

## Article

# Retour d'expérience sur la surveillance des systèmes de câbles HT

### Auteurs

**W. KOLTUNOWICZ, U. BRONIECKI, D. GEBHARDT, O. KRAUSE**

### Date

May 2019

### Produit OMICRON associé

MONCABLO

### Domaine d'application

Surveillance permanente des décharges partielles (DP) en ligne sur les câbles HT

### Mots clés

Surveillance de décharges partielles, surveillance DP, câbles haute tension, câbles HT, terminaisons de câbles, joints de câbles

### Version

v1.0

### Résumé de l'article

L'article présente un concept innovant de surveillance de l'état de l'isolation de systèmes de câbles haute tension en polyéthylène réticulé (XLPE). Cet article se base sur une étude de cas d'un client qui utilise notre système de surveillance des décharges partielles (DP) en ligne MONCABLO pour évaluer de manière continue l'état de l'isolation d'un système de câbles de puissance souterrain.

## Introduction

Entre 2000 et 2005, 119 défauts dans des systèmes de câbles HT d'une tension nominale comprise entre 60 kV et 500 kV ont été rapportés par le CIGRE. Près de 50 % de ces défauts sont imputables à des facteurs externes (conditions anormales du système, autres paramètres externes physiques, dommages mécaniques causés par des tiers, etc.). La même étude indique que les systèmes de câbles directement enterrés sont 10 fois plus susceptibles d'être détériorés par les conditions externes que les systèmes de câbles installés dans des conduites ou tunnels.

En ce qui concerne les accessoires XLPE, la Figure 1 présente leur taux de défaut réparti en deux classes de tension, en-dessous et au-dessus de 220 kV.

Les extrémités extérieures dans les classes de tension les plus élevées connaissent le taux de défaut le plus élevé. La durée de réparation moyenne des systèmes de câbles XLPE est d'environ 20 jours.

Des informations similaires sur les taux de défaut ont également été présentées dans une étude menée par un groupe de quatre grandes compagnies d'électricité européennes. Les systèmes de câbles longs engendrent un risque supérieur dans les réseaux de distribution. Comme les tests de routine des câbles et accessoires réalisés en usine sont bien établis, une plus grande attention est à présent accordée aux tests post-installation et à la surveillance de l'état pendant l'utilisation des câbles. La valeur de décharge partielle (DP) est un indicateur de diagnostic important pour la qualité de l'isolation des câbles.

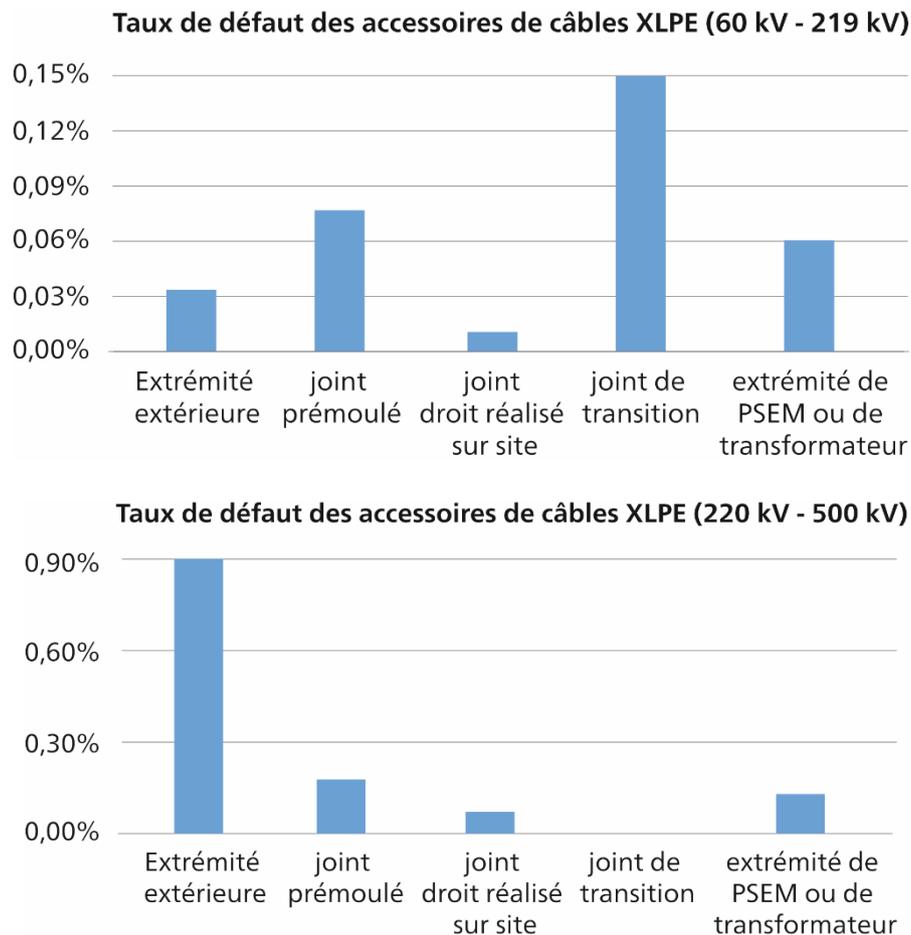


Figure 1. Taux de défaut parmi les accessoires de câbles XLPE pour la classe 60 kV - 219 kV (en haut) et 220 kV - 500 kV (en bas)

## Mesures des DP

La mesure des DP est à l'heure actuelle une méthode largement reconnue d'évaluation de l'état de l'isolation des câbles HT et une composante nécessaire des tests de mise en service. Différentes solutions pour les capteurs et techniques d'acquisition ont été recommandées, appliquées et enfin reconnues par les normes internationales et les organismes techniques.

