

Analyse des solutions permettant de résoudre les problèmes de pollution sur les isolateurs des lignes aériennes de transport d'énergie

J.M. George
Sediver Research Center
Saint-Yorre, France
jm.george@sediver.com

D. Lepley
Sediver Research Center
Saint-Yorre, France

F. Virlogeux
Sediver Research Center
Saint-Yorre, France

Résumé— Les problèmes de contournement de chaînes d'isolateurs dans des environnements pollués ont été largement décrits dans la littérature spécialisée. Cependant on constate que ce problème reste d'actualité. La diversité des situations rencontrées nécessite une analyse plus fine que ce que le terme générique de « pollution » peut inspirer aux ingénieurs et techniciens. Lors de l'étude d'un projet de nouvelle ligne ou une réhabilitation d'une ancienne ligne, il est impératif de connaître les conditions environnementales parcourues par la ligne. Les techniques de mesure sont ici décrites, ainsi que les classifications permettant de caractériser la sévérité de l'environnement. Une fois la « pollution » connue, arrive le choix de l'isolateur. C'est-à-dire la technologie, le profil et le dimensionnement les plus adaptés. La méthode classique de définition de la ligne de fuite optimale sera revue. Cependant, il est important de comprendre qu'au-delà de ce concept, certains paramètres physiques peuvent prévaloir. En outre, on verra que, contrairement à certaines idées reçues, le profil d'un isolateur peut dominer le comportement sous pollution largement au-delà de la ligne de fuite. Certains essais décrits ici montreront comment différents profils utilisés sur des chaînes de ligne de fuite « équivalente » peuvent générer des comportements et des performances sous pollution différents. Par ailleurs, il est avéré aujourd'hui que l'utilisation d'un matériau hydrophobe tel que le silicone (sur un isolateur composite ou en revêtement sur des isolateurs en verre ou en porcelaine) est une solution adaptée donnant de bons résultats dans des environnements très fortement pollués. Le recul et l'expérience acquise aujourd'hui dans le monde confirment que dans certains cas ce matériau peut vieillir rapidement et conduire à des incidents sérieux en service, allant jusqu'à des chutes de ligne. Le mécanisme d'hydrophobicité sera revu ainsi que les phénomènes physico-chimiques qui en accélèrent le vieillissement. De là se dégagent certaines directions pour l'utilisation optimale des revêtements en silicone en particulier sur les isolateurs en verre trempé. Des solutions innovantes destinées aux équipes de maintenance commencent à se développer dans un contexte de « smart grid ». Parmi elles, la mesure de courant de fuite en temps réel permet d'agir en mode prédictif sur les lignes les plus polluées. Ce dispositif déjà en service dans plusieurs régions du monde sera présenté.

Keywords—insulator, toughened glass, pollution, overhead line, smart grid, monitoring

I. INTRODUCTION

Les lignes aériennes de transport d'énergie constituent un élément fondamental des infrastructures stratégiques d'un pays et en ce sens leur conception doit tenir compte des aléas les plus divers qui pourraient en compromettre le fonctionnement. Le coût des isolateurs installés sur les lignes de transport est estimé à environ 5% de l'ensemble de

l'investissement mais représente parfois 70% des incidents sur la ligne et 50% du coût de maintenance du réseau. Parmi les éléments extérieurs à prendre en compte, l'environnement de la ligne, et plus directement le risque de voir la surface isolante se recouvrir de polluants tels que du sel en bord de mer, poussières, sable... viennent perturber le bon fonctionnement du réseau.

Même lorsque ces dépôts ne sont pas intrinsèquement conducteurs, la condensation, le brouillard et d'autres événements en phase humide vont brutalement introduire un courant de surface sur l'isolateur qu'il faudra maîtriser d'une manière ou d'une autre. La gestion de la pollution implique un choix particulier du type d'isolateur lors de la conception de la ligne et le lavage des isolateurs en exploitation lorsqu'ils se trouvent aux limites de leur point de fonctionnement. A ce titre, la connaissance et la quantification de la pollution sont tout à fait importantes pour assurer la meilleure qualité de service possible du réseau.

