

# **g<sup>3</sup>: LA SOLUTION ALTERNATIVE AU SF<sub>6</sub> EN PRATIQUE**

*Arnaud Ficheux, GIS Technical Support Manager, GE's Grid Solutions*

*Elodie Laruelle, Eco-Design Coordinator, GE's Grid Solutions*

*Michael Walter, Manager High Voltage Technology, GE's Grid Solutions*



En Août 2014, GE révèle le  $g^3$  (qui se prononce « g cubed », et est un acronyme de Green Gas for Grid), sa solution révolutionnaire pour remplacer le  $SF_6$  dans les équipements haute tension. Depuis, des appareils isolés au  $g^3$  ont été installés avec succès dans plusieurs pays (image 1) et une évaluation du cycle de vie du  $g^3$  souligne les énormes avantages de ce nouveau mélange gazeux pour l'environnement.



Image 1 : Le poste sous enveloppe métallique/PSEM de type F35-72.5 kV  $g^3$  de CERIUS, constitué de 6 travées disjoncteurs, est installé au Danemark

## Portefeuille des produits $g^3$

Il y a environ 50 ans, le  $SF_6$  apportait une solution idéale à l'industrie d'équipements électriques haute tension, grâce à sa capacité exceptionnelle d'extinction de l'arc et de tenue à la tension. Aujourd'hui, le développement durable de notre planète devenant une priorité, le secteur du transport d'électricité est à la recherche d'une solution de remplacement.

Ceci est particulièrement dû au potentiel de réchauffement climatique du  $SF_6$  qui est 23 500 fois plus élevé que celui du  $CO_2$ , et lié au fait qu'il reste dans l'atmosphère pendant 3 200 ans. De plus, sa concentration atmosphérique a augmenté de 20% au cours des cinq dernières années.

Le temps est donc venu de trouver et de favoriser l'adoption d'un substitut au  $SF_6$  fiable et durable. Après plusieurs années de recherche, c'est ce que GE a réussi à faire avec sa solution  $g^3$ , un gaz mixte composé de  $CO_2$ ,  $O_2$ , et du composé Novec™ 4710, un fluoronitrile développé par la société 3M™. Ce mélange gazeux révolutionnaire a le pouvoir de réduire l'impact sur le changement climatique de 99% comparé au  $SF_6$ .

Cette performance est réalisée sans grands changements sur l'équipement original. Le disjoncteur reste un système à chambre de coupure unique à auto-soufflage, utilisant le même mécanisme de manœuvre, sans impacter sa taille.

Le portefeuille des appareils au  $g^3$  à date de l'article s'étend des postes isolés au  $g^3$  jusqu'à 145 kV (aussi communément appelés PSEM : Poste Sous Enveloppe Métallique), aux lignes isolées au  $g^3$  jusqu'à 420 kV (image 2), au disjoncteur live tank à 145 kV (image 3). Tous les produits à venir seront conçus pour le  $g^3$  et introduits sur le marché concerné dans leur version  $g^3$ . C'était le cas des tout derniers développements présentés à CIGRE en 2018 : le nouveau poste isolé au gaz en 72.5 kV et le disjoncteur de type live tank en 145 kV.



Image 2 : Ligne 420 kV isolée au  $g^3$  sur le réseau de National Grid, au poste de Sellindge au Royaume-Uni.



Image 3 : Disjoncteur de type Live Tank 145 kV sans  $SF_6$ , utilisant la place le gaz  $g^3$  de GE

À l'échelle internationale, les exploitants de réseaux électriques qui sont préoccupés par l'impact de leurs opérations sur l'environnement, ont choisi l'alternative au  $SF_6$  de GE, la technologie  $g^3$ . De cette manière, ils réduisent aussi bien leur impact physique qu'économique. L'adoption du  $g^3$  ne cesse de s'étendre du fait de ses performances équivalentes au  $SF_6$  et des bénéfices indéniables qu'il offre pour l'environnement.

## Du $SF_6$ à $g^3$ : une transition en douceur

Les clients n'ont pas de soucis à se faire en ce qui concerne le mélange des composants du  $g^3$  sur site. Le  $g^3$  est livré comme le  $SF_6$ , donc l'utilisateur n'a aucunement besoin de combiner les différents composants du mélange. En effet, GE a établi des partenariats avec des fournisseurs de gaz industriels renommés tels que Air Liquide, DILO, Inventec, etc. Ces experts de la manipulation J'aurais mis "afin de" des gaz ont développé des équipements et des procédés spécifiques pour mélanger automatiquement le  $g^3$ . Ils assurent le pourcentage exact des différents composants lors du transfert dans les bouteilles qui sont alors envoyées soit chez le client, soit sur site directement.