C'est la raison pour laquelle les compagnies d'électricité doivent être formés en permanence aux différentes technologies et, dans de nombreux cas, dépendent d'une expertise externe. Par conséquent, il existe un fort besoin pour un système de surveillance de DP polyvalent, utilisable sur différents types de câbles (XPLE, sous pression d'huile et de gaz), avec différentes tensions nominales pouvant atteindre 500 kV, et installés dans des tunnels ou directement enterrés. De plus le système doit être en mesure de prendre en compte d'autres données d'état du câble, telles que la pression d'huile des extrémités étanches, l'état des limiteurs de tension de gaine au niveau des transpositions, le courant de gaine, etc.

Les défis liés à la conception et à l'installation d'un tel système de surveillance des DP sur les câbles enterrés et en tunnel sont abordés dans cet article. Ils porteront sur la conception et les fonctions du système de surveillance en vue des tests de mise en service et des inspections de maintenance pendant l'utilisation du système de câbles (Figure 2). Les aspects suivants seront traités plus en détail dans cet article : positionnement des capteurs et tests types du boîtier de jonction, alimentation du système de surveillance installé au niveau des câbles enterrés et en tunnel, localisation des défauts et surveillance des paramètres additionnels.

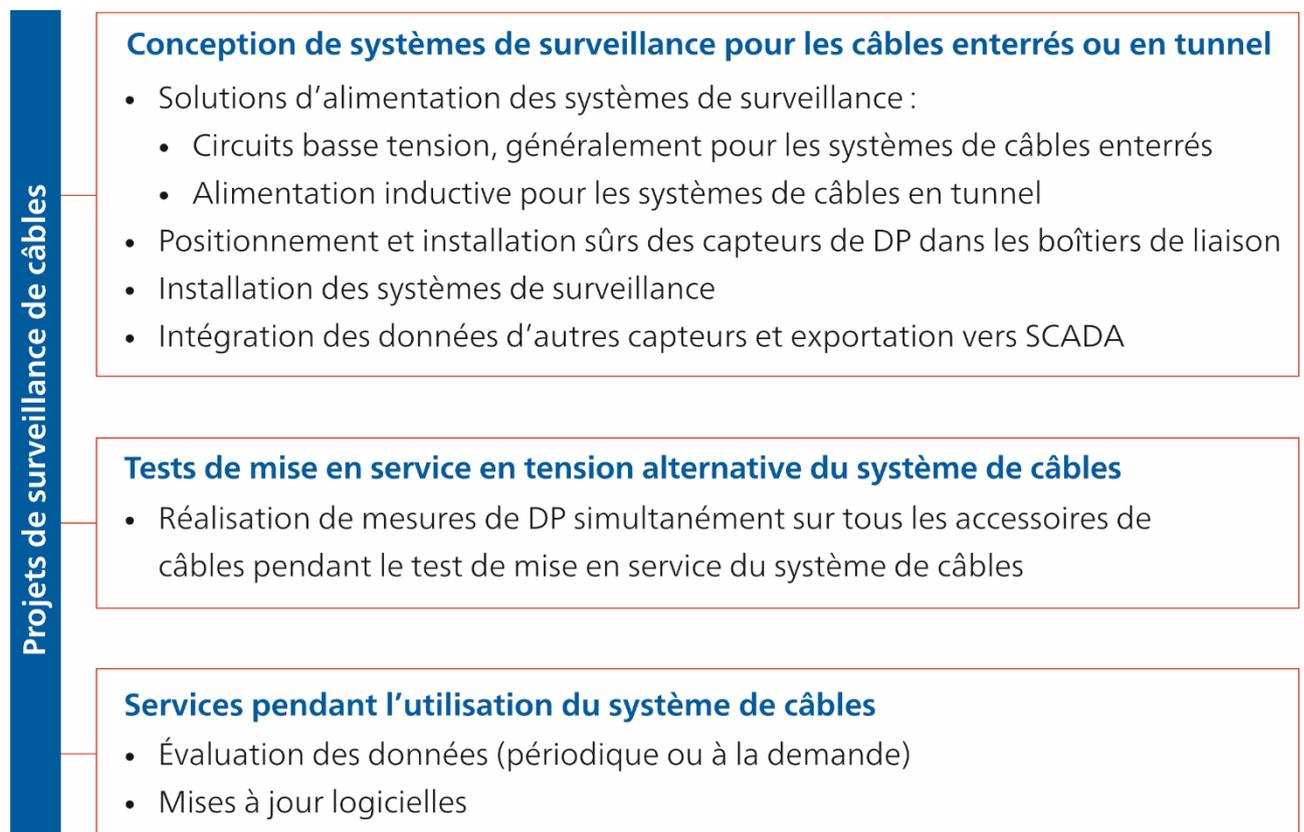
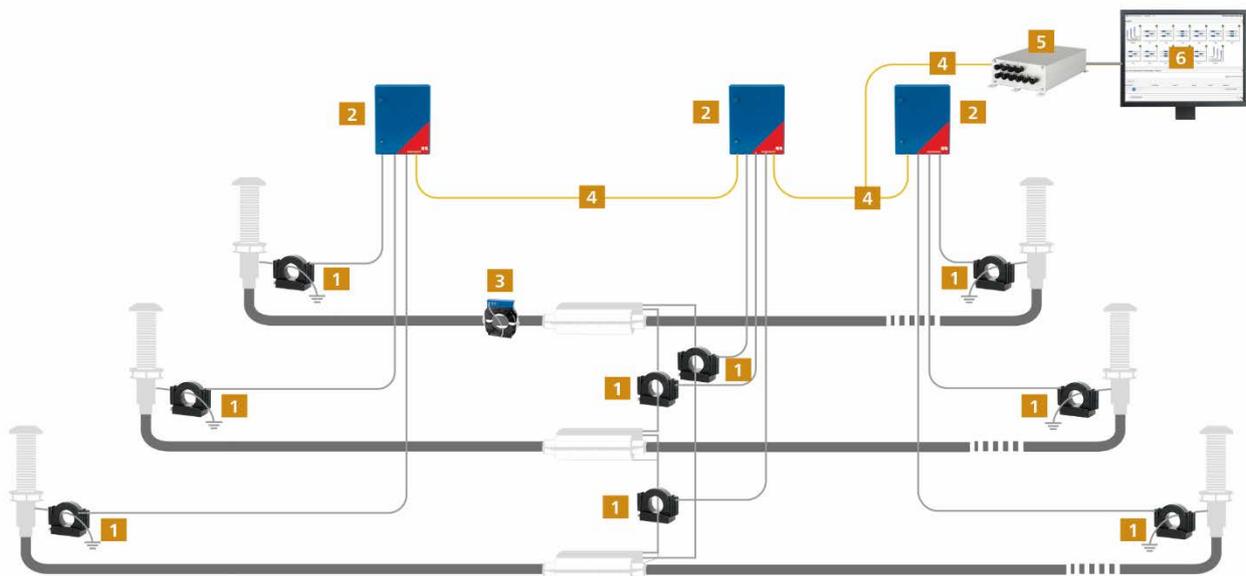


