MT) et « haute tension » (HT) sont utilisés dans leur acceptation habituelle, à savoir que le terme « moyenne tension » désigne une tension qui est supérieure à 1 000 volts en courant alternatif et à 1 500 volts en courant continu mais qui ne dépasse pas 52 000 volts en courant alternatif et 75 000 volts en courant continu, tandis que le terme « haute tension » désigne une tension qui est strictement supérieure à 52 000 volts en courant alternatif et à 75 000 volts en courant continu.

Dans les appareils électriques moyenne ou haute tension, l'isolation électrique et, le cas échéant, l'extinction des arcs électriques sont typiquement assurées par un gaz qui est confiné à l'intérieur d'une enceinte de ces appareils. Actuellement, le gaz le plus souvent utilisé est l'hexafluorure de soufre (SF_6) : ce gaz présente une rigidité diélectrique relativement haute, une bonne conductivité thermique et des pertes diélectriques peu élevées. Il est chimiquement inerte et non toxique pour l'homme et les animaux et, après avoir été dissocié par un arc électrique, il se recombine rapidement et presque totalement. De plus, il est ininflammable et son prix est, encore aujourd'hui, modéré.

Toutefois, le SF_6 a pour inconvénient majeur de présenter un potentiel de réchauffement global (PRG) de 22800 (relativement au CO_2 sur 100 ans) et une durée de séjour dans l'atmosphère de 3200 ans, ce qui le place parmi les gaz à

fort pouvoir d'effet de serre. Le SF₆ a donc été inscrit par le Protocole de Kyoto (1997) sur la liste des gaz dont les émissions doivent être limitées.

Le meilleur moyen de limiter les émissions du SF₆ consiste à limiter l'utilisation de ce gaz, ce qui a conduit les industriels à chercher des alternatives au SF₆. De fait, les autres solutions comme les systèmes hybrides associant une isolation gazeuse à une isolation solide (EP-A-1 724 802) augmentent le volume des appareils électriques par rapport à celui qu'autorise une isolation au SF₆ ; la coupure dans l'huile ou le vide nécessite une refonte des appareillages.

Des gaz diélectriques sont connus : voir par exemple WO-A-2008/073790. Cependant, les gaz dits simples comme l'air ou l'azote, qui n'ont pas d'impact négatif sur l'environnement, présentent une rigidité diélectrique beaucoup plus faible que celle du SF₆ ; leur utilisation pour l'isolation électrique et/ou l'extinction des arcs électriques dans des appareils HT/MT implique d'augmenter de façon drastique le volume et/ou la pression de remplissage de ces appareils, ce qui va à l'encontre des efforts qui ont été réalisés au cours de ces dernières décennies pour développer des appareils électriques compacts, à encombrement de plus en plus réduit.

Les perfluorocarbones (C_nF_{2n+2}, c-C₄F₈) présentent, d'une manière générale, des propriétés de tenue diélectrique intéressantes, mais leur PRG s'inscrit typiquement dans une gamme allant de 5000 à 10000. D'autres alternatives prometteuses d'un point de vue caractéristiques électriques et PRG, comme le trifluoroiodométhane (CF₃I), sont classées parmi les substances cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques de catégorie 3, ce qui est rédhibitoire pour une utilisation à une échelle industrielle.

Des mélanges de SF₆ et d'autres gaz comme l'azote ou le dioxyde d'azote sont utilisés pour limiter l'impact du SF₆ sur l'environnement : voir par exemple WO-A-2009/049144. Néanmoins, du fait du fort PRG du SF₆, le PRG de ces mélanges reste très élevé. Ainsi, par exemple, un mélange de SF₆ et d'azote dans un rapport volumique de 10/90 présente une rigidité diélectrique en tension alternative (50 Hz) égale à 59 % de celle du SF₆ mais son PRG est de l'ordre de 8000 à 8650. De tels mélanges ne sauraient donc être utilisés comme gaz à faible impact environnemental.

Ainsi, seuls les mélanges à PRG important permettent une tenue diélectrique proche de celle du SF₆ à basse température ; tous les mélanges à faible PRG proposés dans l'art antérieur permettent d'atteindre au maximum 80 % des performances des appareils SF₆ pour les températures d'utilisation les plus basses mais, notamment, en augmentant la pression de gaz, en ajoutant des déflecteurs diélectriques, en revêtant certaines pièces de couches isolantes, ce qui nécessite une nouvelle conception des appareillages MT ou HT en prenant des distances d'isolation supérieures et en ajoutant éventuellement des artifices comme des écrans, déflecteurs ou gainages.