Chaque bouteille de taille B50 contient environ 22 kg du mélange à l'état liquide. Ces bouteilles sont utilisées pour des volumes importants comme pour les postes ou les lignes sous enveloppe métallique. Le mélange est également disponible en bouteilles de 2 kg sous sa forme gazeuse pour des opérations ponctuelles sur le gaz comme par exemple pour des compléments ou pour le remplissage des réducteurs de mesure. Les partenaires de GE ont également développé des chariots spéciaux (pour petits et grands volumes), pour le remplissage ou la récupération du mélange, similairement aux équipements standardisés pour le SF<sub>6</sub>, auxquels les utilisateurs sont familiers (image 4). Un projet de ligne ou de poste isolé au gaz peut nécessiter entre 10 et 50 bouteilles de type B50 (image 5).



Image 4 : Le chariot de remplissage g<sup>3</sup> d'Air Liquide en service sur un site de National Grid au Royaume-Uni



Image 5 : Bouteilles B50 de g<sup>3</sup> livrées sur site client

Pour le transfert du liquide en gaz, l'homogénéité du mélange de gaz doit être assurée pour obtenir le ratio correct de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, et de Novect<sup>™</sup> 4710. Les chariots de service spécialisés permettent ce procédé sans intervention de l'opérateur en chauffant les bouteilles via un processus automatique de chauffe résistive ou par induction (image 6). C'est ici la seule différence avec l'utilisation du SF<sub>6</sub> pour lequel la chauffe des bouteilles n'était nécessaire que dans les conditions climatiques froides.



Image 6 : Bouteille de g<sup>3</sup> équipée de son système de chauffe

Les mêmes appareils que ceux utilisés pour surveiller la pureté et le taux d'humidité du SF<sub>6</sub> ont été adaptés au g<sup>3</sup> et sont conçus pour vérifier le pourcentage exact des composants du g<sup>3</sup>. Les opérateurs sont donc habitués à utiliser ces appareils depuis 40 ans. Bien qu'ils aient été adaptés, leur principe de fonctionnement reste le même. Il est aussi important de noter que, tout comme le SF<sub>6</sub>, le g<sup>3</sup> est non toxique et non dangereux pour le personnel intervenant.



Image 7 : Appareils d'analyse de la qualité du gaz g<sup>3</sup> WIKA et DILO

## Gestion de la fin de vie

L'élimination et le recyclage sont des préoccupations importantes pour les opérateurs de réseaux. Etant donné qu'il n'y a pas encore de quantités suffisantes de  $g^3$  pour garantir le recyclage, les produits de décomposition sont éliminés par des partenaires spécialisés. Ceci rappelle beaucoup les débuts du  $SF_6$  lorsque l'élimination était encore la norme. Depuis, des procédés ont été mis en place pour séparer les composants et aujourd'hui, même des décomposés pollués du  $SF_6$  peuvent être retraités. Le même scénario devrait se produire pour le  $g^3$ . GE investit en ce moment deux approches différentes afin de récupérer le Novec™ 4710. Les deux pistes s'avèrent prometteuses et devraient pouvoir permettre le recyclage et la réutilisation des composants du  $g^3$  dans le futur.

## Evaluation du cycle de vie : une comparaison positive

Comme l'indique le guide des Marchés Publics Ecologiques publié par l'Union Européenne, c'est l'impact environnemental du produit complet, sur toute sa durée de vie, qui doit être évalué lors de la phase d'achat et d'approvisionnement (au lieu de ne considérer que le potentiel de réchauffement climatique du gaz seul).