Figure 2. Éléments du projet pendant la conception, l'installation et l'utilisation d'un système de surveillance de câbles

## Architecture du système de surveillance

L'architecture du système de surveillance est présentée pour les systèmes de câbles longs à la Figure 3a et pour les liaisons de câbles courts à la Figure 3b. Le signal de DP est détecté par des capteurs inductifs installés dans les boîtiers de liaison et sur les extrémités de câbles. Les informations provenant des capteurs de DP sont acquises de manière synchrone par une unité d'acquisition de données multicanale. La synchronicité entre les canaux est indispensable pour le traitement des signaux avancés, permettant la séparation des sources de signaux, la localisation des défauts, etc. Ensuite, l'unité d'acquisition extrait les principales caractéristiques des signaux de DP et les transfère vers un ordinateur, pour un stockage à long terme des données et un post-traitement plus poussé.



- 1) Capteur de DP (HFCT)
- 2) Unité d'acquisition
- 3) Alimentation inductive
- 4) Câble à fibre optique
- 5) Unité de contrôle
- 6) Ordinateur central avec logiciel de surveillance

Figure 3a. Architecture du système de surveillance pour un système de câbles longs

Les unités d'acquisition sont configurées et contrôlées à distance via TCP/IP par le logiciel du système de surveillance. Cela permet aux opérateurs de réagir rapidement aux problèmes détectés et d'accéder aux données stockées depuis n'importe quel emplacement distant.

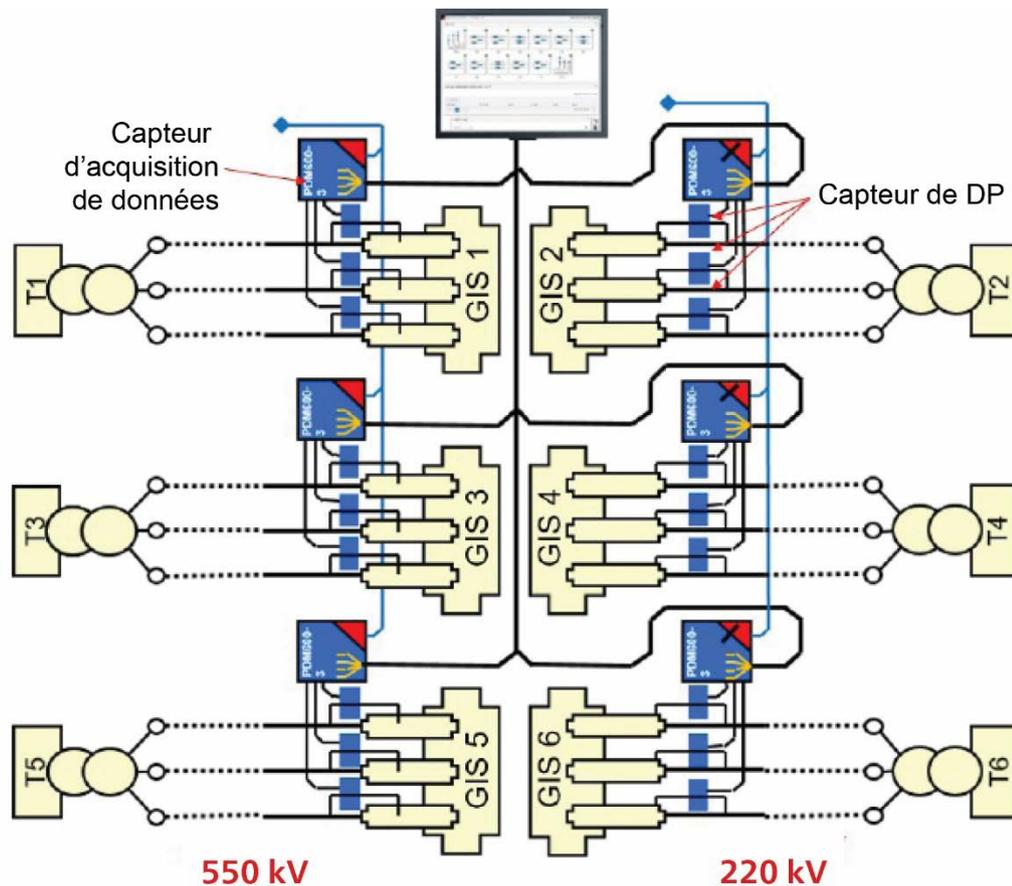


Figure 3b. Exemple d'architecture de système de surveillance pour des câbles courts de 220 kV et 550 kV, liaison entre transformateurs

## Disposition des capteurs de DP

Pour la détection des signaux de DP, des capteurs intégrés dans les jonctions ou des capteurs externes installés sur les permutations des écrans sont les options les plus courantes. Dans le cas de systèmes de câbles en tunnel, l'installation des capteurs de DP sur les jonctions des câbles est facile, mais certaines précautions doivent être prises lorsque les capteurs sont installés dans les boîtiers de permutation, car leur installation réduit l'espace entre les barres de permutation (Figure 4).