La recherche de l'isolateur le plus adapté nécessite de comprendre certaines définitions et mécanismes physiques qui seront développés ici, ainsi que les conséquences sur les matériaux isolants à disposition des ingénieurs et concepteurs des lignes électriques. Des outils sont aussi à disposition des équipes de maintenance pour optimiser certaines interventions en mode prédictif grâce à l'utilisation d'isolateurs connectés qui permettent de connaître en temps réel leur niveau de pollution.

II. DEFINITION

Certaines définitions fondamentales sont à connaître pour aborder correctement les questions de pollution. Ci-après les principales notions relatives à ce sujet :

Ligne de fuite : La distance parcourue par un arc électrique à la surface d'un isolateur en longeant celle-ci d'une partie métallique à l'autre (figure 1).

Ligne d'arc : la distance la plus courte empruntée par un arc électrique lors d'un phénomène d'amorçage électrique (figure 1).

ESDD : Abréviation pour "Equivalent Salt Deposit Density". Il s'agit de la quantification du dépôt de pollution en surface sous forme de sel pouvant se dissoudre dans l'eau et susceptible de modifier la conductivité de la couche humide déposée sur un isolateur. Lorsque les sels sont dissous dans l'eau la conductivité de surface augmente favorisant la présence d'un courant sur la surface de l'isolateur. L'ESDD s'exprime en mg/cm^2 .



NSDD: Abréviation pour «Non-Soluble Deposit Density ». Il s'agit de la mesure du poids de polluants solides qui ne sont pas dissous par l'eau tels que poussière sable... Ces éléments vont fonctionner comme une éponge qui va absorber l'humidité d'un brouillard ou de la rosée du matin. Cette humidité va à son tour s'associer à l'ESDD pour favoriser le courant de surface. Le NSDD s'exprime en mg/cm^2 .

CUR : est le rapport entre ESDD en dessous de l'isolateur et ESDD sur le dessus de l'isolateur. Cette donnée caractérise le fait que la pollution est habituellement plus importante en dessous qu'au-dessus de l'isolateur du fait de l'auto nettoyage résultant de la pluie et du vent.

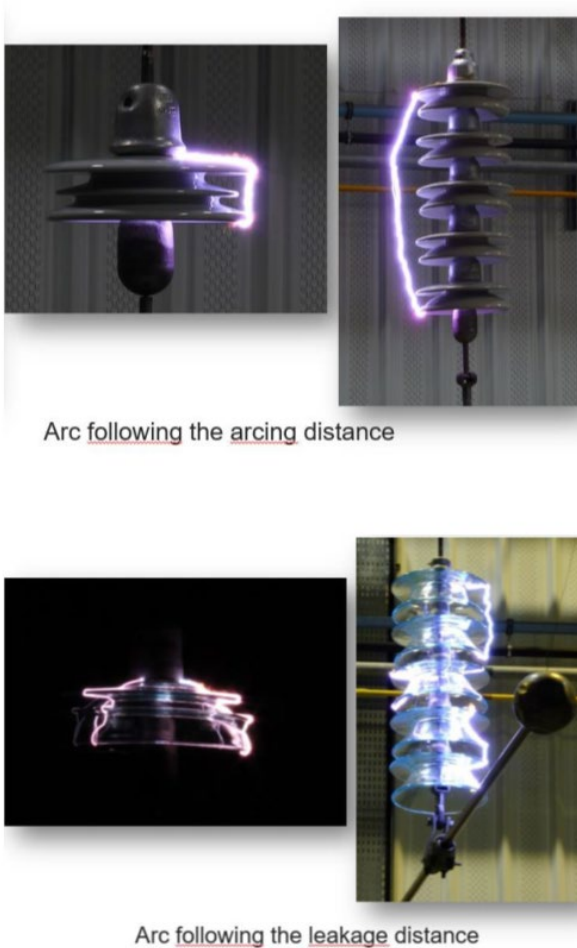


Fig. 1. Ligne d'arc (en haut) et ligne de fuite (en bas)

Courant de fuite: Le courant à la surface de l'isolateur lorsque celui-ci est recouvert de pollution. Si ce courant augmente en intensité l'activité électrique sur l'isolateur peut conduire à un contournement électrique autour de l'ensemble de l'isolateur ou de la chaîne isolante entraînant une mise à la terre de la ligne.

Ligne de fuite spécifique: le rapport entre la ligne de fuite d'un isolateur (ou d'une chaîne complète) et la tension maximum de service phase/terre de la ligne en question. Ce paramètre de conception de l'isolement d'une ligne s'exprime en mm/kV et est référencée par le terme USCD (Unified Specific Creepage Distance).

