

## UTILISATION DE MÉTHODES DE DIAGNOSTIC DE DÉCHARGE PARTIELLE SUR LES POSTES BLINDÉS ISOLÉS AU SF<sub>6</sub> DANS LE CADRE D'ESSAIS DE MISE EN SERVICE SUR SITE

J.F. Büsch\*

H.P. Dambach

T. Aschwanden

M. Hässig

P. Hadorn

T. Heizmann

GEC Alstom Ltd.

Fachkommission für Hochspannungsfragen

(Suisse)

### Résumé

Depuis quelques années, les méthodes de diagnostic de décharge partielle (DP) sur postes blindés font l'objet d'un vif intérêt en relation avec les essais de mise en service aux courants alternatifs et la surveillance en ligne. La présente contribution expose l'expérience récente acquise en matière de détection de DP sur site dans les postes blindés complets au moyen des méthodes électriques. Elle compare en particulier la méthode conventionnelle (CEI 60270) et la méthode VHF/UHF. Pour divers types de postes blindés (systèmes monophasés et triphasés), des capteurs à large bande spéciaux ont été développés pour le domaine VHF/UHF. Leur applicabilité en conditions réelles sur site a ensuite été examinée. Des positions optimales de capteurs sont proposées compte tenu du comportement spécifique d'un poste blindé complet en matière de transfert de signal. La sensibilité de détection de DP réelle sur site a été déterminée en introduisant des défauts artificiels dans les postes blindés. Enfin, les deux méthodes de détection de DP ont été appliquées dans le cadre des essais de mise en service de neuf postes blindés ( $U_m = 72,5$  kV à 245 kV). L'expérience sur site est discutée et une procédure d'essai de DP est proposée.

### Mots-clefs

Postes blindés, essai H.T. sur site, décharge partielle, détection de DP, méthode UHF, méthode VHF, défauts artificiels, essais de mise en service H.T.

### 1. INTRODUCTION

Il est important de vérifier l'intégrité diélectrique d'un poste blindé entièrement assemblé après montage sur site. Aujourd'hui, la procédure d'essai la plus fréquemment utilisée pour tester les postes blindés sur site combine un essai aux courants alternatifs et la détection de DP.

La plupart des spécialistes s'accordent à dire que cette procédure d'essai est la plus efficace pour toutes les tensions de système à condition que les méthodes de détection de DP sur site utilisées présentent une sensibilité suffisante [1].

A l'heure actuelle, diverses méthodes de diagnostic de DP sur postes blindés sont disponibles, avec les problèmes pratiques et les limitations qu'on leur connaît [2, 3, 4]. L'utilisation de méthodes électriques de détection de DP

comporte certains avantages pratiques, notamment dans les fréquences du domaine VHF et UHF (suppression du bruit de fond). Cependant, dans ces fréquences, le comportement en matière de transfert de signal du poste blindé et les capteurs (éléments de couplage) exercent une influence décisive sur la sensibilité de la méthode de détection. À l'évidence, les résultats obtenus sur de petites configurations de laboratoire ne sont pas directement applicables à un poste blindé complet. Par conséquent, ce comportement doit être analysé individuellement pour chaque configuration de poste blindé. En ce qui concerne la sensibilité de détection, il est en particulier nécessaire d'examiner systématiquement le type et la position des capteurs de DP.

Très peu d'informations sont disponibles en ce qui concerne l'expérience acquise et l'utilisation pratique de la méthode VHF/UHF [5, 6, 7, 8]. On a donc procédé à des investigations sur site afin

- a) de clarifier le comportement typique en matière de transfert de signal de diverses configurations de postes blindés en utilisant des capteurs à large bande spéciaux dans le domaine VHF/UHF et
- b) de comparer la sensibilité de détection de DP de la méthode VHF/UHF à celle de la méthode conventionnelle dans un poste blindé complet (voir annexe).

Par ailleurs, on a utilisé les méthodes de diagnostic de DP dans le cadre des essais de mise en service de neuf postes blindés (systèmes monophasés et triphasés encapsulés) présentant une  $U_m$  de 72,5 kV à 245 kV en utilisant la méthode de détection de DP conventionnelle et la méthode VHF/UHF. Sur la base de cette expérience, des recommandations pratiques sont formulées en ce qui concerne l'aptitude de la méthode de détection électrique de DP dans les conditions sur site, les positions optimales des capteurs dans un poste blindé et la procédure d'essai de DP.

### 2. DÉTECTION SUR SITE DE DP DANS LES POSTES BLINDÉS

#### 2.1 Méthodes de détection de DP

Les méthodes de détection de DP utilisées pour les essais de mise en service et les investigations décrites dans la présente contribution se limitent aux méthodes électriques. La métho-

de acoustique constitue également un outil adéquat pour la détection de DP dans le cadre des essais de mise en service et des essais en service périodiques, notamment pour localiser les particules métalliques libres [9].

Etant donné que la DP provoque des phénomènes électriques dans un large domaine de fréquences, on peut caractériser les méthodes en fonction des domaines de fréquences typiques qu'elles utilisent pour les mesures.

Conventionnelle (CEI 60270)	50 kHz...1 MHz
VHF	30 MHz...300 MHz (mode de propagation TEM)
UHF	300 MHz ... environ 2 GHz (modes de propagation TEM, TE, TM)

## 2.2 Spécifications techniques

Les spécifications techniques des méthodes utilisées dans la présente contribution sont les suivantes.

### Méthode de DP conventionnelle

Condensateur de couplage:  $C_k = 500 \text{ pF}$   
 Détecteur de DP à bande étroite et dispositif de couplage: 40 kHz...1 MHz  
 Traitement du signal de DP avec corrélation de phase.

### Méthode de détection VHF/UHF

L'appareillage de mesure VHF/UHF utilisé est illustré schématiquement dans la fig. 1.