Des analyses du cycle de vie (ACV) ont été réalisées sur des lignes isolées au gaz à 420 kV et sur des travées à double jeux de barres isolées dans le gaz à 145 kV, en  $g^3$  et  $SF_6$ , afin de comparer les résultats. L'objectif était d'identifier :

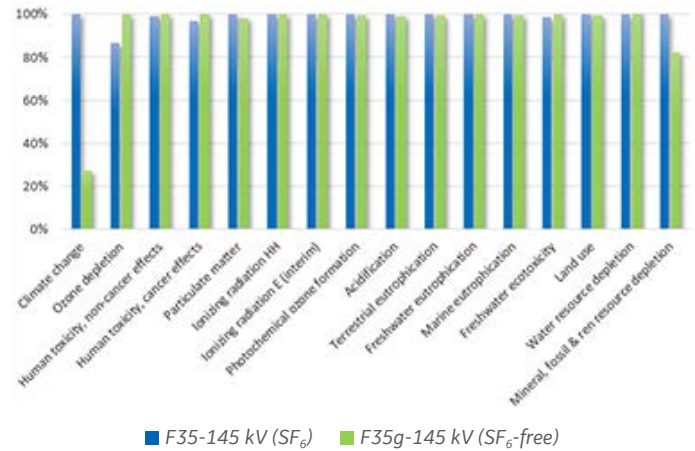
- la réduction de l'impact sur le changement climatique en considérant non seulement le gaz lui-même, mais également le produit sur la globalité de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie,
- l'impact du  $g^3$  sur les autres indicateurs environnementaux, comparé au  $SF_6$ .

L'évaluation a été effectuée selon la norme ISO 14040 et 14044 via l'outil SimaPro 8.3.0 et la méthode ILCD couvrant 16 indicateurs environnementaux parmi lesquels le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, l'épuisement des matières premières et la toxicité pour n'en citer que quelques-uns. Les données suivantes ont été prises en compte :

- la fabrication de tous les matériaux contenus dans le produit complet, y compris les traitements de surface et la peinture,
- le transport (1 000 km de route et 6 000 km en bateau),
- 40 ans de service (en considérant les pertes électriques et les émissions de gaz),
- la fin de vie du produit en tenant compte du fait que le gaz est extrait des appareils et traité séparément.

## Etude comparative entre une travée 145 kV isolée au $SF_6$ et une travée isolée au $g^3$

Sur le graphique 8, on constate que comparé à la version  $SF_6$ , l'appareil sans  $SF_6$  a un impact négatif nettement inférieur sur le changement climatique (72.5 % de réduction) et sur l'épuisement des ressources (18% de réduction).



Graphique 8 : Comparaison de l'impact du cycle de vie d'un F35-145 kV ( $SF_6$ ) en bleu et un F35g-145 kV (sans  $SF_6$ ) en vert

En ce qui concerne la réduction de 72.5% de l'impact sur le changement climatique, il est important de noter que l'aluminium, en raison de son procédé de production, a l'impact le plus grand dans la phase de fabrication de la travée PSEM. L'aluminium représente 65% de la masse de la travée isolée au  $SF_6$ , et seulement 4,4% de plus pour l'appareil sans  $SF_6$  de GE, celle isolée au  $g^3$ . Une des spécifications cruciales définies pour la conception des produits  $g^3$  était de conserver la taille des équipements pour un même niveau de tension. Si la taille de l'appareil avait dû augmenter, l'impact sur le changement climatique aurait été bien plus important.

En termes de potentiel de réchauffement climatique, celui du gaz  $g^3$  est réduit de 98% par rapport au gaz  $SF_6$ . Et lorsqu'appliqué à l'appareil, le potentiel du nouveau mélange gazeux est même réduit de 99%, simplement parce que la masse de  $g^3$  nécessaire pour remplir la travée est deux fois moins élevée que pour une travée au  $SF_6$ .

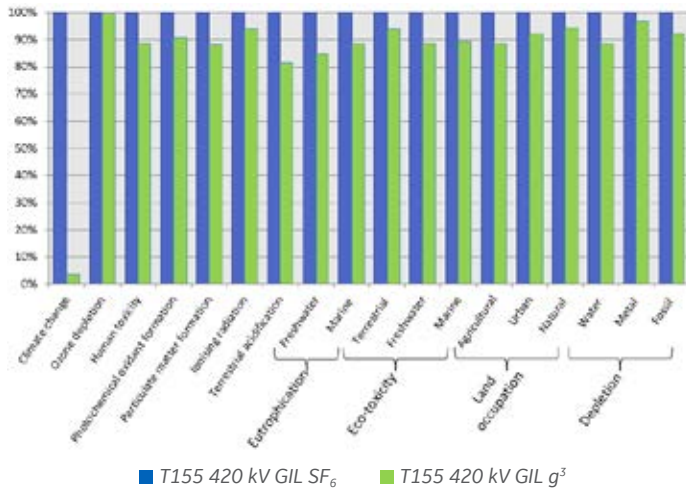
La travée PSEM au  $g^3$  montre un impact sur la destruction de la couche d'ozone accru de 15%. Ceci est dû à une utilisation plus importante de matériau polytétrafluoroéthylène (PTFE) dans le disjoncteur pour compenser les caractéristiques du nouveau mélange. Cependant, vu que les quantités de PTFE utilisées sont très petites, cette augmentation est mineure (seulement 2,8 g d'équivalent CFC sur l'ensemble de la durée de vie du produit).