Aussi, les Inventeurs se sont-ils fixé pour but de trouver un gaz qui, tout en ayant de bonnes propriétés d'isolation électrique et d'extinction des arcs électriques, ait un impact sur l'environnement faible ou nul. Les recherches les ont mené à envisager une nouvelle famille de gaz qui puisse être utilisée dans les appareils électriques moyenne ou haute tension qui sont actuellement commercialisés, en lieu et place du SF₆ dont sont généralement remplis ces appareils, et ce sur toute leur gamme des températures d'utilisation, notamment à très basses températures.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Ces buts et d'autres encore sont atteints par l'invention qui propose, en premier lieu, l'utilisation d'un milieu gazeux comprenant au moins une hydrofluorooléfine
5 comme milieu d'isolation électrique et/ou d'extinction des arcs électriques dans un appareil haute tension.

Les hydrofluorooléfines utilisées sont des alcènes de chaîne carbonée à trois éléments carbone, et de préférence de type $C_3H_2F_4$, qui ne sont pas toxiques, pas
10 corrosifs, pas explosifs, ont un potentiel de destruction de l'ozone ODP (« *Ozone Depletion Potential* » selon la terminologie anglosaxonne) de 0, un PRG inférieur à 20, voire même inférieur à 10, et sont dotés de propriétés diélectriques aptes à leur faire remplacer le SF_6 comme gaz
15 d'isolation et/ou d'extinction d'arc dans les appareils électriques de sous-station de haute tension.

Conformément à l'invention, le milieu est tel que ses composants sont maintenus à l'état de gaz dans les conditions de température et de pression auxquelles il est
20 destiné à être soumis une fois confiné dans l'appareil électrique. L'hydrofluorooléfine peut être ainsi utilisée seule ou, éventuellement, en mélange avec au moins une autre hydrofluorooléfine de même forme. Toutefois, les hydrofluorooléfines seront le plus souvent utilisées en
25 mélange avec au moins un autre gaz qui n'appartient pas à leur famille, si la température d'ébullition de cette (ces) hydrofluorooléfine(s) ne permet de garantir son (leur) maintien à l'état gazeux notamment.

Dans ce cas, selon l'invention, les autres gaz
30 utilisés dans le milieu gazeux ont un potentiel de réchauffement global inférieur à celui des hydrofluorooléfines ; le gaz vecteur, ou gaz de dilution, ou gaz tampon, présente de préférence une température

d'ébullition très basse, c'est-à-dire typiquement égale ou inférieure à -50°C à la pression standard, et une rigidité diélectrique qui est au moins égale à celle que présente l'azote ou le dioxyde de carbone. De préférence, l'hydrofluorooléfine est mélangée à un gaz de type azote, air, avantageusement air sec, oxygène, dioxyde de carbone, ou un mélange de ces gaz. Le PRG global du milieu gazeux est en rapport des pressions partielles de chacun de ses composants, et donc inférieur à 10 ou 20, et de préférence inférieur à 5.

Avantageusement, l'hydrofluorooléfine est présente dans le milieu gazeux dans un pourcentage molaire qui est au moins égal à 95 % du pourcentage molaire M déterminé par la formule : $M = (P_{\text{HFO}}/P_{\text{mélange}}) \times 100$, dans laquelle $P_{\text{mélange}}$ représente la pression du mélange à 20°C dans l'appareil électrique et P_{HFO} représente la pression, exprimée dans la même unité, qui équivaut à 20°C à la pression de vapeur saturante que présente l'hydrofluorooléfine à la température minimale d'utilisation de l'appareil électrique. De fait, P_{HFO} est déterminée par $P_{\text{HFO}} = (PVS_{\text{HFO}} \times 293)/T_{\text{min}}$, avec PVS_{HFO} représentant la pression de vapeur saturante de l'hydrofluorooléfine à la température minimale T_{min} , exprimée en Kelvins, d'utilisation de l'appareil électrique. Ainsi, les propriétés diélectriques du milieu gazeux sont les plus élevées possibles et se rapprochent au mieux de celles du SF_6 . Dans les modes de réalisation préférés, la température minimale d'utilisation T_{min} est choisie parmi : 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -35, -40, -45 et -50°C .

Dans le cas où l'appareil électrique est un appareil moyenne tension, la présence partielle de milieu à l'état liquide n'est pas de nature à poser de problème normatif. Il est donc possible d'utiliser un mélange dans lequel l'hydrofluorooléfine est présente en un pourcentage molaire supérieur au pourcentage molaire M . De préférence, le

pourcentage molaire de l'hydrofluorooléfine est compris entre 95 % et 130 %, mieux encore entre 95 % et 120 %, idéalement entre 99 % et 110 %.

5 Dans le cas où l'appareil électrique est un
appareil haute tension, du type poste sous enveloppe
métallique, il est souhaitable, pour qu'il puisse répondre
aux normes CEI actuellement en vigueur, que le milieu soit
exclusivement ou quasi exclusivement à l'état gazeux dans
toute la gamme des températures d'utilisation de cet
10 appareil. Il est donc préféré que l'hydrofluorooléfine soit
présente en un pourcentage molaire qui ne dépasse pas 100 %
du pourcentage molaire M afin de ne pas présenter de phase de
liquéfaction. De préférence, le pourcentage molaire de
l'hydrofluorooléfine est compris entre 98 % et 100 %.