- Amplificateur à large bande (typique 0,1-1000 MHz, + 35 dB) directement raccordé aux capteurs.
- Analyseur de spectre (9 kHz-1,8 GHz) en mode de "balayage de spectre" ou en mode "zero span" à une fréquence centrale donnée  $f_c$  ou détecteur R.F. (démodulateur de bande large).

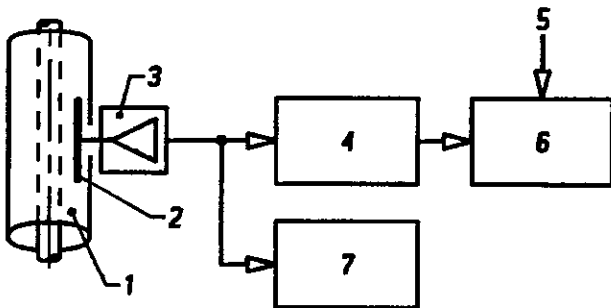


Fig. 1: Dispositif de mesure VHF/UHF  
 1 Poste blindé, 2 Capteur DP, 3 Préamplificateur, 4 Analyseur de spectre ou démodulateur de bande large, 5 Signal sync. du diviseur de tension, 6 Analyseur des signaux de DP avec corrélation de phase (PRPDA), 7 Oscilloscope numérique

Pour réaliser un **élément de couplage à large bande** avec une basse fréquence de coupure (< 100 MHz), des capteurs plats à large diamètre ont été installés dans le poste blindé. Les capacités  $C_{HT}$  entre ces capteurs et l'électrode HT sont typiquement inférieures à 1 pF.

Les géométries de capteurs adaptées aux diverses configurations de postes blindés sont les suivantes.

Système monophasé, poste blindé de type A:	$\phi = 170 \text{ mm}$ , capacité à la terre (fuite) environ 40 pF
Système monophasé, poste blindé de type B:	$\phi = 240 \text{ mm}$ , capacité à la terre (fuite) environ 80 pF

Système triphasé,

poste blindé de type C:  $\phi = 340 \text{ mm}$ , capacité à la terre (fuite) environ 100 pF

Ces capteurs ont une large bande de passage (< 100 MHz ... > 1 GHz), qui permet une détection de DP sensible même en cas de bruit de fond élevé, puisque le choix des fréquences, qui se situe également dans les bandes VHF et UHF, est très large.

## 2.3 Transfert/Atténuation du signal DP et calibration dans le domaine VHF/UHF

### Comportement d'un système de jeux de barres

Les caractéristiques typiques de transfert de signal dans le domaine de fréquences entre deux capteurs installés dans les jeux de barres de trois configurations différentes de poste blindé sont illustrées dans les fig. 2 et 3. Dans les situations étudiées ici, au moins deux sectionneurs et plusieurs travées de départ sont installés sur le chemin de propagation.

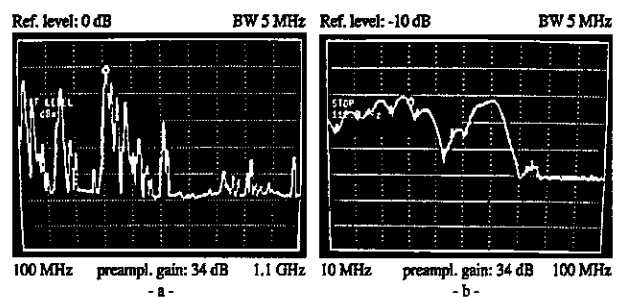


Fig. 2: Caractéristiques de transfert de signal dans le domaine de fréquences des systèmes de jeux de barres réels  
 - a - Système monophasé de poste blindé de type B (0,1 ... 1,1 GHz)  
 Distance entre les capteurs environ 6,5 m  
 - b - Système triphasé de poste blindé de type C (10...100 MHz)  
 Distance entre les capteurs environ 24 m

Système monophasé encapsulé:

Le jeu de barres du poste blindé de type A présente une atténuation de fréquences marquée dans le domaine allant d'environ 350 MHz à 550 MHz (voir fig. 3a, S1 → S2), alors que celui du poste blindé de type B atténue des fréquences plus élevées, c'est-à-dire supérieures à environ 550 MHz (voir fig. 2a). Les deux systèmes de capteurs présentent des résonances prononcées dans le domaine UHF (modes de propagation de signal plus élevés), et ce, même avec des systèmes de jeux de barres plus longs (> 20 m).

Système triphasé encapsulé:

Le comportement du jeu de barres du poste blindé de type C est très différent (voir fig. 2b). Dans la situation étudiée, les fréquences supérieures à environ 80 MHz sont intégralement atténuées. Des investigations plus poussées ont révélé que cet effet d'atténuation dépend de la construction du poste blindé (séparation des enceintes de gaz au moyen de supports d'isolateur métalliques). En ce qui concerne l'effet d'atténuation, on a constaté qu'après trois supports de ce type, les fréquences supérieures à 100 MHz sont intégralement supprimées.

Il convient de noter que les caractéristiques de transfert mesurées sur une section de jeux de barres courte ( $l = 2 \text{ m}$ ) comprenant deux entretoises isolantes n'indiquent aucune atténuation marquée dans un large domaine de fréquences allant jusqu'à environ 1 GHz. Il en est ainsi dans la plupart des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire [10, 11]. Il est évident que dans une configuration de jeux de barres réelle,

les caractéristiques de transfert de signal peuvent différer largement des résultats obtenus en laboratoire.