En ce qui concerne les 13 autres indicateurs, la différence est inférieure à 5%, les plaçant ainsi dans une zone d'incertitude de l'analyse ACV. En d'autres termes, ces indicateurs environnementaux restent virtuellement inchangés comparés à ceux d'une travée isolée au  $SF_6$ .

## Etude comparative entre une ligne 420 kV isolée dans le SF<sub>6</sub> et une ligne isolée dans le g<sup>3</sup>

Pour la ligne 420 kV isolée au g<sup>3</sup>, les résultats sur le graphique 9 montrent que l'utilisation du g<sup>3</sup> apporte une réduction considérable de l'impact sur l'environnement comparé à la ligne isolée au SF<sub>6</sub> :

- En ce qui concerne le réchauffement climatique, on note une réduction de 96% de l'impact environnemental. C'est une amélioration générale, prenant en compte tous les paramètres. Le potentiel de réchauffement climatique du gaz spécifiquement est réduit de 99.3%.
- Pour tous les autres indicateurs environnementaux, on note une réduction moyenne de 14%.



Graphique 9 : Comparaison de l'impact du cycle de vie d'une ligne 420 kV SF<sub>6</sub> en bleu avec une ligne g<sup>3</sup> 420 kV (sans SF<sub>6</sub>) en vert

Alors que la destruction de la couche d'ozone montre une augmentation minime, le g<sup>3</sup>, composé du fluoronitrile C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N combiné à du CO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> a un impact positif majeur sur les indicateurs changement climatique et l'épuisement des ressources. En bref, le g<sup>3</sup> offre les mêmes performances techniques que le SF<sub>6</sub>, mais avec une réduction de son impact environnemental de plus de 99%.

## Etude de cas g<sup>3</sup>

Au moment où cet article est écrit, 22 opérateurs de réseaux ont opté pour les équipements haute tension sans SF<sub>6</sub> de GE :

- 16 sites avec des PSEM à 145 kV, totalisant plus de 100 travées (certaines avec disjoncteurs),
- 1 site avec des PSEM à 420 kV, totalisant 9 travées (certaines avec disjoncteurs),
- 8 sites avec des lignes 420 kV isolées au g<sup>3</sup>, soit plus de 5 000 mètres,
- 4 sites totalisant 13 disjoncteurs de type live tank isolés dans l'air 145 kV et coupure dans le g<sup>3</sup>

## Royaume-Uni – Angleterre

Le tout premier produit au g<sup>3</sup> à avoir été mis sous tension (avril 2017) était la ligne à isolation gazeuse à 420 kV du poste de Sellindge de National Grid au sud-est de l'Angleterre. Environ 40 bouteilles B50 ont été nécessaires, soit au total plus de 750 kg du mélange gazeux g<sup>3</sup>. Cela représente environ 38 000 litres répartis avec le chariot de service g<sup>3</sup> d'Air Liquide sur 15 compartiments. Le remplissage de la ligne a eu lieu en hiver, avec une température ambiante entre 10 et 15°C. Le processus a été légèrement plus long qu'avec le SF<sub>6</sub>, étant donné que le mélange gazeux devait être chauffé avec les ceintures chauffantes du chariot. Cependant, cette phase de remplissage a été menée parallèlement à d'autres opérations d'installation et de réception des équipements (figure 10). Les opérations de remplissage ont progressé normalement. Aujourd'hui la ligne isolée au g<sup>3</sup> est en opération depuis plus de deux ans.