15 L'invention a également pour objet un appareil
électrique de haute tension, qui comprend une enceinte
étanche dans laquelle se trouvent des composants électriques
ainsi qu'un milieu gazeux assurant l'isolation électrique
et/ou l'extinction d'arc électrique au sein de cette
20 enveloppe, ce milieu gazeux comprenant au moins une
hydrofluorooléfine. Les caractéristiques du milieu gazeux
sont telles que précédemment décrites à propos de son
utilisation.

25 Conformément à l'invention, cet appareil
électrique peut être un transformateur électrique à isolation
gazeuse comme, par exemple, un transformateur d'alimentation
ou un transformateur de mesure. L'appareil électrique peut
également être une ligne à isolation gazeuse, aérienne ou
souterraine, ou un jeu de barres pour le transport ou la
30 distribution de l'électricité. Enfin, il peut aussi être un
appareil électrique de connexion/déconnexion (aussi appelé
appareil de coupure) comme, par exemple, un disjoncteur, un

interrupteur, un sectionneur, un combiné interrupteur-fusibles, un sectionneur de mise à la terre ou un contacteur.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui suit de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre illustratif et nullement limitatifs, représentés dans les figures annexées.

La figure 1 représente la pression de vapeur saturante de deux HFO selon la température.

La figure 2 illustre, sous la forme d'une courbe, l'évolution de la rigidité diélectrique normalisée d'un mélange de HFO-1234ze et de N₂ en fonction du pourcentage molaire de HFO que présente ce mélange.

La figure 3 montre un dispositif dans lequel les tests de tenue diélectrique ont été réalisés avec un milieu gazeux selon l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

L'invention est basée sur l'utilisation, avec ou sans gaz de dilution (gaz « tampon » comme N₂, CO₂, air, ...), des hydrofluorooléfines (HFO) à au moins trois atomes de carbone ; les HFO sont des alcènes substitués par le fluor, de formule générale C_n(H,F)_{2n}. En particulier, les HFO utilisées comprennent 3 atomes de carbone ; elles sont ininflammables et leur PRG est inférieur à 10.

Notamment l'hydrofluorooléfine HFO-1234ze, ou *trans*-1,3,3,3-tétrafluoro-1-propène, qui répond à la formule CHF=CH-CF₃, est utilisée pour les exemples comparatifs suivants. Son impact environnemental est PRG = 6, et elle ne présente pas de toxicité pour l'homme avec une valeur moyenne d'exposition (teneur limite moyenne à laquelle la majorité

des travailleurs peut être exposée régulièrement à raison de 8 heures de travail pendant 5 jours par semaine, sans subir d'effet nocif) de VME = 1000 ppm, et une dose létale DL50 causant la mort de 50 % d'une population animale supérieure à 200000 ppm. Or, dans la plupart des applications classiques à très basse température (-30°C, voire -40°C), la HFO est diluée, parfois à moins de 20 %, dans un gaz vecteur neutre de type azote : le mélange n'est donc pas toxique.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, la HFO est utilisée sous forme gazeuse quelle que soit la température d'utilisation de l'appareillage électrique. Il convient donc que sa pression partielle soit inférieure ou égale à sa pression de vapeur saturante (PVS) à la plus basse température. Cependant, comme le remplissage des appareillages est usuellement fait à température ambiante, on utilise une pression équivalente P_{HFO} , par exemple à 20°C pour obtenir un résultat conforme aux préconisations selon l'invention. Le tableau I donne ainsi les valeurs de pression de HFO-1234ze en fonction de la température (voir aussi figure 1).

Température (°C)	PVS estimée (hPa)	P _{HFO} à 20°C (hPa)
0°C	2200	2360
-10°C	1500	1670
-20°C	1000	1160
-25°C	830	980
-30°C	660	800
-40°C	410	520

Tableau I : Pressions de vapeur saturante de l'HFO-1234ze.

5 Selon l'appareillage, la pression interne du milieu d'isolation et/ou d'extinction d'arc qui est préconisée varie. Comme la HFO est, selon l'invention, entièrement ou quasi-entièrement sous forme gazeuse à la température la plus basse de l'appareil électrique, pour
10 remplir les conditions de pressions de remplissage données, un gaz de dilution, ou gaz tampon, est ajouté. Notamment, pour un appareil de type qui doit être rempli à 5 bars (soit $5 \cdot 10^5$ N/m²), si une utilisation à -20°C est envisagée, 1,16 bar de HFO-1234ze est mélangé à 3,84 bars de gaz tampon
15 à température ambiante.