### Comportement d'une installation complète

Dans un poste blindé complet, les éléments tels que les disjoncteurs, les sectionneurs, etc. exercent des effets d'atténuation supplémentaires sur la propagation du signal de DP. Ce comportement est particulièrement important pour le positionnement optimal des capteurs dans un poste blindé. La fig. 3 montre les caractéristiques de transfert de signal enregistrées dans un poste blindé de 110 kV de type A composé de 5 travées et d'un système à jeu de barres simple (voir annexe). La comparaison des résultats (fig. 3a et b) indique clairement que la fonction de transfert obtenue sur le jeu de barres (S1 → S2) n'est pas représentative du transfert de signal vers le capteur placé sur la travée de câble (S1 → S3). L'effet d'atténuation supplémentaire dû au disjoncteur se traduit par une baisse significative de sensibilité aux fréquences supérieures à 300 MHz.

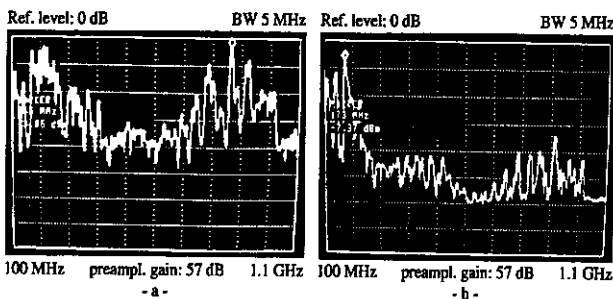


Fig. 3: Caractéristiques de transfert de signal dans le domaine de fréquences (100 MHz ... 1,1 GHz) dans un poste blindé de type A complet équipé de capteurs à différentes positions (diagramme monopolaire et positions des capteurs voir annexe).  
 - a - S1 → S2 (jeu de barres seul)  
 Distance entre les capteurs environ 10,5 m  
 - b - S1 → S3 (jeu de barres + travée de câble)  
 Distance entre les capteurs environ 14,5 m

### Investigation avec défauts artificiels

Pour vérifier cette influence d'atténuation, deux compartiments d'essai A et B ont été adaptés au poste blindé de 110 kV (voir annexe). La sensibilité de détection a été analysée en introduisant divers types de défauts dans les compartiments d'essai. Les résultats sont résumés dans l'annexe.

Ces résultats permettent de tirer des conclusions concernant la sensibilité de détection absolue et d'établir une comparaison avec la méthode de détection de DP conventionnelle (voir chapitre 3).

### 2.4 Calibration des mesures VHF/UHF

Pour quantifier les intensités de DP détectées, il est souhaitable de procéder à la calibration de la méthode de détection VHF/UHF en termes de charge apparente selon CEI 60270. Pour la calibration des mesures VHF/UHF, on a essayé de déterminer les caractéristiques de transfert de signal entre paires de capteurs (voir section 2.3). Un capteur est soumis à une tension échelon d'amplitude  $U_0$  (typiquement 20-50 V) avec un temps de montée de quelques nanosecondes tandis que la réaction du second capteur est observée au moyen d'un analyseur de spectre. Cette procédure permet de déterminer les bandes de fréquences dans lesquelles les signaux sont transmis à travers le poste blindé. On a estimé la charge introduite  $q_0$  sur la base de la capacité  $C_{HT}$  entre le

capteur et le conducteur H.T. ( $q_0 = U_0 \times C_{HT}$ ).

Pour certains défauts, il peut être démontré par comparaison que les valeurs de charge mesurées au moyen de cette procédure sont du même ordre de magnitude que les valeurs obtenues par la méthode de détection de DP conventionnelle. Cependant, des investigations récentes [12] ont révélé que pour un système de détection à bande étroite, l'intégration correcte de la charge apparente des courants d'impulsion de DP dans le SF6 est limitée à des fréquences allant jusqu'à quelques MHz. Aux fréquences supérieures, le spectre de DP dépend non seulement de la forme de l'impulsion de DP, mais aussi de facteurs tels que le type et la position des capteurs ainsi que le type et l'emplacement du défaut. Par conséquent, la définition d'une charge de DP en termes de charge apparente n'est pas utile pour la méthode de détection VHF/UHF (voir annexe, exemple I).

### 3. EXPERIENCE ACQUISE LORS D'ESSAIS DE MISE EN SERVICE SUR SITE

Depuis 1991, la FKH a procédé en Suisse à des essais de mise en service de quelques postes blindés GEC ALSTHOM en utilisant la méthode de détection VHF/UHF combinée avec un circuit de résonance en série à fréquence variable [13]. Ce circuit d'essai a permis de procéder à des essais de mise en service sur des installations complètes incluant des transformateurs de tension et des câbles. Pour éviter les effets de saturation du transformateur de tension, on a utilisé une fréquence de tension d'essai > 90 Hz.

Le tableau 1 contient les spécifications des postes blindés testés. Pour ces essais (à l'exception du n° 8), la méthode de détection de DP conventionnelle a également été utilisée avec un circuit d'essai totalement encapsulé. Dans certains cas, les deux méthodes ont été employées simultanément.

Tableau 1: Spécifications des postes blindés testés

No.	Type de poste blindé	Travées	Système à jeux de barres	Travée de départ	Tête de câble	Traversées SF6/air	Tension d'essai sur le site kV	Niveau de bruit de fond pC <sup>2)</sup>
1	220 kV / B	5	1	5	-	-	370	<1
2	150 kV / A	5	2	4	-	-	325	0.5-1.5
3	132 kV / A	9	2	4	4	-	325	1.5-2.5 <3.5 <sup>1)</sup>
4	132 kV / A	5	1	3	2	-	325	1.5-2 <2.5 <sup>1)</sup>
5	110 kV / A	12	2	10	-	-	275	1-1.5
6	110 kV / A	5	1	5	-	-	275	<1
7	110 kV / A	4	2	2	2	-	230	<1 <1.5 <sup>1)</sup>
8	65 kV / C	16	2	15	-	-	140	-
9	52 kV / A	13	2	11	-	-	140	<1

1) Traversée SF6/air incluse dans le circuit d'essai

2) Configuration d'essai intégralement encapsulée avec transformateur d'essai isolé au SF6 et méthode de détection de DP conventionnelle.