III. PREMIERE APPROCHE DANS LA SELECTION DES ISOLATEURS : LE DIMENSIONNEMENT D'UNE CHAÎNE ISOLANTE.

La sévérité de la pollution dans un lieu donné se mesure par l'ESDD et le NSDD. Cette mesure se fait par lavage de la surface d'un isolateur se trouvant dans cette zone. Le changement de conductivité de l'eau servant au lavage (mesure avant et après ce lavage) permet d'établir l'ESDD. La mesure du poids du polluant qui reste dans un filtre après passage de l'eau de lavage et séchage donne la valeur de NSDD (figure 2).

Lorsque l'ESDD et le NSDD sont définis on pourra reporter ces valeurs sur le graphique de classification de la pollution défini par le CEI 60815 [1] (figure 3).

Pour chaque classe de pollution la norme CEI donne un USCD moyen qui sert de référence pour déterminer la ligne de fuite recommandée pour un environnement donné (figure 4).

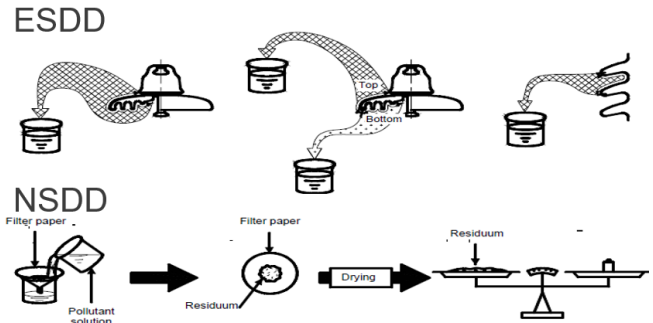


Fig. 2. mesure de l'ESDD/NSDD (source IEC 60507)

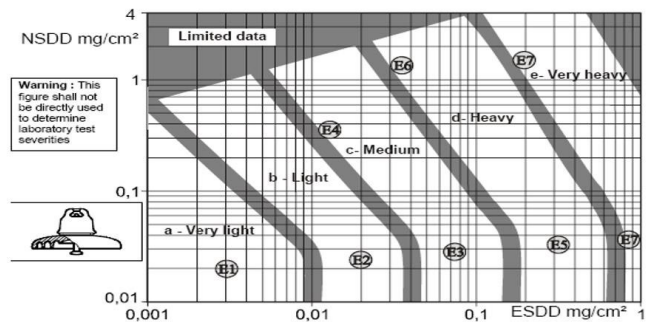


Fig. 3. : CEI 60815 classification des niveaux de pollution

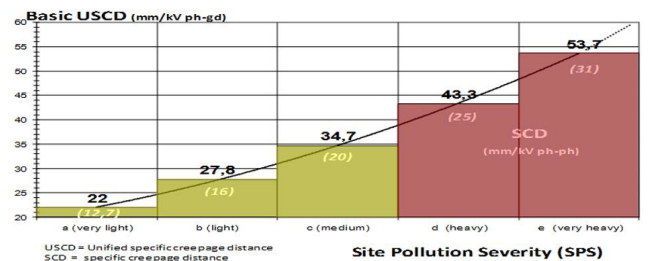


Fig. 4. : USCD typiques pour les différentes classes de pollution (CEI 60815)

Il existe différentes formes d'isolateurs capot et tige qui sont plus ou moins adaptées aux environnements spécifiques d'une région. Pour les plus courantes (figure 5) , les usages sont décrits dans la CEI 60815-1 :

- Forme « Standard » pour les usages classiques, sans pollution particulière.
- Forme « Fog type » encore appelée “à longue ligne de fuite”. Particulièrement adaptée aux bords de mer et pollution forte.
- Forme « aérodynamique » (aussi appelée “Open Profile”) qui a l’avantage de ne pas avoir de nervure et donc plus facile à nettoyer sous le simple effet du vent. Ce modèle est très adapté aux zones désertiques.