De préférence, le gaz de dilution présente une température d'ébullition très basse, inférieure ou égale à la température minimale T_{min} d'utilisation de l'appareil, et une rigidité diélectrique supérieure ou égale à celle du CO₂ ou
20 de l'air dans des conditions d'essai identiques (même appareillage, même configuration géométrique, mêmes paramètres opératoires, ...) à celles utilisées pour mesurer la rigidité diélectrique dudit gaz. Par ailleurs, selon

l'invention, le gaz de dilution utilisé est un gaz à faible PRG de type air ou CO₂ : ainsi, le milieu gazeux utilisé comme isolant et extincteur d'arc dans les appareils électriques a un PRG inférieur ou égal à celui de la HFO de référence. De préférence, un gaz de dilution de PRG nul, l'azote N₂, est utilisé.

Afin de déterminer la composition du mélange gazeux au remplissage, on détermine donc la pression de remplissage de l'appareil électrique P_{mélange}. Le pourcentage molaire M équivalent en HFO est donné par la formule $M = (P_{\text{HFO}}/P_{\text{mélange}}) \times 100$, avec P_{HFO} pression équivalente à la température concernée (c'est-à-dire en général la température de remplissage, correspondant à la pression de remplissage) de la pression de vapeur saturante PVS de HFO à la température minimale d'utilisation T_{min} de l'appareil ($P_{\text{HFO}} = (PVS_{\text{HFO}} \times 293)/T_{\text{min}}$). Ce pourcentage M représente la quantité maximale de HFO pour qu'il n'y ait pas de liquide dans l'enceinte. Dans certains cas, il est impératif de ne pas dépasser ce seuil M pour éviter toute présence de liquide ; parfois, par exemple en moyenne tension, il est possible d'avoir un peu de liquide à basse ou très basse température, et le pourcentage molaire M_{HFO} de remplissage peut atteindre 110 % voire 130 % de M. Par ailleurs, comme la HFO possède une meilleure tenue diélectrique que les gaz vecteurs, il est souhaitable d'optimiser le remplissage par la HFO : on choisit donc M_{HFO} supérieur ou égal à 95 % du pourcentage molaire équivalent, de préférence $M_{\text{HFO}} \geq 0,98 \cdot M$, ou $M_{\text{HFO}} = 0,99 \cdot M$.

De fait, la rigidité diélectrique de la HFO pure est proche de celle du SF₆ pur, meilleure que celle des gaz de dilution. Tel qu'illustré en figure 2, la mesure sur un appareil de type GIS 145 kV en tension alternative 50 Hz de la HFO-1234ze, seule ou en mélange avec de l'azote, montre

que le milieu gazeux selon l'invention remplit les conditions d'utilisation des appareillages actuels.

En particulier, la tenue diélectrique de la HFO, seule ou en mélange avec un gaz de dilution « neutre », s'est
5 avérée remplir les conditions requises. Notamment :

- sur ligne directe, les essais sous choc de foudre (onde de 1,2 - 50 μ s) entre phase et terre ont été réalisés à l'intérieur d'une enceinte 1 époxy (de type Fluokit M24+, c'est-à-dire de type « *air insulated switchgear* », ou à isolation dans l'air) entre deux contacts
10 2 de rayon 12 mm en cuivre argenté distants de $d = 134$ mm illustrée en figure 3, à température ambiante. Les résultats sont donnés en tableau II : dans une configuration de champ électrique non homogène, la HFO-1234ze a une tenue
15 diélectrique équivalente à celle du SF₆.

- en cheminement, les essais sous choc de foudre (onde de 1,2 - 50 μ s) ont été réalisés à l'intérieur de la même enceinte illustrée en figure 3 dans laquelle la distance de séparation des contacts est de $d = 317$ mm, à température
20 ambiante. Le champ électrique moyen (Ucrête / 317 mm) ayant entraîné l'amorçage entre les contacts 2 par cheminement est de 814 V/mm, valeur qui est seulement 10 % inférieure à celle mesurée dans les mêmes conditions avec un appareil rempli de SF₆ à la même pression.

De même, dans une configuration de champ électrique non homogène, tel que présenté dans le tableau III, la HFO-1234ze a une tenue aux décharges partielles équivalente à celle du SF₆ ; les essais comparatifs de tenue
25 aux décharges partielles (effet Corona) ont été réalisés dans la même enceinte que ceux de tenue diélectrique sur ligne
30 directe (figure 3, $d = 134$ mm).