Les niveaux de bruit de fond typiques figurent dans le tableau 1. On voit que pour les essais de mise en service sur circuit d'essai intégralement encapsulé, le niveau de bruit sur site en termes de charge apparente était très bas: p.ex. pour les postes blindés équipés de têtes de câble, il ne s'élevait qu'à 1,5 pC ou moins, et était inférieur à 3,5 pC pour ceux équipés de

traversées SF6/air. Il convient toutefois de noter que des niveaux de bruit supérieurs peuvent être obtenus, mais qu'ils restent exceptionnels.

Lorsqu'on utilise un circuit d'essai extérieur (transformateur d'essai conventionnel ou circuit de résonance en série à fréquence variable) pour les essais de mise en service, il faut s'attendre à un niveau de bruit extérieur nettement supérieur. Cette situation est due au raccordement du poste blindé à la configuration d'essai externe par l'intermédiaire d'une traversée SF6/air. Dans ces cas, la sensibilité de la méthode de détection de DP conventionnelle est réduite, et la méthode de détection VHF/UHF est la seule permettant d'obtenir une détection sensible de DP.

### 3.1 Procédure d'essai de DP

#### Détection/Mesure de DP

Les procédures de mesure suivantes ont été appliquées pour la détection/mesure de DP.

**Méthode de détection de DP conventionnelle:** mesures de DP et calibration selon CEI 60270. Les amplitudes de DP et la corrélation de phase des impulsions de DP par rapport à la tension d'essai ont été enregistrées.

L'essai du poste blindé a été effectué par sections pour maintenir la capacité de charge  $C_1$  à un bas niveau pour le transformateur d'essai et pour faciliter la localisation des éventuels défauts. Dans la plupart des cas, la relation  $C_k/C_1$  se situe entre 1 et 0,25.

**Méthode de détection VHF/UHF:** pour la démodulation des signaux de DP et la suppression de bruit, on a utilisé le dispositif de mesure illustré dans la fig. 1. L'analyseur de spectre est utilisé à la fois en mode de "balayage de spectre" (largeur de bande de résolution typique 5 MHz) et en mode "zero span" à une fréquence centrale donnée  $f_c$ . La procédure utilisée est la suivante: avant d'appliquer la tension d'essai, un spectre du bruit de fond en mode de balayage est enregistré en utilisant la fonction "peak hold". Durant l'essai, le spectre est continuellement balayé et les déviations du bruit de fond sont enregistrées. S'il se produit une déviation par rapport au bruit de fond, l'analyseur de spectre est commuté en mode "zero span" à une fréquence centrale appropriée pour voir si les signaux détectés sont corrélés avec la tension d'essai. Pour ce faire, un système de transformation des impulsions numériques est utilisé [analyseur des signaux de DP avec corrélation de phase (PRPDA), voir fig. 1].

En raison de la complexité des caractéristiques de transfert de signaux de DP dans un poste blindé réel, il est impossible de garantir par la seule sélection d'une fréquence centrale en fonction d'expériences de simulation entre capteurs que le spectre d'un signal de DP réel reçu par un capteur de DP présente une fréquence significative se situant dans le domaine entourant la fréquence centrale sélectionnée. Par conséquent, il convient de sélectionner deux fréquences centrales ou plus pour les mesures en mode "zero span".

Dans certains cas, des détecteurs RF à large bande ont été également utilisés, ce qui a permis de procéder à la mesure continue de l'ensemble de l'activité de DP dans un très large domaine de fréquences (0,1...2 GHz). Cependant, il est alors plus difficile de discerner les signaux DP du bruit de fond.

#### Niveau de DP admissible

Le groupe de travail CIGRE 33/23-12 [1] recommande de mesurer la DP à un niveau de tension d'essai  $U_{\text{essaiDP}} = 0,8 \times 0,36 \text{ LIWL} = 0,29 \text{ LIWL}$  (LIWL = "lightning impulse withstand level" – niveau de tenue aux tensions de choc de

foudre). La DP maximum admissible ne doit pas dépasser une valeur d'environ 5 pC (charge apparente selon CEI 60270) ou équivalente. Si le niveau de bruit de DP sur site est trop élevé, c'est-à-dire  $> 50 \%$  du niveau de DP maximum admissible, il faut remplacer la mesure de DP par un essai de tension de choc de foudre.

Cependant, l'expérience pratique révèle les limites de la procédure proposée.

- Certains types caractéristiques de défauts, même critiques, peuvent produire des intensités de DP d'une valeur bien inférieure à 5 pC, p.ex. la présence de particules métalliques fixées sur la surface d'une entretoise ( $< 1 \text{ pC}$ ) ou une imperfection superficielle sur l'électrode H.T. stabilisée par effet de couronne ( $\sim 1 \text{ pC}$ ) (voir annexe).
- L'utilisation de la méthode VHF/UHF de détection de DP peut présenter des avantages en ce qui concerne la sensibilité de détection dans un environnement bruyant. Cependant, les niveaux de DP détectés ne sont pas calibrables en termes de charge apparente, comme le prouvent de récentes investigations théoriques et empiriques [12]. Il est donc impossible de définir une valeur-limite admissible équivalente à 5 pC pour la méthode VHF/UHF.
- Les essais de tension de choc de foudre sur site doivent être planifiés et acceptés par le client dans une phase antérieure du projet. Il n'est donc pas réaliste de changer de procédure d'essai sur le site si la mesure de DP échoue en raison d'un niveau de bruit trop élevé.