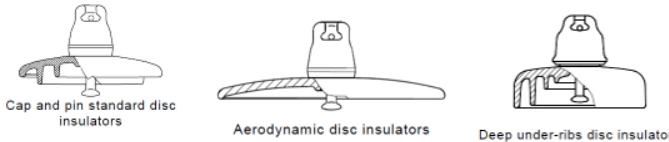


Fig. 5. Différents profils d’isolateurs selon CEI 60815-1

Il est possible de donner des recommandations « génériques » permettant de couvrir la plupart des situations habituelles selon les régions traversées par les lignes aériennes comme indiqué en figure 6 qui décrit les choix de profil par classe et type de pollution.

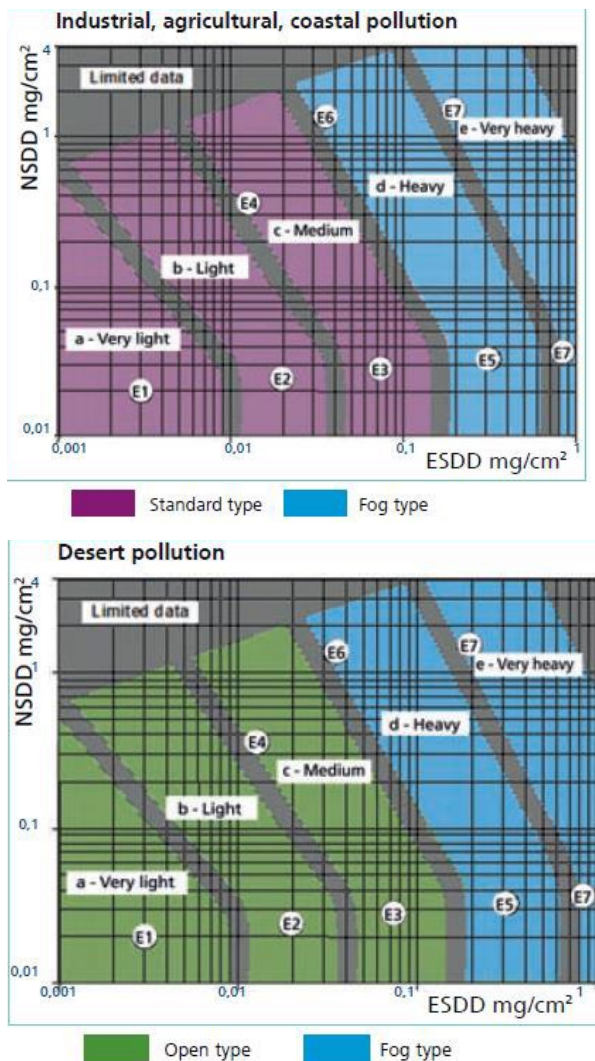


Fig. 6. Choix usuel de profil selon l’environnement du lieu de la ligne (catalogue SEDIVER) [2]

En particulier on retiendra que des profils «aérodynamiques» se comportent mieux dans des conditions désertiques principalement parce que le profil est « auto nettoyant » puisque le vent permet de mieux nettoyer la jupe que si les nervures étaient situées sur la partie inférieure de l’isolateur. [3]

Un autre aspect important lié à la forme de l’isolateur est la manière dont le courant et les arcs générés lors des phénomènes de bande sèche se comportent dans un profil donné. La figure 7 montre la comparaison en essai de brouillard salin (80g/l) de 3 formes différentes sur des chaînes de ligne de fuite similaire. Il apparait clairement que la forme dicte à la fois la valeur du courant de fuite critique et la tension de contournement de la chaîne. La ligne de fuite n’est donc clairement pas le seul critère de choix dans la conception et le choix d’un isolement de ligne aérienne.



Shape 1: Fog type (550mm) Shape 2: Outerrib 550mm Shape 3: Open profile (370mm)

	5 x F160P/170	5 x F160PH/170	6 x F160D/146
Leakage distance (mm)	2725	2750	2220
MAX WITHSTAND (kV)	80,6	53,2	49
Max withstand kV/m leakage	29,6	19,3	21,7
Mean leakage current during withstand steps (rms) mA	283	127	212

Fig. 7. Influence de la forme de l’isolateur sur la performance en brouillard salin [4]

IV. DEUXIEME FAMILLE DE SOLUTIONS : L’UTILISATION DES SURFACES HYDROPHOBES

L’utilisation de revêtement silicone a connu un grand succès du fait du caractère hydrophobe de ce matériau. Cette propriété se caractérise par le fait que l’énergie de surface du silicone force une goutte d’eau à rester ronde et mobile, lui interdisant de s’étaler sur la surface ce qui entraîne que la surface isolante restera globalement sèche, donc électriquement non conductrice. On caractérise cette propriété par un angle de goutte supérieur à 90° comme indiqué en figure 8.