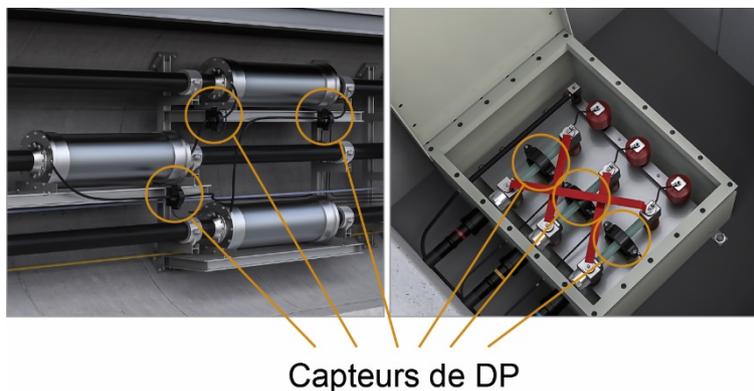


Figure 4. Installation de capteurs de DP sur une jonction de câbles en tunnel (à gauche) et dans le boîtier de liaison d'un câble enterré (à droite)

Par conséquent, le type du boîtier de liaison avec les capteurs de DP installés doit être testé afin de garantir une exploitation sûre sur le long terme. Des tests en tension alternative et par impulsion, ainsi que du courant de court-circuit et de formation d'arc interne sont nécessaires.

## Alimentation du système de surveillance

Le vrai défi en matière de surveillance de systèmes de câbles longs est l'alimentation des unités d'acquisition installés au niveau des jonctions, qui se situent généralement dans des zones distantes sans accès direct ou proche d'une source d'alimentation. En fonction du mode d'installation des câbles, différentes solutions permettent de surmonter ce défi. Pour les systèmes de câbles en tunnel, des alimentations inductives spécialement développées peuvent être la solution. L'alimentation inductive (Figure 5 - gauche) fournit à l'unité d'acquisition suffisamment de puissance, même en cas de très faible charge du système de câbles. Elle est dotée de l'électronique nécessaire pour superviser et gérer le courant continu délivré en sortie, en fonction des diverses situations de charge de courant du câble HT, et pour filtrer toute perturbation des mesures de DP à proximité.

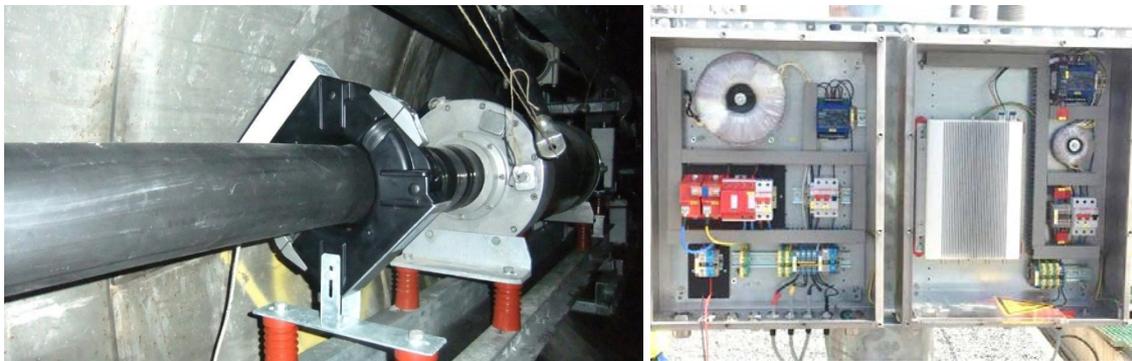


Figure 5. Solutions d'alimentation pour les systèmes de câbles en tunnel (à gauche) et enterrés

Dans le cas de câbles enterrés, la mise en place d'un conducteur basse tension (BT) avec le câble de puissance est assez courante. Pour assurer un fonctionnement sûr, un circuit de suppression des transitoires spécialement conçu doit être installé sur chaque jonction (Figure 5 - droite). Cela garantit la protection en cas de surtensions mobiles générées par la foudre sur les extrémités de câble ou à proximité du boîtier de liaison, par des commutations dans le réseau ou par des courants d'appel. Pendant le fonctionnement normal, le circuit BT est alimenté par le poste à l'une des extrémités de câble. En cas d'interruption, l'alimentation du circuit est possible depuis les deux extrémités de câble. Outre les parafoudres prévus pour supprimer les tensions de mode commun et de mode différentiel, un contrôleur de température est installé dans l'armoire d'alimentation électrique.

## Logiciel de surveillance

### Structure du logiciel

Le logiciel est un système évolutif et hautement modulaire. Son architecture se compose d'un noyau Windows et d'une partie contrôlée par interface Web [8]. Le noyau du logiciel de surveillance est conçu sous forme de services Windows et fonctionne en continu sans aucune interaction directe de l'utilisateur. Le système permet la collecte et la persistance des mesures, le post-traitement et l'analyse des données, les tâches de sécurité pour l'accès aux données et les opérations système, ainsi que les interfaces externes pour l'échange de données via Ethernet ou un bus de terrain.