Comme le montrent les résultats présentés dans le tableau 1, la sensibilité de détection dans les postes blindés complets est restée nettement inférieure à la "valeur-limite" de 5 pC. Les défauts détectés dans le poste blindé ont été soigneusement identifiés et localisés. Une évaluation du risque a été faite en fonction du type et de l'emplacement du défaut. Il a été décidé d'ouvrir ou non le poste blindé, même lorsque le niveau de DP était très inférieur à 5 pC.

#### Conditionnement

La détection de particules libres doit être effectuée avec soin, également dans les configurations de postes blindés à tensions assignées plus basses. Les particules libres de taille critique peuvent être éliminées des zones à haut champ par une séquence de conditionnement. Cependant, des amorçages peuvent parfois se produire. Selon [1], ces amorçages ne sont pas considérés comme des défauts (pas d'ouverture du poste blindé) à condition que la tension d'essai intégrale puisse être appliquée par la suite.

Pour réduire le risque d'amorçage à un minimum, la tension d'essai a été augmentée progressivement (p.ex. par pas de 5% en commençant à  $1,2 \times U_0$ , voir fig. 4) jusqu'à ce que les mesures de DP montrent un schéma typique de particules libres ou d'autres défauts (voir annexe). On peut alors poursuivre la phase de conditionnement au même niveau de tension durant un laps de temps déterminé.

### 3.2 Sensibilité de détection pour les défauts typiques

Les défauts détectés durant les essais de mise en service sont résumés dans le tableau 2.

#### Particules libres:

Elles constituent le principal type de défaut dans un poste blindé. Les particules d'une longueur de 3 mm et plus ont été détectées au moyen des deux méthodes. Avec la méthode VHF/UHF, la position des capteurs ne limite pas la détection de particules libres, bien que la sensibilité puisse être dif-

férente (voir annexe, exemple I).

Tableau 2: Défauts détectés durant les essais de mise en service de neuf postes blindés ( $U_m = 72,5...245$  kV)

Défaut	Nombre d'occurrences	Observations, diagnostic	Actions
Particules libres	3	Amorçage durant l'accroissement de la tension d'essai sans conditionnement; nouvel essai à un niveau de tension d'essai de 100% → o.k.	Pas d'ouverture
	3	Particules d'aluminium/de cuivre de 3-8 mm dans un disjoncteur; défauts impossibles à supprimer par conditionnement, 5-20 pC	Ouverture du disjoncteur; particules trouvées et éliminées
	1	Fil de cuivre isolé de 12 mm dans le transformateur de tension, jusqu'à 15 pC; après conditionnement, le niveau de DP a baissé à un niveau < 2 pC	Ouverture du TT; fil trouvé dans un piège à particules
Particule fixée sur un conducteur H.T.	1	Particule d'acier de 3 mm coincée entre le conducteur H.T. et l'entretoise sur le jeu de barres, 3-4 pC	Ouverture du jeu de barres; particule trouvée et éliminée
Défaut dans un élément d'isolation	1	Vide dans un levier pivotant d'un sectionneur du jeu de barres, 4-5 pC	Ouverture du sectionneur; remplacement du levier pivotant; vide déposé par essai aux rayons x
Défaut dans une entretoise	1	Défaut localisé dans un sectionneur de barres; jusqu'à 8 pC, schéma de DP similaire à une délamination dans une entretoise	Ouverture du sectionneur; remplacement des éléments d'isolation; le défaut n'a pas pu être confirmé par des essais ultérieurs en laboratoire et est resté inconnu

#### Particule fixe et imperfection superficielle sur l'électrode H.T.:

S'il n'y a pas de stabilisation par effet couronne, les deux méthodes permettent une détection sensible (voir annexe, exemple II). En cas de stabilisation par effet couronne, on ne détecte que quelques impulsions de DP intermittentes et de faible intensité à des tensions d'essais élevées (voir annexe, exemple III). Dans la plupart des cas, il est impossible d'éviter l'amorçage en raison de la faible différence entre le seuil d'apparition de la DP et la tension d'amorçage. Ce genre de défauts est très rare dans la pratique.

#### Défaut dans l'isolation solide (p.ex. entretoises):

Les exemples typiques sont les vides ou la délamination de la résine d'imprégnation. Ces défauts peuvent être clairement détectés au moyen des deux méthodes à condition que la tension d'essai soit appliquée pendant un laps de temps suffisant (plusieurs minutes).

#### Particule métallique fixée sur la surface de l'entretoise:

Une détection de ce type de défaut est extrêmement difficile, même en cas de niveau de bruit très bas (p.ex. < 1 pC) et d'une utilisation méticuleuse des deux méthodes (voir annexe, exemple IV). Il est impossible de fournir des informations plus précises sur la sensibilité de détection, parce que des facteurs tels que la position et l'orientation de la particule sur l'entretoise (p.ex. au point du champ électrique maximal dans la direction tangentielle, direction du gradient de champ) exercent une influence essentielle sur la détection. Pour déclencher une DP, il faut des niveaux de tension d'essai plus élevés même que dans le cas des imperfections superficielles stabilisées par effet de couronne sur l'électrode H.T. Par conséquent, la marge entre l'apparition de la DP et l'amorçage est très étroite. Dans la plupart des cas, l'amorçage se produit sans qu'on ait pu détecter d'activité de DP.

Les particules situées sur la surface de l'entretoise peuvent se trouver dans une position inoffensive lors des essais de mise en service, mais devenir critiques en service, p.ex. en raison d'un déplacement sur l'entretoise. A l'heure actuelle, les méthodes de détection de DP se heurtent à leurs limites pour ce type de défaut.

## 4. RECOMMANDATIONS

Les résultats présentés plus haut permettent de formuler les recommandations suivantes.

### 4.1 Choix de la méthode de détection de DP

#### Méthode conventionnelle

Pour les défauts typiques, la méthode conventionnelle présente une sensibilité de détection sur site suffisante, même dans les cas où les traversées SF6/air sont intégrées dans le poste blindé. Les conditions nécessaires sont les suivantes: un circuit d'essai intégralement encapsulé et un traitement du signal DP avec corrélation de phase.