Cette propriété va maintenir des niveaux de courant de fuite bas, ce qui favorise la tenue sous pollution. Cependant, pour que cela fonctionne il faut se poser la question du comportement de l’isolateur lorsque la surface hydrophobe est recouverte de poussière ou tout autre dépôt qui viendrait s’interposer entre le silicone et la goutte d’eau. En outre la seule raison pour laquelle une surface en silicone permet d’avoir de bonnes performances en pollution tient au fait qu’un mécanisme chimique de transfert d’hydrophobicité dans la pollution se produit par l’intermédiaire de molécules à bas poids moléculaire (appelées LMW). Ces molécules à bas poids moléculaire ont la capacité de migrer à travers la pollution. Par voie de conséquence la pollution elle-même devient hydrophobe.

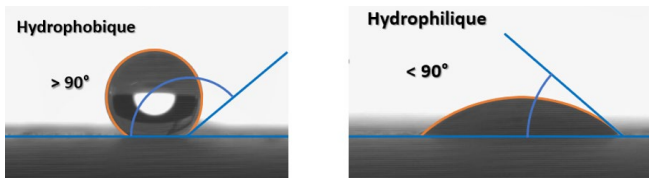


Fig. 8. Angle de contact d'une goutte sur une surface hydrophobe

Malheureusement l'hydrophobicité est un phénomène dynamique qui peut être interrompu temporairement ou définitivement lorsque l'isolateur est soumis à un champ électrique excessif (0.45mm/kV est la valeur limite et acceptée par les experts sur la base d'une étude américaine réalisée par EPRI [5]). La présence de corona ou d'arcs résultant des phénomènes de bande sèche (modèle d'Obenaus) va perturber la présence des LMW et détruire l'hydrophobicité. Même si cette propriété peut se régénérer dans le temps, le silicone lui-même aura souffert, ce qui dans certains cas et au bout d'un certain temps engendrera la formation de crevasses, typiques d'un phénomène d'érosion comme indiqué en figure 9.

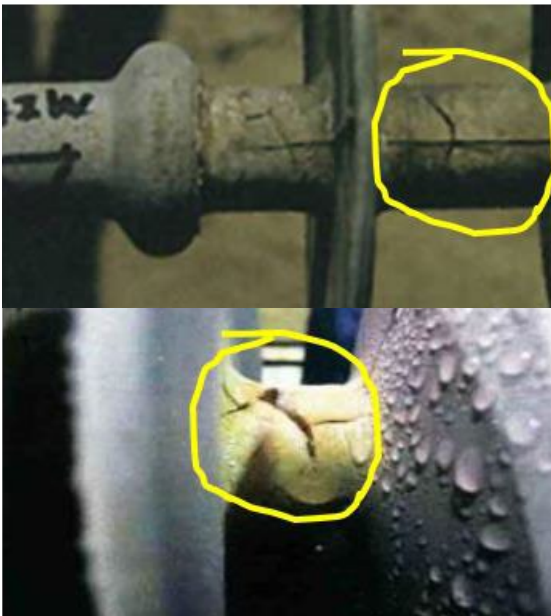


Fig. 9. Erosion de la surface de silicone des isolateurs composite dans un environnement très pollué

Les meilleures formulations de silicone comportent des additifs destinés à réduire la vitesse d'érosion, sans toutefois l'empêcher. Parmi les charges minérales les plus connues on citera le tri hydrate d'Alumine (ATH). On prendra comme référence la tenue du silicone dans un essai de plan incliné (IEC 60587) . Un bon silicone sera classé 1A4.5 lors de cet essai.