Gaz	Pression absolue	Tenue en polarité positive	Tenue en polarité négative
SF ₆	3·10 ⁵ Pa	190 kV	185 kV
HFO-1234ze Différence / SF ₆	3·10 ⁵ Pa	183 kV - 3,6 %	208 kV + 12,4 %
N ₂	1,3·10 ⁵ Pa	118 kV	113 kV
HFO-1234ze + N ₂ Différence / N ₂	(0,3 + 1)·10 ⁵ Pa (mélange grand froid -45°C)	254 kV + 215 %	285 kV + 252 %

Tableau II : tenue diélectrique de la HFO seule ou en mélange

Gaz	Pression absolue	Seuil d'extinction
SF ₆	2·10 ⁵ Pa	20 kV
HFO-1234ze Différence / SF ₆	2·10 ⁵ Pa	26 kV + 6 kV
SF ₆	1,2·10 ⁵ Pa	65 kV
HFO-1234ze + N ₂ Différence / SF ₆	(0,2 + 1,1) 10 ⁵ Pa (mélange grand froid -50°C)	57 kV - 8 kV

5 **Tableau III** : tenue aux décharges partielles de la HFO seule ou en mélange

Un essai comparatif de tenue à l'échauffement, mené sur un appareil type AIS mesure, au niveau des contacts

électriques (points les plus chauds), les échauffements maximum sur l'appareil traversé par un courant permanent de 630 A RMS. Tel que présenté dans le tableau IV, les échauffements mesurés sur une moyenne de trois points de mesure avec la HFO-1234ze sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés avec le SF₆.

Gaz (en pression absolue)	Echauffement des contacts	
	température absolue	par rapport à SF ₆
SF ₆ (1,38·10 ⁵ Pa)	50,63 K	/
N ₂ (1,38·10 ⁵ Pa)	53,6 K	+ 5,8 %
HFO-1234ze (1,38·10 ⁵ Pa)	50,13 K	- 1 %
HFO-1234ze (0,98·10 ⁵ Pa) + N ₂ (0,4·10 ⁵ Pa) (Mélange grand froid -25°C)	50,8 K	+ 0,3 %

Tableau IV : tenue à l'échauffement de la HFO seule ou en mélange

Par exemple, on utilisera l'hydrofluorooléfine HFO-1234ze avec un peu d'azote dans les appareils grand froid ($T_{\min} \leq -40^{\circ}\text{C}$), la quantité d'additif étant clairement établie en fonction de la température minimale d'utilisation de l'appareillage électrique.

Plus généralement, le taux de la HFO-1234ze étant lié à sa pression de vapeur saturante, il est possible de déterminer la rigidité diélectrique à 50 Hz ($U_{50\text{ Hz}}$) de différents mélanges HFO-1234ze / N₂ (à différents taux de HFO) correspondant à différentes températures minimales de -30°C à 0°C : voir tableau V, qui donne en outre une comparaison avec les propriétés du SF₆ permettant de vérifier

que les conditions d'utilisation sont remplies. Par exemple, pour un appareillage destiné à être utilisé à une température minimale de -30°C où la pression de vapeur saturante de la HFO-1234ze est de 660 hPa, ce qui représente une pression de $80 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ mesurée à 20°C , et si la pression totale dans ce type d'appareil du mélange gazeux est de 5 bars absolus, le ratio molaire sera alors de 0,8/5, soit 16 % de la HFO dans de l'azote. Le PRG du mélange est de l'ordre de 2 : en effet, un mélange à 16 % molaire de HFO-1234ze de PRG = 6 avec de l'azote diminue fortement l'impact environnemental.

Température ($^{\circ}\text{C}$)	PVS HFO-1234ze (hPa abs)	Pression totale (hPa)	Ratio HFO-1234ze (%)	U_50 Hz (kV rms)	% SF ₆
-30	660	5000	15,9 %	296	65 %
-25	830	5000	19,6 %	312	69 %
-20	1020	5000	23,6 %	327	72 %
-10	1520	5000	33,9 %	354	78 %
0	2200	5000	47,2 %	379	84 %

Tableau V : caractéristiques d'un mélange HFO-1234ze / N₂

Au vu des performances de la HFO, seule ou en mélange avec un gaz de dilution simple de type air ou azote, une utilisation dans un appareillage existant peut être envisagée. En particulier, après avoir fait le vide à l'aide d'une pompe à vide à huile, on peut remplir un appareil commercial de 5 bars pour une utilisation à -30°C à l'aide d'un mélangeur de gaz permettant de contrôler le rapport entre la HFO-1234ze et le gaz vecteur N₂, ce rapport étant maintenu constant et égal à 16 % en pression tout au long du

remplissage grâce à l'utilisation de débitmètre massique de précision ; de préférence, le vide (0 à 0,1 kPa) a été fait auparavant dans l'appareil.

Par exemple, il peut s'agir d'un appareil de type GIS de 145 kV de tension assignée et qui a une structure strictement identique à celle que présente l'appareil qui est commercialisé par Alstom Grid sous la référence B65 et rempli actuellement de SF₆. L'appareil ainsi rempli du mélange proposé est ensuite soumis à des essais de tenue diélectrique à température ambiante, sous chocs de foudre (onde de 1,2 - 50 µs) à onde positive et à onde négative conformément à la norme CEI 62271-1, tel que décrit plus haut. La rigidité diélectrique sous fréquence industrielle atteint la valeur de 296 kV rms, ce qui représente 65 % de la tenue diélectrique de cet appareil sous SF₆ à même pression et au moins 68 % de plus que la tenue diélectrique du même appareil rempli d'air sec ou d'azote à même pression. Les performances sont donc tout à fait convenables, et bien supérieures à celles obtenues pour d'autres gaz d'isolation à PRG faible.