Le système de surveillance reçoit des données de chaque unité d'acquisition en deux modes : permanent et périodique. En mode permanent, les données sont acquises toutes les secondes, comparées à des valeurs seuil et affichées dans l'interface utilisateur graphique en temps réel. Quand elles se trouvent dans les marges normales, elles sont colorées en vert. Si les valeurs dépassent les seuils d' « avertissement » ou d' « alarme », elles sont colorées en jaune ou en rouge, respectivement. Les données en mode permanent peuvent être visualisées simultanément pour tous les emplacements surveillés ou individuellement pour chaque emplacement. Une comparaison des valeurs scalaires pour tous les accessoires de câble est également possible (vue comparative).

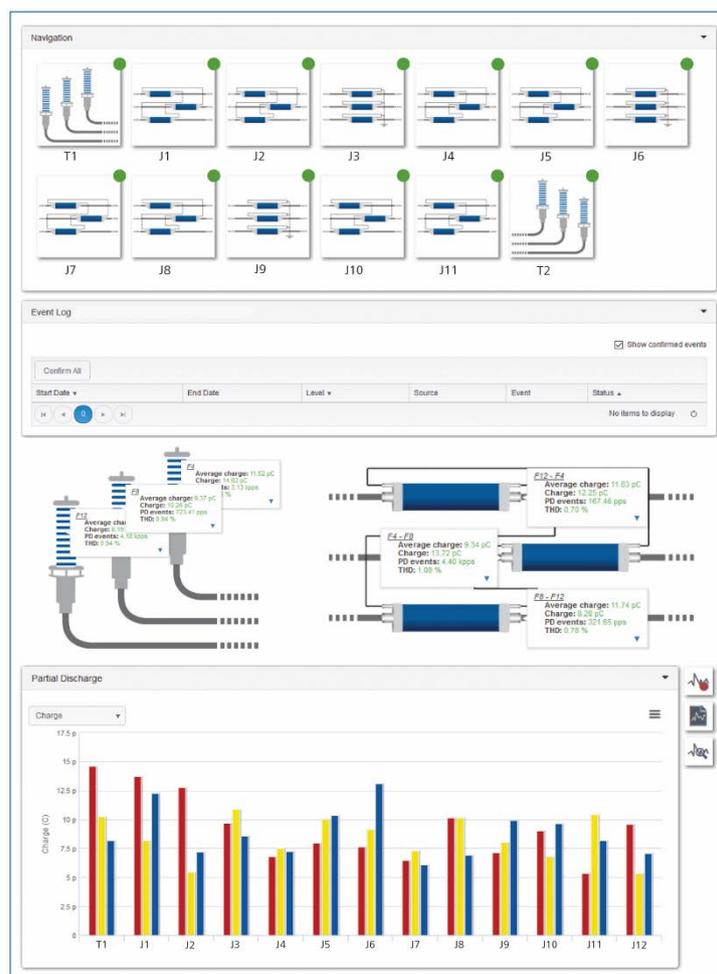


Figure 6. Visualisation en temps réel des données en mode permanent du logiciel de surveillance

Des mesures périodiques sont initiées à des intervalles équidistants, comme toutes les heures. La durée de la mesure périodique est normalement de 1 minute. Pendant ce laps de temps, toutes les valeurs scalaires sont calculées et des diagrammes PRPD et 3PARD (3 Pulse Amplitude Relation Diagram ) sont acquis [9]. Ces données sont enregistrées pour post-traitement et visualisation des tendances.

Des mesures périodiques non planifiées sont déclenchées si une ou plusieurs quantités mesurées dépassent les niveaux de seuil prédéfinis. En outre, le système de surveillance enregistre les ensembles de données (sur une base périodique ou déclenchés par des événements) et procède à une séparation automatisée entre plusieurs sources de signaux, indiquant la phase la plus probable de leur origine afin de faciliter l'interprétation des données par des utilisateurs non expérimentés. La Figure 7 présente les données (valeurs scalaires et images) enregistrées pour chaque point de l'histogramme. Le logiciel du système de surveillance est également responsable de la communication et du transfert des données vers les systèmes de supervision via des interfaces physiques et protocoles universels. Simultanément, le système de surveillance est capable de traiter et de visualiser les données provenant de capteurs tiers via la même interface Web. L'utilisateur peut être notifié à tout moment par e-mail/SMS du dépassement des seuils prédéfinis, avec l'emplacement et l'horodatage de l'évènement.

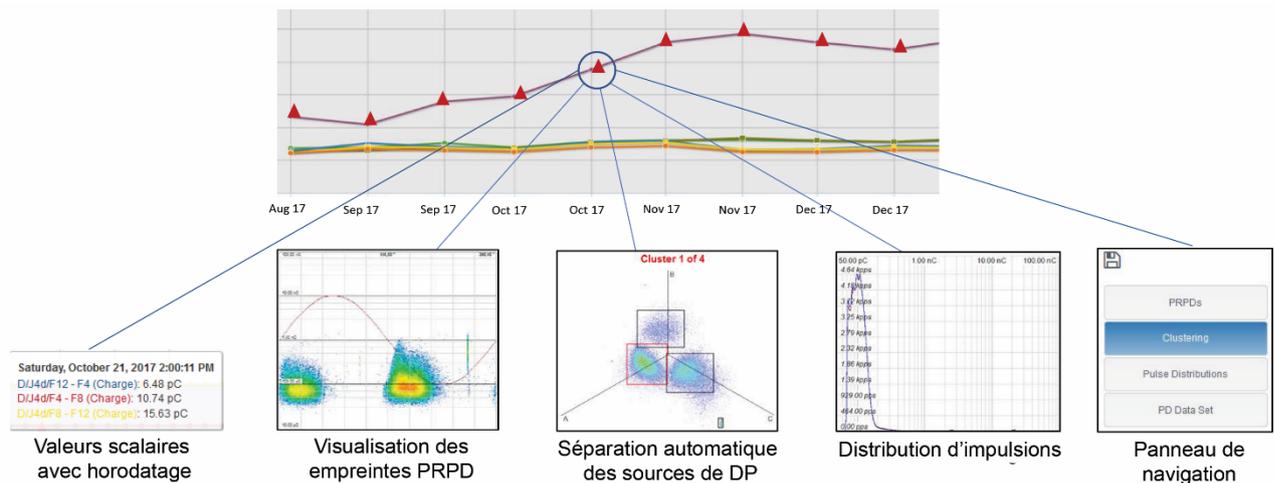


Figure 7. Visualisation des valeurs scalaires et des images enregistrées pour chaque point de l'histogramme