La difficulté avec les isolateurs composite réside principalement dans le fait que le vieillissement (prématuré) ou la dégradation du revêtement (par manipulation au montage par exemple) sont difficile à détecter lors des opérations de maintenance. L'expérience en service sur plusieurs décennies ainsi que les recherches en laboratoire ont démontré qu'un isolateur composite devient dangereux sitôt que le revêtement silicone est fissuré ou abîmé jusqu'au noyau de résine renforcé de fibres de verre (cœur de l'isolateur). Les ruptures fragiles, cheminement interne, « decay fracture » [8] (dans le cas de verre anti acide, ainsi que des ruptures fragiles avec verre anti acide [9]) sont autant de mécanismes connus

et identifiés comme des conséquences immédiates de ces dégradations. Le nombre important de ruptures d'isolateurs composite (plus de 350 incidents majeurs aux USA [7]) ainsi que dans de nombreux pays dans le monde est la raison du refus de nombreuses compagnies d'électricité dans le monde de poursuivre l'équipement des réseaux avec ces produits (surtout à l'échelon du transport). Mais dans ce cas, quelle alternative pour les zones polluées ?

En appliquant un revêtement de silicone sur la surface d'isolateurs traditionnels (verre ou porcelaine) on obtient la même fonctionnalité qu'avec des isolateurs composite sans avoir cependant le risque de chute de ligne. Les épaisseurs idéales de ce revêtement sont établies à environ 300µm à 450µm et plusieurs millions d'isolateurs, principalement en verre trempé (aucun défaut interne caché) sont en service depuis environ 20 ans. L'expérience acquise démontre aussi que le revêtement silicone doit être appliqué en milieu industriel de manière à contrôler épaisseur et adhérence. L'application sur site ne permet pas de contrôler la qualité du revêtement et certaines expériences en ligne ont prouvé ce point.

Là aussi les meilleurs revêtements silicone sont caractérisés par l'ajout d'ATH pour obtenir la meilleure résistance à l'érosion. Parmi les différents essais permettant de différencier la performance d'un bon coating, un essai est particulièrement pertinent. La figure 10 montre les résultats obtenus avec différentes chimies de silicone en revêtement sur du verre trempé lors d'un essai multi stress de 2000 h mis au point par TERNA (Italie) qui a déjà installé plus d'un million d'isolateurs en verre trempé avec revêtement silicone le long de ses côtes [10]. Cet essai combine le brouillard salin, les ultraviolets, la température, l'humidité et la pluie dans un cycle hebdomadaire.

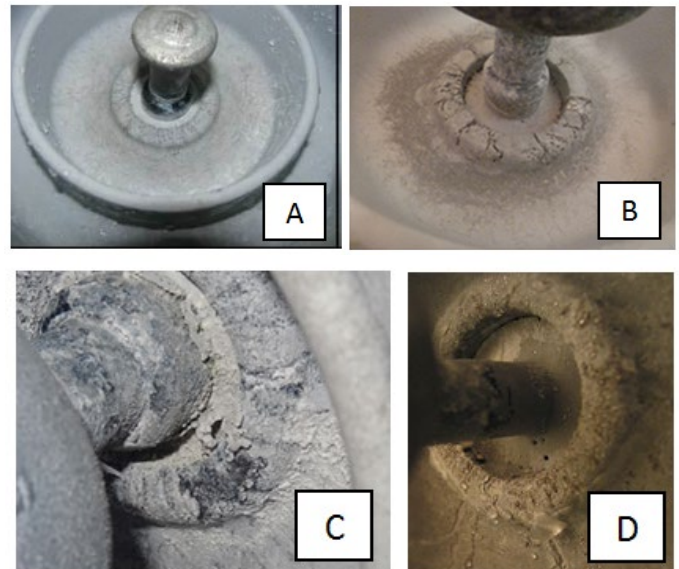


Fig. 10 A. Echantillons de différents types de revêtements sur isolateurs après l'essai de vieillissement 2000h

A : polymère 1 ATH type a – B: polymère 2 ATH type b – C: polymère 2 ATH type c – D: polymère 2 quartz

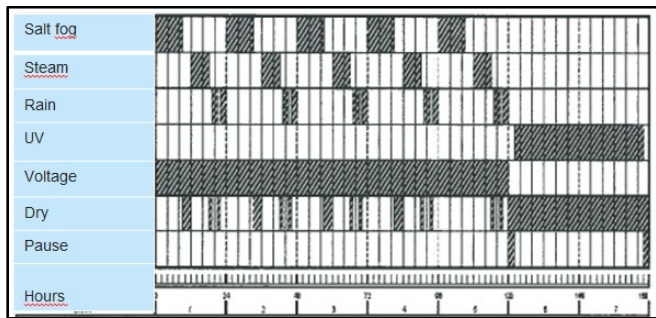


Fig. 10. B. Cycle de l'essai de vieillissement 2000h

La performance sous pollution d'isolateurs en verre recouverts de silicone a été validée par des essais en brouillard salin et en pollution solide comme indiqué en figure 11. Dans certaines régions le revêtement est appliqué uniquement en dessous de la jupe. Les performances sont très bonnes comme indiqué en figure 11