Dans ces conditions, la méthode de détection de DP conventionnelle sera privilégiée pour les configurations de poste blindé suivantes:

- postes blindés équipés de travées de câble uniquement,
- postes blindés équipés de traversées SF6/air si le niveau de bruit de fond de la section avec traversée n'est pas supérieur à quelques pC et que l'origine du bruit peut être identifiée au moyen d'un traitement du signal avec corrélation de phase.

#### Méthode VHF/UHF

Si un circuit d'essai extérieur est utilisé (p.ex. un circuit de résonance en série à fréquence variable) la méthode de détection de DP VHF/UHF sera privilégiée dans les cas suivants:

- Les transformateurs de tension et les câbles doivent être inclus dans les essais de mise en service H.T. (fréquence de la tension d'essai > 50 Hz).
- Postes blindés équipés de traversées SF6/air lorsqu'on s'attend à un niveau de bruit de fond nettement supérieur à 5 pC.
- Postes blindés déjà équipés de capteurs UHF pour la surveillance en ligne (enregistrement du schéma de DP de référence).

Compte tenu des types de capteurs et de leurs caractéristiques en matière d'atténuation de signal (voir sections 2.2 et 2.3), les recommandations suivantes peuvent être formulées en ce qui concerne les positions des capteurs dans un poste blindé pour obtenir une sensibilité de détection suffisante.

Systèmes encapsulés monophasés (postes blindés de type A et B)

- Deux capteurs par phase installés sur le système de jeux de barres près des deux extrémités; deux capteurs sont suffisants, même pour les jeux de barres longs.
- Un capteur supplémentaire par phase à l'extrémité de chaque travée pour tenir compte du comportement particulier des disjoncteurs en matière d'atténuation de signal (voir section 2.3).

Systèmes encapsulés triphasés (postes blindés de type C)

- L'utilisation de la méthode UHF est déconseillée en raison de la forte atténuation dans ce domaine de fréquences (voir fig. 2b).
- En guise de solution de rechange à la méthode conven-

tionnelle, on peut faire appel à la méthode VHF pour la détection de DP.

Pour la surveillance en ligne des postes blindés, seule la méthode à bande étroite UHF peut être recommandée. On peut utiliser les mêmes capteurs et le même appareillage de détection. Les résultats récemment publiés [11] ont cependant démontré qu'en conditions de service, un système de surveillance en ligne faisant appel à la méthode à bande étroite UHF ne permet pas de détecter tous les défauts significatifs. Cette situation est due non pas à la méthode de détection, mais au fait que pour certains défauts, la tension d'apparition de DP est supérieure à la tension de service.

#### 4.2 Proposition de procédure d'essai de DP

Une procédure en trois étapes est proposée pour les essais de mise en service (voir fig. 4).

##### Phase de conditionnement

- Objectif: suppression des particules libres
- Tensions d'essai aux courants alternatifs (C.A.) appliquées:
  - commencer à la tension de conditionnement  $U_c$ , p.ex.  $U_c = 1,2 U_0$ , sachant que  $U_0 = U_r/\sqrt{3}$  ( $U_r$  = tension de système)
  - augmentation progressive de la tension par étapes adéquates jusqu'à la tension d'essai de tenue; niveaux et durée de tension selon les recommandations du constructeur
- Mesure continue de DP pour avertissement d'amorçage
- Actions:
  - si apparition d'un schéma clair de DP
  - poursuivre l'essai tant que les activités de DP restent faibles ou
  - si l'activité de DP augmente avec la tension d'essai: évaluation du risque sur la base du type et de l'emplacement du défaut; éliminer le défaut; recommencer l'essai

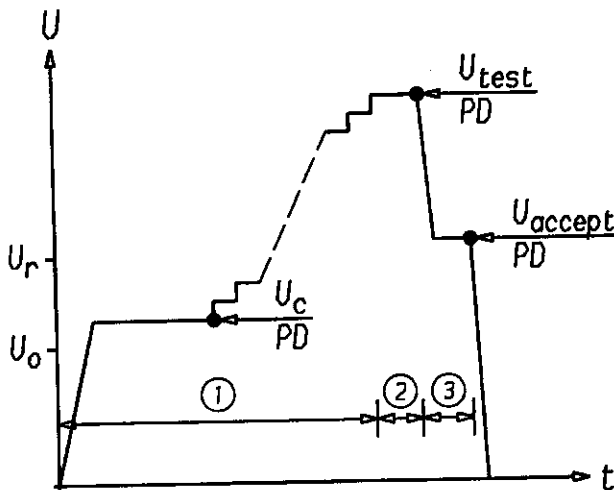


Fig. 4: Procédure d'essai de DP

- ① Phase de conditionnement
- ② Essai de tenue H.T. (voir texte)
- ③ Essai d'acceptation de DP (voir texte)

##### Essai H.T.

- Objectif: preuve de la capacité de tenue au C.A. du poste blindé

- Tension d'essai C.A. appliquée:
  - $U_{\text{essai sur site}} = 0,36 \times \text{LIWL}$
  - durée: 1 min.
- Mesure de DP pour avertissement d'amorçage
- Actions:
  - si un amorçage se produit, localiser et éliminer le défaut; répéter l'essai

##### Essai d'acceptation de DP

- Objectif: prouver que le poste blindé est exempt de DP dans toutes les conditions de fonctionnement C.A.
- Tension d'essai C.A. appliquée:
  - $U_{\text{accept}} = K_E \times K_S \times U_r/\sqrt{3}$
- $K_E$  (facteur de défaut à la terre):
  - 1,4 réseaux avec neutre à la terre
  - $\sqrt{3}$  réseaux à neutre isolés ou mis à la terre par bobine de compensation
- $K_S$  (facteur de sécurité, CEI 71.1):
  - 1,25 pour poste blindé
- Limite admissible: niveau de DP ~ niveau de bruit de fond (quelques pC) et tension d'extinction de DP supérieure à  $U_{\text{accept}}$
- Action si l'essai échoue: éliminer le défaut, recommencer l'essai