## Outils d'évaluation automatisée des données

Pour une évaluation automatisée des DP, le logiciel utilise des outils spécifiques permettant de séparer les groupes PRPD des différentes sources de signaux de DP régulièrement (par ex. une fois par jour) ou lorsqu'elles sont déclenchées par des événements et/ou par l'utilisateur.

La production du diagramme 3PARD est possible grâce à l'acquisition synchrone des données. Ce diagramme visualise la relation entre l'amplitude d'une impulsion de DP unique dans une phase et les amplitudes des signaux qu'elle génère dans les deux autres phases par couplage. En répétant cette procédure sur un grand nombre d'impulsions de DP, les sources de DP à l'intérieur de l'équipement à tester, ainsi que les bruits extérieurs, apparaissent sous forme d'une concentration de points clairement identifiable dans un diagramme 3PARD. La séparation des sources est réalisée régulièrement ou lorsque le seuil d'alarme/avertissement est dépassé.

En cas de signaux de DP, l'unité d'acquisition effectue un pré-traitement avancé des données brutes. Les perturbations sont éliminées et les caractéristiques principales du signal de DP déterminées et transférées à l'ordinateur, ce qui permet un stockage à long terme des données.

L'acquisition des données est réalisée de manière synchrone sur tous les canaux de toutes les unités d'acquisition du système de surveillance. La synchronicité entre plusieurs unités d'acquisition est obtenue grâce à leur connexion en chaîne via un câble à fibre optique (FO), préinstallé dans le câble de puissance. Pour empêcher toute perte de données due à des interruptions de FO, la chaîne débute et se termine au niveau de l'ordinateur central. Pendant le fonctionnement normal, les données sont transmises dans un seul sens, tandis qu'en cas d'interruption (dont l'emplacement est indiqué par le système de surveillance), les données sont transférées via deux trajets.

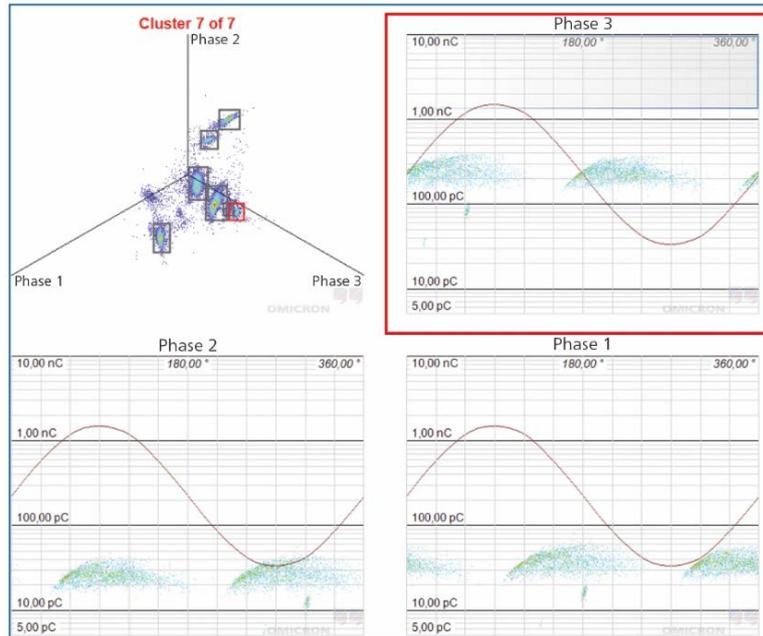


Figure 8. Exemple de séparation des sources avec 3PARD

## Localisation des défauts

La fonctionnalité de localisation des DP repose sur un algorithme unique réalisant une évaluation statistique des impulsions originales et de leurs réflexions à deux points différents du câble, où des unités d'acquisition sont installées. Cette fonctionnalité est possible grâce à l'acquisition synchrone des données entre toutes les unités d'acquisition. Pendant le fonctionnement du câble, les unités d'acquisition adjacentes à la source du signal à étudier seront utilisées comme unités de déclenchement et de corrélation. La distance entre l'unité de déclenchement et l'emplacement de la source du signal est automatiquement calculée et affichée dans le logiciel de diagnostic.

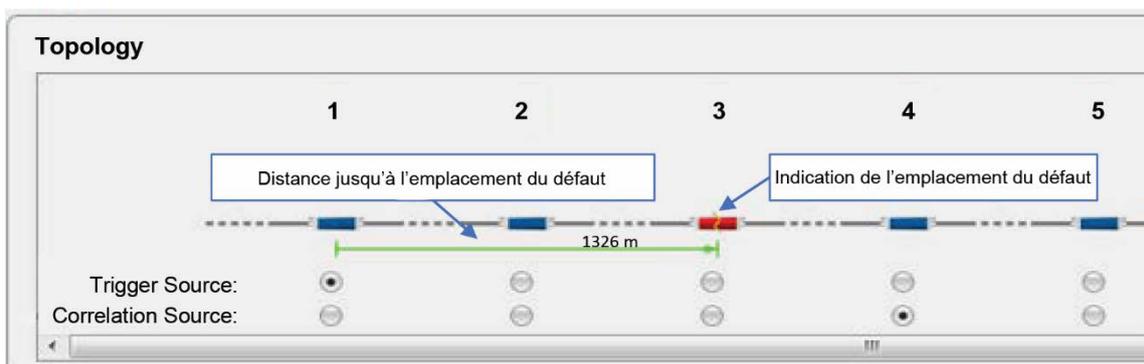


Figure 9. Fonctionnalité de localisation de DP du système de surveillance

## Tests de mise en service

Des tests HT sont réalisés sur site pour tous les câbles HT extrudés, et généralement, des procédures de test sur site doivent être négociées entre le fabricant et l'exploitant, sur la base de normes nationales et internationales.