Pareillement, il peut s'agir d'un appareil moyenne tension comme le Fluokit M24+ commercialisé par Schneider Electric : en remplissant cet interrupteur sectionneur de type AIS d'un mélange HFO-1234ze ($9,8 \cdot 10^5$ Pa absolu) et N₂ ($4 \cdot 10^5$ Pa absolu), on peut réaliser des essais de coupure dans les conditions fixées par la norme CEI 60265-1 cycle TD1, et ainsi estimer les performances de la HFO-1234ze en coupure, en les comparant avec celles du SF₆. L'appareil a ainsi coupé 630 A/12 kV avec des temps d'arcs similaires à ceux mesurés avec le SF₆ ; en augmentant progressivement tension et courant jusqu'à la non coupure, on a pu constater des limites préliminaires (sans aucune précaution et/ou adaptation du fait de ce nouveau mélange) de

l'appareil à 811 A/16 kV, *a priori* légèrement supérieures à celles obtenues avec du SF₆.

Il est à noter par ailleurs que, les appareils actuels étant déjà équipés de tamis moléculaire de type sulfate de calcium (CaSO₄) anhydre qui adsorbent les petites molécules créées lors de la coupure, la toxicité du gaz n'est pas augmentée après décharges partielles par des molécules pouvant présenter une toxicité.

De plus, en fin de vie ou après essais de coupure, le gaz est récupéré par les techniques classiques de récupération utilisant un compresseur et une pompe à vide. L'hydrofluorooléfine HFO-1234ze est alors séparée du gaz tampon en utilisant une zéolithe capable de piéger uniquement le gaz tampon, de taille inférieure ; alternativement, une membrane à séparation sélective laisse s'échapper l'azote et garde la HFO-1234ze qui a une masse molaire plus importante ; toute autre option est envisageable.

Bien que les exemples ci-dessus aient été réalisés avec la HFO-1234ze, les alternatives à ce gaz sont possibles. En particulier, l'isomère HFO-1234yf, ou 2,3,3,3-tétrafluoro-1-propène, qui répond à la formule CH₂=CF-CH₃, peut être utilisé, avec les adaptations inhérentes aux propriétés de ce gaz : en particulier, tel qu'illustré en figure 1, comme la température d'ébullition est de -30°C (contre -19°C pour la HFO-1234ze), il est possible pour la même température de fonctionnement de -30°C de mettre 50 % de plus de HFO-1234yf que de HFO-1234ze. Comme pour une pression de remplissage donnée, plus il y a de HFO, et par conséquent moins il y a de gaz tampon, et que les propriétés d'isolation et d'extinction d'arc dépendent du mélange, la rigidité diélectrique est augmentée.

La solution selon l'invention permet ainsi de proposer un gaz ou un mélange gazeux à faible impact

environnemental (PRG diminué de plus de 99,9 % par rapport à une isolation au SF₆) compatible avec les températures d'utilisation minimales de l'appareillage électrique et ayant des propriétés diélectrique, de coupure et de dissipation thermique proches de celles obtenues sur les appareils existants. Ce gaz, seul ou en mélange peut directement remplacer le SF₆ utilisé dans les appareils, sans modifier ou presque leur conception : les lignes de production peuvent être gardées, avec simple changement du gaz de remplissage.

10 **REFERENCES CITEES**

EP-A-1 724 802

WO-A-2008/073790

WO-A-2009/049144

15

REVENDEICATIONS

1. Utilisation d'un milieu gazeux comprenant une hydrofluorooléfine à trois atomes de carbone, ledit milieu gazeux ayant un potentiel de réchauffement global (PRG) inférieur au potentiel de réchauffement global de l'hydrofluorooléfine, comme milieu d'isolation électrique et/ou d'extinction d'arc électrique dans des appareils électriques de sous-station de haute tension.

10

2. Utilisation d'un milieu selon la revendication 1, dans laquelle l'hydrofluorooléfine est le *trans*-1,3,3,3-tétrafluoro-1-propène (HFO-1234ze).

15

3. Utilisation d'un milieu selon la revendication 1, dans laquelle l'hydrofluorooléfine est le 2,3,3,3-tétrafluoro-1-propène (HFO-1234yf).

20

4. Utilisation selon l'une des revendications 1 à 3, dans laquelle le milieu gazeux comprend en outre un gaz de dilution.

25

5. Utilisation selon la revendication 4, dans laquelle le gaz de dilution est choisi parmi l'air, l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone ou un mélange de ces gaz.