Le critère d'acceptation de DP est fondé sur l'exigence selon laquelle la tension d'extinction de DP est supérieure à la tension de tenue aux courants alternatifs  $U_{rw}$  en service, autrement dit  $U_{rw} = U_{\text{accept}}$ . Ce critère est applicable en particulier aux particules libres et aux défauts dans les isolations solides. Ces deux types de défauts ne sont pas sensibles aux essais de tenue aux tensions de choc de foudre. Le critère d'acceptation de DP proposé est applicable à la fois pour la méthode de détection de DP conventionnelle et pour la méthode de détection VHF/UHF.

## 5. CONCLUSIONS

Des essais de mise en service H.T. ont été effectués sur neuf postes blindés ( $U_m = 72,5$  à 245 kV) en utilisant la méthode de détection de DP conventionnelle et la méthode de détection VHF/UHF. Les résultats peuvent se résumer ainsi.

- La méthode de détection de DP conventionnelle et la méthode de détection VHF/UHF présentent une sensibilité suffisante pour les essais de mise en service d'un poste blindé complet. Leur sensibilité de détection est équivalente sur les configurations d'essai intégralement encapsulées.
- Avec un circuit d'essai intégralement encapsulé, le niveau de bruit de fond était de  $< 1 \dots 2,5$  pC, et s'élevait jusqu'à 3,5 pC pour les sections équipées de traversées SF6/air intégrées. Lorsqu'on utilise des circuits d'essai extérieurs dans le même poste blindé, il faut s'attendre à un niveau de bruit nettement plus élevé. La sensibilité de la méthode de détection de DP conventionnelle est alors réduite. La méthode VHF/UHF constitue une bonne solution de rechange dans les environnements bruyants.
- Le comportement spécifique de bande large de capteurs spéciaux ( $< 100$  MHz ...  $> 1$  GHz) autorise une grande souplesse dans la bande de fréquences VHF/UHF si on utilise des passe-bande sélectifs pour la suppression du bruit.

- La calibration de la méthode de détection VHF/UHF en termes de charge apparente est impossible. Il n'y a pas de corrélation directe entre les valeurs mesurées au moyen de la méthode conventionnelle et celles obtenues par la méthode VHF/UHF.
- Sensibilité de détection pour certains défauts typiques:
  - pas de problèmes de détection pour les particules libres, les électrodes flottantes, les défauts dans l'isolation solide et les particules fixées sur l'électrode H.T. sans stabilisation par effet couronne.
  - détection limitée pour les particules métalliques fixées sur la surface d'une entretoise ou pour les imperfections superficielles sur l'électrode H.T. stabilisées par effet de couronne (niveaux de DP  $\leq 1$  pC). Dans de nombreux cas, les diagnostics de DP ne permettent pas d'éviter l'amorçage.
- Les positions de capteurs recommandées dans les configurations de poste blindé analysées dans la présente contribution sont les suivantes: deux capteurs dans le jeu de barres à proximité des extrémités; un capteur supplémentaire dans chaque travée.
- La procédure d'essai de DP doit comprendre trois étapes: phase de conditionnement, essai de tenue H.T. et essai d'acceptation de DP.
- Le critère d'acceptation de l'essai de DP repose sur la coordination de l'isolation (tension de tenue aux courants alternatifs  $U_{rw}$  en service). Dans tous les cas, la tension d'extinction de DP du poste blindé doit être supérieure au niveau  $U_{rw}$ .