Les tests diélectriques réalisés sur site ne remplacent pas les essais de type ni les essais individuels de série. Ils complètent les essais individuels de série diélectriques et visent à vérifier l'intégrité diélectrique de l'ensemble de la ligne de câbles installée afin d'éliminer les défauts tels que les dommages liés au transport et à la mise en place, ou un mauvais montage des accessoires. Le travail d'installation sur site présente un risque résiduel d'introduction de défauts, car les conditions ne sont pas idéales pour l'installation d'accessoires THT. De petites particules, de la poussière, de l'humidité, des gouttelettes, etc. peuvent entraîner des défauts dans les emplacements électriques critiques des accessoires, susceptibles de réduire la durée de vie du système de câbles ou engendrer une panne. Il est donc important de pouvoir détecter, localiser et identifier le défaut. Les défauts produiront des décharges partielles si le champ électrique local au niveau du défaut dépasse la valeur de seuil d'apparition des DP.

La tension souhaitée pour les tests en usine est une tension alternative à fréquence industrielle, qui est standardisée pour les tests en laboratoire dans la plage de 45 à 65 Hz. Pour les tests sur site, une tolérance de fréquences entre 20 et 300 Hz est acceptable. Une bobine de résonance à inductance fixe et une excitation variable en fréquence est généralement utilisée pour injecter la tension de test.



*Figure 10. Montage de test par résonance pour tester le système de câbles*

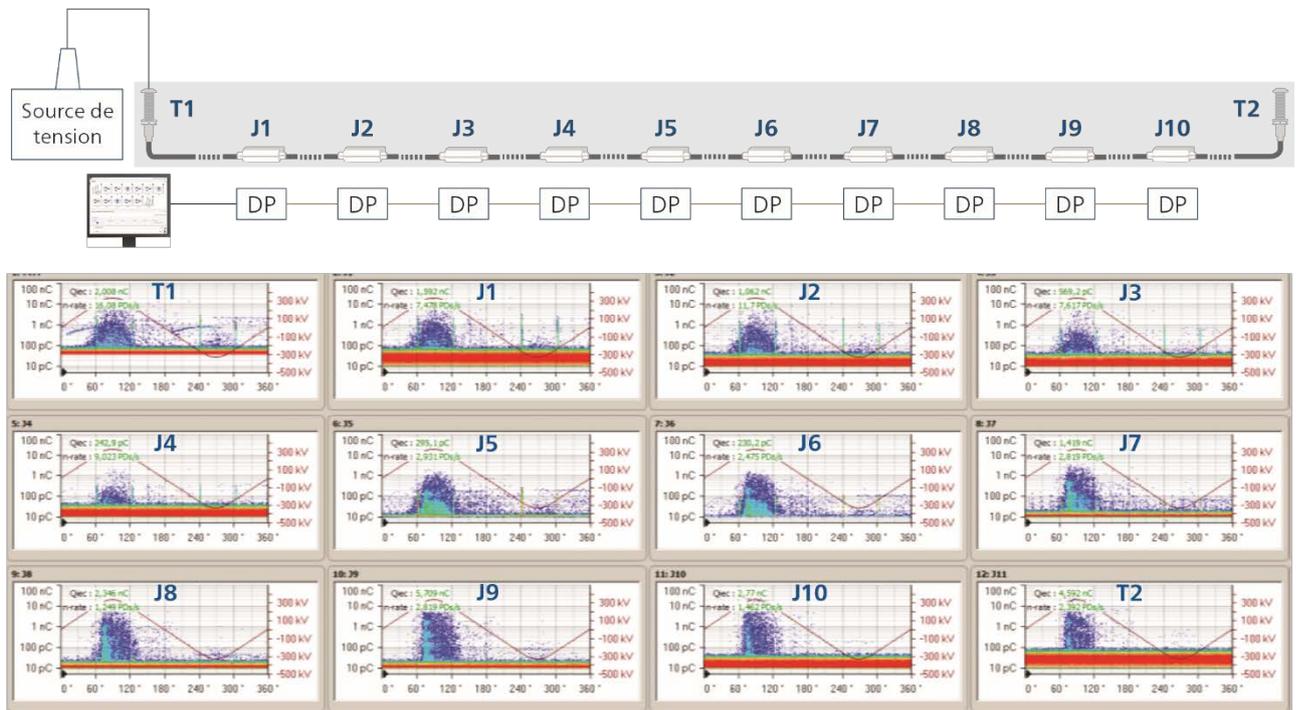


Figure 11. Exemple de mesures de DP en mise en service sur tous les accessoires d'un système de câbles

Lorsqu'un test HT sur site peut être effectué avec les mesures des DP, toute l'expérience des essais individuels de série en usine peut être transférée aux tests sur site. Comme les câbles HT doivent être testés sur le site de fabrication avant expédition, les mesures de DP sur site se concentrent sur les accessoires.

Le système de surveillance continue de DP est préparé pour être utilisé pendant les tests diélectriques de mise en service. L'enregistrement simultané complet de l'activité de DP sur tous les accessoires est effectué et le signal de DP est synchronisé avec la source de tension de test.