ESDD/NSDD 0.1/0.2 mg/cm ²	Non coated	Under coated	Fully coated
Withstand (kV)	76	112.5	126
Gain	100%	148%	166%
40g/l salt fog	Non coated	Under coated	Fully coated
Withstand (kV)	15	18.6	17.6
Gain	100%	122%	117%
USCD (mm/kV p/gnd)	29	24	25

Fig. 11. Essais en brouillard salin à 40g/l et en pollution solide avec un ESDD=0.1mg/cm² et NSDD=0.2mg/cm² sur isolateur en verre nu (non coated), recouvert de silicone uniquement en dessous de la jupe (colonne under coated) et complètement revêtu de silicone (fully coated)

A ce jour le retour d'expérience avec cette technologie est excellent, et progressivement l'isolateur en verre recouvert de silicone remplace les applications composites surtout dans les lignes de transport. Certains échantillons retirés pour expertise après environ 20 ans de service au Qatar ont été testés en laboratoire et montrent un comportement excellent en essai de pollution.



Non coated string : U50 = 73 kV
19 year old coated string: U50 = 240 kV (*)

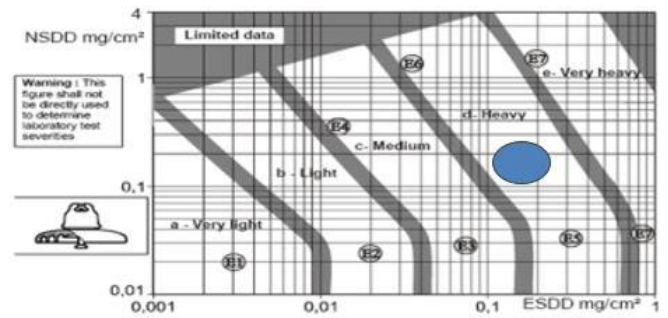


Fig. 12. Pollution mesurée sur isolateurs du Qatar (classe "heavy") et résultats des essais en pollution solide sur des échantillons après 20 années de service comparée à des isolateurs sans revêtement silicone.

V. « SMART GRID » ET COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION

Au-delà du choix même des isolateurs de ligne les équipes de maintenance ont le souci d'assurer que les niveaux de pollution atteints ne mettent pas en danger la continuité de service du réseau. A cet effet certaines lignes sont sujettes à des opérations de lavage plus ou moins fréquentes selon les lieux. La prévision du moment le plus opportun pour effectuer ce lavage, mais aussi l'étude de l'accumulation de pollution en temps réel pour mieux adapter le réseau peut donc s'avérer très utile.

A cet effet Sediver a introduit au cours des dernières années une technologie innovante de mesure du courant de fuite en temps réel avec transmission sans fil des données vers l'utilisateur ou le responsable de maintenance.

Le dispositif est intégré au capot de l'isolateur et la mesure du courant de fuite se fait directement à la base du capot du premier isolateur coté terre (figure 13). C'est donc un isolateur instrumenté mais qui contribue normalement comme le reste de la chaîne à l'isolement de la chaîne. Les circuits électroniques ainsi que les capteurs de température et d'humidité (qui sont des données essentielles à l'interprétation du courant de fuite) se trouvent dans un « end point » situé sur le pylône à proximité de la chaîne d'isolateurs. Les données sont transmises par le réseau LORA (si disponible dans la région) ou par GSM vers le réseau internet puis utilisées dans nos serveurs pour être interprétées et mises en forme (figure 14). L'utilisateur aura ainsi accès aux données traitées avec un diagnostic de risque associé.