30

6. Utilisation selon l'une des revendications 4 ou 5, dans laquelle l'hydrofluorooléfine est présente dans le mélange en un pourcentage molaire (M_{HFO}) au moins égal à 95 % du pourcentage molaire M déterminé par la formule $M = (P_{\text{HFO}}/P_{\text{mélange}}) \times 100$, avec $P_{\text{mélange}}$ la pression du milieu à 20°C dans l'appareil électrique et P_{HFO} la pression équivalente à 20°C à la pression de vapeur saturante (PVS) de

l'hydrofluorooléfine à la température minimale (T_{\min}) d'utilisation de l'appareil électrique.

5 **7.** Utilisation selon la revendication 6, dans laquelle le pourcentage molaire d'hydrofluorooléfine (M_{HFO}) est compris entre 99 % et 110 % du pourcentage molaire M.

10 **8.** Utilisation selon l'une des revendications 6 ou 7, dans laquelle la température minimale (T_{\min}) est choisie parmi -50°C , -45°C , -40°C , -30°C , -25°C , -15°C , -10°C , -5°C , 0°C .

15 **9.** Appareil électrique haute tension, comprenant une enceinte étanche dans laquelle se trouvent des composants électriques ainsi qu'un milieu gazeux assurant l'isolation électrique et/ou l'extinction des arcs électriques susceptibles de se produire au sein de cette enceinte, caractérisé en ce que le milieu gazeux comprend une hydrofluorooléfine à trois atomes de carbone et ledit milieu
20 gazeux a un potentiel de réchauffement global (PRG) inférieur au potentiel de réchauffement global de l'hydrofluorooléfine.

25 **10.** Appareil électrique selon la revendication 9, dans lequel l'hydrofluorooléfine est le *trans*-1,3,3,3-tétrafluoro-1-propène (HFO-1234ze) ou le 2,3,3,3-tétrafluoro-1-propène (HFO-1234yf).

30 **11.** Appareil électrique selon l'une des revendications 9 ou 10, dans lequel le milieu gazeux comprend en outre un gaz de dilution.

12. Appareil électrique selon la revendication 11, dans lequel le gaz de dilution est choisi parmi l'air,

l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone ou un mélange de ces gaz.

5 **13.** Appareil électrique selon l'une des revendications 11 ou 12, dans lequel l'hydrofluorooléfine est présente dans le milieu avec un pourcentage molaire (M_{HFO}) au moins égal à 95 % du pourcentage molaire M déterminé par la formule : $M = (P_{\text{HFO}}/P_{\text{mélange}}) \times 100$, avec $P_{\text{mélange}}$ la pression du milieu à 20°C dans l'appareil électrique et P_{HFO} la pression
10 équivalente à 20°C à la pression de vapeur saturante (PVS) de l'hydrofluorooléfine à la température minimale (T_{min}) d'utilisation de l'appareil électrique.

15 **14.** Appareil électrique selon la revendication 13, dans laquelle le pourcentage molaire d'hydrofluorooléfine (M_{HFO}) est compris entre 99 % et 110 % du pourcentage molaire M .

20 **15.** Appareil selon l'une quelconque des revendications 9 à 14, qui est un transformateur électrique à isolation gazeuse, une ligne à isolation gazeuse pour le transport ou la distribution de l'électricité ou un appareil électrique de connexion/déconnexion.

1/1

PVS_{HFO} (10^5 Pa)