## Surveillance de câbles XLPE en tunnel – étude de cas

La ligne de câbles XLPE 230 kV mesure 6 km de long et la première partie du câble est installée dans un tunnel souterrain. La seconde partie du câble est enterrée. La ligne de câble compte six groupes de jonctions, dont tous les troisièmes sont mis à la terre. Les autres jonctions sont permutées. Il était nécessaire de surveiller en permanence l'état de l'isolation de deux jonctions de permutation consécutives à l'intérieur du tunnel. Six capteurs HFCT montés sur des barres de permutation sont utilisés pour détecter les DP directement au niveau des jonctions surveillées. Le système d'acquisition de DP se compose de deux unités d'acquisition à trois canaux, haute précision et modulaires (une à chaque jonction). Les mesures sont effectuées de manière synchrone sur les six points de mesure. La synchronisation des unités d'acquisition s'effectue via des fibres optiques en 2 à 5 ns. Une alimentation pour les unités d'acquisition est disponible dans le tunnel, de sorte qu'aucun appareil supplémentaire (alimentation inductive) n'est nécessaire. Les données de surveillance de deux unités d'acquisition sont envoyées par fibre optique vers un serveur situé dans la salle de commande du poste à l'extrémité du câble.

Un contrôle des performances du système a été réalisé en injectant des impulsions d'étalonnage de 100 pC directement dans les capteurs HFCT. Une fréquence centrale de 900 Hz et une bande passante de 300 Hz ont été définies pour le filtre numérique de l'unité d'acquisition. Les impulsions d'étalonnage ont été distinguées du bruit de fond du système.

Sur la base d'une expérience précédente, les niveaux des seuils d'avertissement et d'alarme de DP ont été pris en compte et définis à 30 pC (niveau d'avertissement) et 50 pC (niveau d'alerte) respectivement. Les valeurs de DP doivent rester un temps prédéfini (par ex. 15 s) au-dessus des valeurs seuil pour déclencher un avertissement ou une alarme. Cette procédure tend à éviter les faux positifs pouvant survenir pendant le fonctionnement en raison de la variation de charge, des opérations de commutation, des conditions ambiantes, etc.

Pendant la surveillance, un signal de DP a été observé dans la phase L2 du groupe de jonction 2. Les empreintes PRPD acquise de manière synchrone sur ce groupe de jonction sont présentés à la Figure 12. Un couplage des phases L1 et L3 a également été observé. Le même signal de DP a été enregistré sur l'autre groupe de jonction surveillé avec une amplitude réduite. La source du signal a été détectée par des mesures supplémentaires. La source de DP a été localisée à l'intérieur du transformateur connecté à la ligne de câbles à près de 1,8 km de distance du groupe de jonction 2.

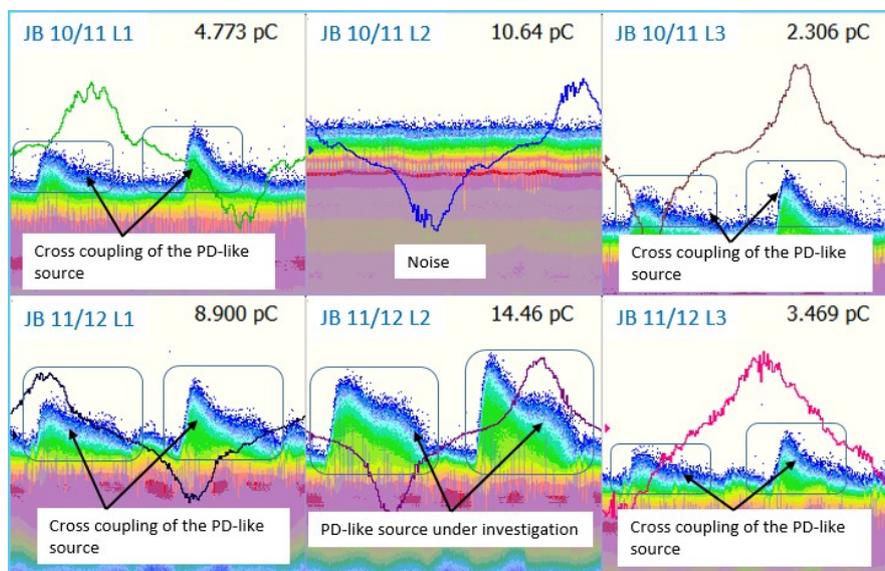


Figure 12. Modèles PRPD acquis de manière synchrone sur le groupe de joints 2.

## Conclusions

Le fournisseur du système de surveillance a assisté l'exploitant à toutes les étapes du projet de surveillance, de la conception du système jusqu'à la maintenance en service.

Ce système moderne de surveillance de DP des câbles HT a fourni à l'exploitant les fonctions suivantes :

- > Séparation automatisée des sources de DP et suppression du bruit. Les techniques d'évaluation multicanale synchrone ont rempli ces besoins.
- > Localisation des sources de DP tout au long du câble HT grâce à l'application réussie de la réflectométrie temporelle statistique aux deux extrémités.
- > Surveillance d'autres paramètres d'état du câble tels que courant dans les écrans, état des limiteurs de tension d'écran, et pression d'huile dans les extrémités. Cela permet de réduire davantage les coûts d'exploitation en éliminant certaines des activités de maintenance préventive (vérification des écrans et des permutations).
- > Mesures des DP du système de câbles pendant les tests diélectriques de mise en service. La réalisation de mesures de DP simultanément sur tous les accessoires de câbles pendant le test de tension de tenue est avantageuse.

En outre, des solutions éprouvées et une expertise ont été fournies par le fournisseur du système de surveillance dans les domaines suivants :

- > Solutions pour l'alimentation électrique des systèmes de surveillance. Le circuit basse tension a été proposé pour les systèmes de câbles enterrés et une alimentation inductive pour les systèmes de câbles en tunnel.
- > Positionnement et installation des capteurs de DP dans les boîtiers de liaison.