Fig. 13. Chaîne équipée sur le réseau (gauche) « end point » (centre) et isolateur connecté (droite)

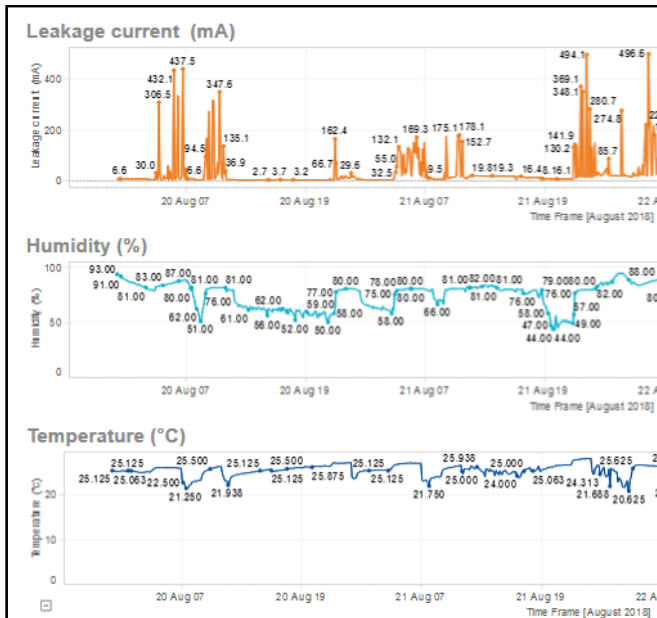


Fig. 14. Exemple de relevés de courant de fuite.

VI. CONCLUSION

Les problèmes de pollution sur les lignes de transport d'énergie nécessitent une approche spécifique au cas par cas

en utilisant les techniques disponibles aujourd'hui ainsi que l'expérience acquise. Le choix des formes les plus adaptées et les définitions de ligne de fuite optimale se déduisent de la mesure de la pollution grâce à une méthode rationnelle coordonnée par les normes dans leur version la plus récente.

L'utilisation de silicone par le biais d'isolateurs composite montre aujourd'hui ses limites avec une durée de vie réduite et des risques d'incidents importants qu'il est difficile de prévoir car les méthodes d'inspection ne permettent pas d'anticiper avec précision leur degré d'endommagement. Face à cela l'utilisation de silicone sur du verre trempé permet d'associer les bénéfices de l'hydrophobicité du silicone et la résilience du verre trempé.

Des techniques innovantes de mesure de courant de fuite en temps réel sur les lignes des zones polluées permettent aujourd'hui d'avoir une lecture directe des conséquences de la pollution sur le réseau et apportent aux équipes de maintenance un outil permettant une action préventive dans les zones pour lesquelles un lavage est nécessaire. Ces outils permettent aussi d'établir des cartes de pollution dynamiques sur un réseau.

REFERENCES

- [1] "IEC 60815-1 : Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles," IEC standard, 2008.
- [2] "Sediver toughened glass insulators for HVAC applications catalog," 2018.
- [3] Znaidi R, "Recherche de corrélation entre la pollution artificielle et la pollution naturelle dans un milieu marin et désertique en Tunisie," Cigre Symposium Cairns, Australia, 2001.
- [4] S. Prat, J.M. George and J.P. Lopez, "Performance evaluation method and optimum selection of overhead line insulators for contaminated environments," INMR 2009 World Congress Crete, 2009.
- [5] A. Phillips, J. Kuffel, A. Baker and al., "Electric fields on AC composite transmission line insulators," IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, pp. 823-830, April 2008.
- [6] "IEC 60587 :Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion," IEC standard, 2007.
- [7] A Phillips, "EPRI survey of application of overhead transmission line polymer insulators in North America & summary of EPRI polymer insulator failure database," Proc. of the World Conference. Exhibition on Insulators, Arresters, Bushings (INMR), Spain, 2003.
- [8] J. Wang, X. Liang and Y Gao, "Introduction to decay-like fracture of composite insulator," 18th ISH, Korea, pp. 1240-1245, August 2013.
- [9] D. Luder, S. Ariel and M Yalin, "Stress corrosion cracking and brittle failure in a fiber reinforced plastic (FRP) insulator from a 400 kV transmission line in humid environment," Engineering Failure Analysis, Vol. 95, pp. 206-213, 2018.
- [10] J.M. George, S. Prat, M. Marzinotto, I. Gutman and al., "Field Experience and Laboratory Investigation of Glass Insulators having a Factory-applied Silicone Rubber Coating," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, December 2014.