Image 10 : Opération de remplissage du g<sup>3</sup> de la ligne à isolation gazeuse 420 kV au poste de Sellindge de National Grid, Royaume-Uni

## Royaume-Uni - Ecosse

Un autre projet g<sup>3</sup> au Royaume-Uni, la ligne à isolation gazeuse 420 kV pour le poste de Kilmarnock de Scottish Power (figure 11) a été installée dans des conditions climatiques particulièrement difficiles, sous des pluies intenses, de la neige, du vent et des températures en dessous de 0°C. C'était un test pour le processus de remplissage avec le chariot de service conçu pour fonctionner en intérieur comme en extérieur. Le remplissage s'est déroulé tranquillement malgré les mauvaises conditions météorologiques. Pour ce projet, il a été nécessaire de récupérer le mélange gazeux dans la traversée dont la pression avait été baissée à 0,5 bar pour permettre la connexion à la ligne électrique aérienne. Le mélange a ensuite été récupéré intact dans les bouteilles sous sa forme liquide. Lorsque les connexions ont été faites, le g<sup>3</sup> a été remis dans la ligne à isolation gazeuse dans les bonnes proportions de mélange (pourcentage des trois composants). Cela a permis aux équipes de valider les processus de remplissage, de récupération et de nouveau remplissage du gaz g<sup>3</sup> dans trois compartiments.



Image 11 : Opération de remplissage du g<sup>3</sup> dans la ligne à isolation gazeuse 420 kV au poste de Kilmarnock de Scottish Power, Royaume-Uni



## Suisse

Ce projet de  $g^3$  a été livré et testé sur site en mars 2018 dans un poste électrique d'Axpo en Suisse (image 12). Il comprend quatre travées triphasées 123 kV isolées dans le  $g^3$  et peut fonctionner à des températures tombant jusqu'à  $-25^{\circ}\text{C}$ , exactement comme avec le  $\text{SF}_6$ . C'était le tout premier projet comprenant des cellules disjoncteurs fonctionnant avec  $g^3$  comme moyen d'extinction de l'arc. Le mélange gazeux a été livré sur site sous forme pré-mélangée dans des bouteilles. La procédure de remplissage ou de récupération est similaire à la procédure du  $\text{SF}_6$ , en l'occurrence le remplissage se fait directement à partir des bouteilles. Un chariot de service dédié est utilisé pour remplir ou récupérer le gaz de l'équipement haute tension (image 13). Les appareils d'analyse de la qualité du gaz, les densimètres, les vannes de remplissage et le système d'étanchéité sont adaptés au  $g^3$ , mais fonctionnent comme ceux du  $\text{SF}_6$ . Même les cycles de maintenance restent les mêmes. Le poste a été mis sous tension en août 2018 (image 14).



Image 12 : Poste électrique d'Etzel d'Axpo dans les Alpes suisses



Image 13 : Chariot de service DIL0 dédié au  $g^3$ -utilisé sur le poste d'Etzel d'Axpo



Image 14 : PSEM 123 kV isolé au  $g^3$  installé et mis sous tension au poste électrique d'Etzel d'Axpo en 2018

## France

Rte, l'opérateur du transport d'électricité français a commandé sept travées 72.5 kV sous enveloppe métallique pour son poste électrique de Grimaud en France (image 15). Au moment de la commande, ce projet était le plus grand projet de poste F35 au  $g^3$ . Il a été installé sur site en septembre 2018. Le chariot de service, dédié au  $g^3$  et équipé d'un système de chauffage des bouteilles, a permis le remplissage des travées sur place. La manipulation du gaz  $g^3$  est similaire à celle du  $\text{SF}_6$ . Il ne requiert qu'une étape supplémentaire de chauffage des bouteilles de  $g^3$  pour faire passer le mélange de son état liquide à l'état gazeux. Après le remplissage, les composants du  $g^3$ , soit le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ , et l' $\text{O}_2$  ainsi que le taux d'humidité dans chaque compartiment sont mesurés et confirmés par l'appareil d'analyse de la qualité du  $g^3$  (Image 7)



Image 15 : PSEM de type F35 72.5 kV isolé au  $g^3$  installé au poste de RTE à Grimaud en France

## Conclusion

Ces premiers projets démontrent que les outils conçus pour la manipulation du  $g^3$  fonctionnent de façon très fiable ceci même dans des conditions climatiques particulièrement difficiles et que le processus de remplissage du nouveau gaz est pratiquement inchangé par rapport au  $\text{SF}_6$ .

De nombreux projets  $g^3$  sont actuellement en cours de réalisation. Ils démontrent à quel point il est simple d'implanter des produits haute tension au  $g^3$  dans les phases de fabrication, d'ingénierie, d'exécution des projets, d'installation et de réception de l'équipement. Comme le montre l'image 16, les produits au  $g^3$  de GE ont déjà été adoptés par 16 opérateurs de réseaux électriques dans le monde.