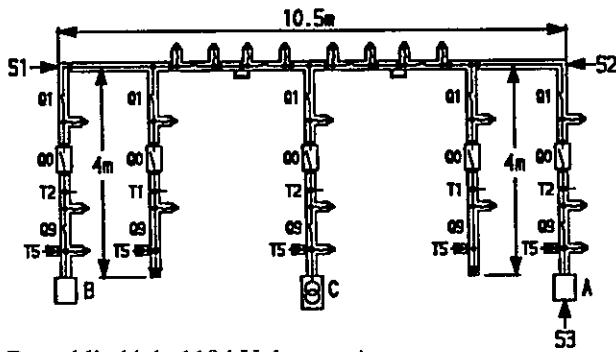
## 6. REFERENCES

- [1] CIGRE WG 33/23.12  
"Insulation coordination of GIS: return of experience, on-site testing and diagnostic techniques"  
Electra No. 174, Oct. 1997
- [2] CIGRE WG 15.03  
"Diagnostic methods for GIS insulating systems"  
CIGRE Paris, Paper 15/23-01, 1992
- [3] CIGRE WG 15.03  
"Effects of particles on GIS insulation and the evaluation of relevant diagnostic tools"  
CIGRE Paris, Paper 15-103, 1994
- [4] A. Bargigia, W. Koltunowicz, A. Pigini  
"Detection of partial discharges in gas insulated substations"  
IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp 1239-1249, July 1992
- [5] K. Masaki, T. Sakakibara, H. Murase, M. Akazaki, K. Uehara, S. Menju  
"On-site measurement for the development of on-line partial discharge monitoring system in GIS"  
IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp 805-810, April 1994
- [6] A. Petit  
"Field experience of PD monitoring with the UHF method"  
9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 5596-1, Sept. 1995, Graz
- [7] G.J. Behrmann, S. Neuhold, R. Pietsch  
"Results of UHF measurements in a 220 kV GIS substation during on-site commissioning tests"  
10th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Vol. 4, pp 451-455, Aug. 1997, Montreal
- [8] B.F. Hampton, J.S. Pearson, I.M. Welch, C.J. Jones, T. Irwin, B.M. Pryor  
"Experience and progress with UHF diagnostics in GIS"  
CIGRE Paris, Paper 15/23-03, 1992
- [9] M. Runde, T. Aurud, K. Ljøkelsøy, L.E. Lundgaard, J.E. Nøkleby, B. Skyberg  
"Risk assessment basis of moving particles in gas insulated substations"  
IEEE Transmission and Distribution Conference, Proceedings, pp 181-188, Sept. 1996, Los Angeles
- [10] H.-D. Schlemper, R. Kurrer, K. Feser  
"Sensitivity of on-site PD detection in GIS"  
8th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 823, Aug. 1993, Yokohama
- [11] R. Kurrer, K. Klunzinger, K. Feser, N. de Kock, D. Sologuren  
"Sensitivity of the UHF method for defects in GIS with regard to on-line PD detection"  
IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Paper, No. 2B-4, June 1996, Montreal
- [12] G. Wanninger  
"Apparent charge measurement in GIS by modern diagnostic methods"  
ETEP, Vol. 7, No. 4, pp 251-255, July/Aug. 1997
- [13] F. Bernasconi, W.S. Zaengl, K. Vonwiller  
"A new HV series resonant circuit for dielectric tests"  
3rd Int. Symp. on High Voltage Engineering, paper 43.02, Aug. 1979, Milan



## ANNEXE:

### Sensibilité de détection de DP pour divers types de défauts dans un poste blindé de 110 kV de type A Méthode VHF/UHF versus méthode conventionnelle



Poste blindé de 110 kV de type A  
S1, S2, S3 Capteurs, C Transformateur d'essai et  $C_k$  encapsulés  
A, B Compartiments d'essai pour défauts

I	<p>Type de défaut:</p> <p>Emplacement:</p> <p>Niveau de tension d'essai:</p> <p>Méthode UHF (préampl. +57 dB) Ref. 10 mV BW 5 MHz</p>	<p>Particule d'aluminium de 5 mm (<math>\phi \sim 0.5</math> mm) se déplaçant librement sur l'enveloppe</p> <p>compartiment d'essai B</p> <p>35 kV</p> <p>Méthode conventionnelle</p> <p>Bruit de fond: &lt; 1 pC Ref. 2.5 pC/div.</p>
S2	<p><math>f_c = 862</math> MHz</p> <p>Ref. 1 mV BW 5 MHz</p>	<p><math>q \sim 4</math> pC</p>
S3	<p><math>f_c = 862</math> MHz</p>	

Remarque: la détection est indépendante de la position du capteur

II	<p>Type de défaut:</p> <p>Emplacement:</p> <p>Niveau de tension d'essai:</p> <p>Méthode UHF (préampl. +57 dB) Ref. 5 mV BW 5 MHz</p>	<p>Particule d'aluminium de 5 mm (<math>\phi \sim 0.5</math> mm) fixée sur l'électrode H.T.</p> <p>compartiment d'essai A</p> <p>100 kV</p> <p>Méthode conventionnelle</p> <p>Bruit de fond: &lt; 1 pC Ref. 2.5 pC/div.</p>
S3	<p><math>f_c = 643</math> MHz</p>	<p><math>q \sim 2</math> pC</p>

Remarque: pas de signal mesurable au capteur S2

III	<p>Type de défaut:</p> <p>Emplacement:</p> <p>Niveau de tension d'essai:</p> <p>Méthode UHF (préampl. +57 dB) Ref. 5 mV BW 5 MHz</p>	<p>Imperfection superficielle à arête vive sur l'électrode H.T.</p> <p>compartiment d'essai A</p> <p>210 kV</p> <p>Méthode conventionnelle</p> <p>Bruit de fond: &lt; 1 pC Ref. 2.5 pC/div.</p>
S3	<p><math>f_c = 460</math> MHz</p>	<p><math>q \sim 1</math> pC</p>

Remarque: impulsions de DP intermittentes, stabilisation par effet couronne, à 234 kV, amorçage soudain après 30 sec. sans augmentation marquée de la DP

IV	<p>Type de défaut:</p> <p>Emplacement:</p> <p>Niveau de tension d'essai:</p> <p>Méthode UHF (préampl. +57 dB) Ref. 5 mV BW 5 MHz</p>	<p>Particule d'aluminium de 5 mm (<math>\phi \sim 0.5</math> mm) fixée sur la surface de l'entretoise dans une zone de champ critique dans la direction tangentielle</p> <p>compartiment d'essai B</p> <p>235 kV</p> <p>Méthode conventionnelle</p> <p>Bruit de fond: &lt; 1 pC Ref. 2.5 pC/div.</p>
S1	<p><math>f_c = 440</math> MHz</p>	<p><math>q &lt; 1</math> pC</p>

Remarque: seulement peu d'impulsions de DP de basse amplitude; non mesurables au moyen de la méthode conventionnelle; à 260 kV, amorçage soudain après environ 2 min. sans augmentation marquée de la DP

V	<p>Type de défaut:</p> <p>Emplacement:</p> <p>Niveau de tension d'essai:</p> <p>Méthode VHF (préampl. +57 dB) Ref. 71 mV BW 5 MHz</p>	<p>Effet couronne externe, vis métallique sur une électrode blindée d'une traversée SF6/air</p> <p>traversée SF6/air montée à la place du compartiment d'essai A</p> <p>45 kV</p> <p>Méthode conventionnelle</p> <p>Bruit de fond: &lt; 1.5 pC Ref. 12 pC/div.</p>
S3	<p><math>f_c = 40</math> MHz</p>	<p><math>q \sim 60</math> pC</p>

Remarque: faible influence de la traversée SF6/air sans défaut sur le niveau de bruit de fond