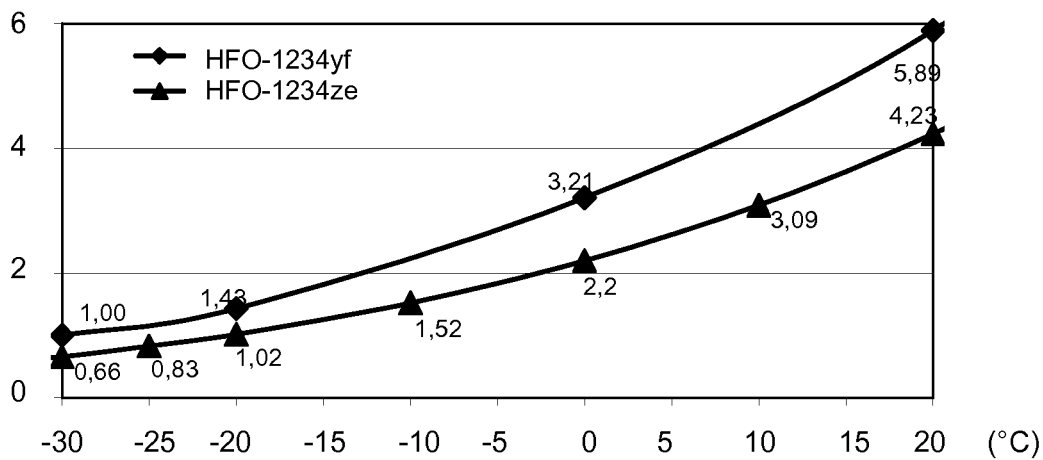


Fig.1

Rigidité diélectrique normalisée
U_50 Hz

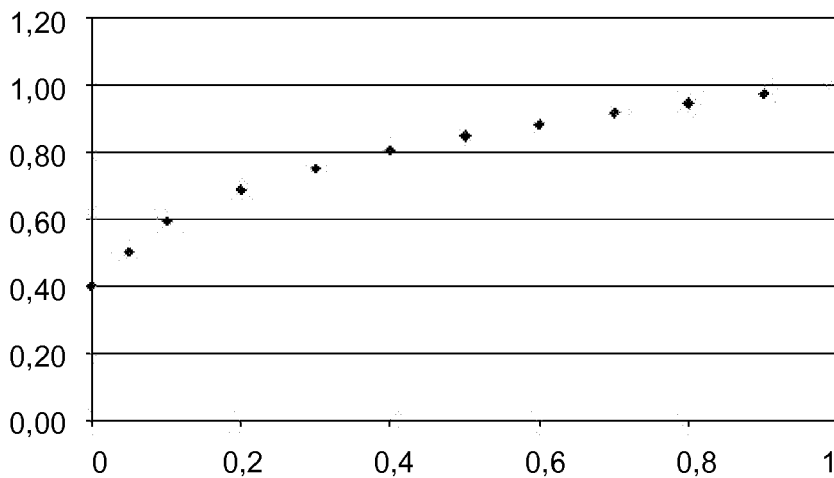


Fig.2

HFO-1234ze / N₂

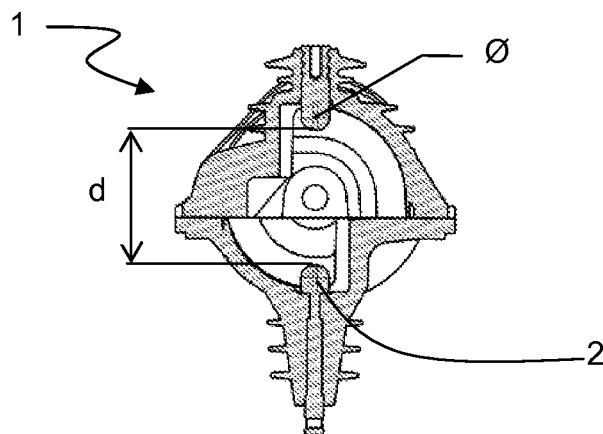


Fig.3



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 753788
FR 1156064

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X,D	US 2008/135817 A1 (LULY MATTHEW H [US] ET AL) 12 juin 2008 (2008-06-12) * alinéas [0001], [0013], [0105], [0110] - [0112], [0115], [0117], [0126]; revendications 2,4,5,8,9-11; tableau 2 *	1-15	H01H33/22 H02B13/055
X	US 2010/123095 A1 (MINOR BARBARA HAVILAND [US] ET AL) 20 mai 2010 (2010-05-20) * alinéas [0044] - [0053]; tableau 1 *	1-8	
X	WO 2005/108523 A1 (HONEYWELL INT INC [US]; SINGH RAJIV R [US]; PHAM HANG T [US]; SHANKLAN) 17 novembre 2005 (2005-11-17) * page 1, ligne 5,6,11 * * page 4, ligne 3-13 *	1-15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H01B H05K H02B H01H
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 février 2012		Vanier, Cécile	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1156064 FA 753788**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 21-02-2012

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008135817	A1	12-06-2008	CN 101601103 A	09-12-2009
			EP 2097909 A2	09-09-2009
			JP 2010512639 A	22-04-2010
			KR 20090088423 A	19-08-2009
			US 2008135817 A1	12-06-2008
			US 2010320428 A1	23-12-2010
			WO 2008073790 A2	19-06-2008

US 2010123095	A1	20-05-2010	AR 074382 A1	12-01-2011
			AU 2009316676 A1	27-05-2010
			CA 2742112 A1	27-05-2010
			CN 102216411 A	12-10-2011
			EP 2373756 A1	12-10-2011
			KR 20110097849 A	31-08-2011
			US 2010123095 A1	20-05-2010
WO 2010059685 A1	27-05-2010			

WO 2005108523	A1	17-11-2005	AU 2005241046 A1	17-11-2005
			CN 1973016 A	30-05-2007
			DE 10181402 T1	07-07-2011
			EP 1743010 A1	17-01-2007
			EP 2261296 A2	15-12-2010
			ES 2358184 T1	06-05-2011
			JP 2007536390 A	13-12-2007
			KR 20070007370 A	15-01-2007
			US 2005241805 A1	03-11-2005
			US 2010127209 A1	27-05-2010
			US 2011289748 A1	01-12-2011
WO 2005108523 A1	17-11-2005			