## Adoption du g<sup>3</sup>

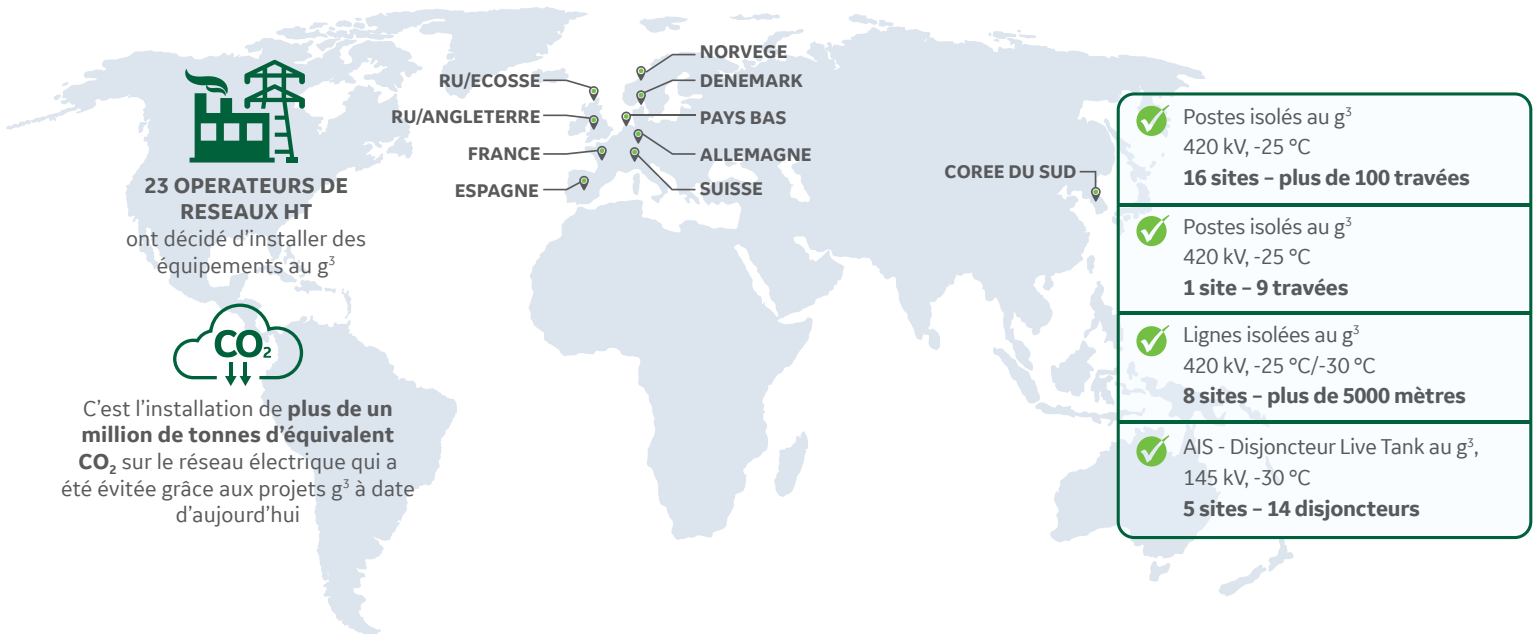


Image 16 : Adoption mondiale du g<sup>3</sup>



## GE Grid Solutions

Tel: 1-877-605-6777 (toll free in North America)  
678-844-6777 (direct number)

[GEGridSolutions.com](http://GEGridSolutions.com)

Copyright © GE, 2021, GE. All rights reserved.

GE and the GE monogram are trademarks of General Electric company. 3M, Novec and 3M logo are trademarks of 3M company. Air Liquide's name and logo are trademarks of Air Liquide SA. DILO's name and logo are trademarks of DILO GmbH. Wika's name and logo are trademarks of WIKA Alexander Wiegand Beteiligungs-GmbH. Axpo's name and logo are trademarks of Axpo Grid AG. RTE is a trademark of Réseau de Transport d'Electricité SA. Scottish Power is a trademark of Scottish Power Ltd. National Grid is a trademark of National Grid plc.

Photo Credits: GE's Grid Solutions

GEA-33137(FR)  
French  
210420