

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 73 (1982)

**Heft:** 7

**Artikel:** Mesures diélectriques préventives sur des transformateurs de mesure à haute tension en site propre

**Autor:** Aguet, M.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904951>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 06.10.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Mesures diélectriques préventives sur des transformateurs de mesure à haute tension en site propre

M. Aguet

621.314

L'article présente deux principes originaux de mesures diélectriques directes applicables à la surveillance de la qualité des isolations dans un poste à haute tension en exploitation. Des résultats de mesures du facteur de pertes diélectriques sur un lot de 200 transformateurs de mesure à haute tension sont analysés. Une comparaison est faite entre le comportement de l'évolution des décharges partielles et du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension sur des appareils respectivement sains et dégradés.

Es werden zwei neuartige Verfahren direkter dielektrischer Messungen für die Überwachung der Isolationsgüte in einer in Betrieb stehenden Hochspannungsanlage vorgestellt. An 200 Hochspannungs-Messwandlern werden die damit erzielten Messresultate des Verlustfaktors untersucht. Teilentladungen und Verlustfaktor werden in Funktion der Spannung für betriebstüchtige und beschädigte Wandler verglichen.

## 1. Introduction

Les mesures d'exploitation préventives constituent un élément important de la sécurité du personnel et de l'alimentation des réseaux électriques. Dans ce contexte, le Laboratoire de Réseaux d'Énergie Électrique de l'EPFL et le groupe EMC de Condensateurs Fribourg S.A. se sont appliqués depuis 1979, en collaboration avec des entreprises électriques romandes, à mettre au point des méthodes de mesures originales, ainsi que des critères d'évaluation de l'état d'évolution des paramètres diélectriques de transformateurs de mesure à haute tension [1; 2].

Des mesures directes sur le système diélectrique (facteur de pertes diélectriques, niveau de décharges partielles, variation de capacité), ont été retenues, sachant que les méthodes indirectes (mesure du facteur de pertes diélectriques et de la rigidité diélectrique de l'huile isolante soutirée [3], analyse chimique de produits de décomposition dans l'huile soutirée [4], analyse spectrographique du gaz soutiré [5; 6], etc.) ont fait l'objet de nombreux travaux et applications pratiques, sans donner un instrument univoque.

Dans la pratique, une combinaison des méthodes de mesures indirectes et directes est à promouvoir.

## 2. Mesures du facteur de pertes diélectriques en atmosphère électromagnétiquement perturbée

L'évolution du facteur de pertes diélectriques  $\text{tg} \delta_x$  d'un système d'isolation en fonction de la tension appliquée, pour une température donnée, au cours du temps, donne un critère important de stabilité ou de dégradation d'un appareil.

### 2.1 Mesure en laboratoire

Cette mesure s'effectue depuis plusieurs décennies au moyen d'un pont de Schering (fig. 1). L'appareil à mesurer ( $x$ ) est représenté par un schéma équivalent série du système diélectrique. La capacité  $C_N$  est constituée d'un condensateur étalon à pertes réduites (condensateur à pression de gaz  $\text{tg} \delta < 1 \cdot 10^{-5}$ ). A l'équilibre du pont ( $I_g = 0$ ) on trouve [7]:

$$\text{tg} \delta_x = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4 \quad (1)$$

$$\text{et } C_x = C_N \cdot R_4 / R_3 \quad (2)$$

De telles mesures ne présentent pas de difficulté dans un laboratoire à haute tension. Si elles sont effectuées directement sur le site d'un poste de couplage, elles sont perturbées par des influences électromagnétiques. La résolution de ce problème est essentielle à la poursuite de mesures en site propre permettant d'éviter les longues mises hors service et les trans-

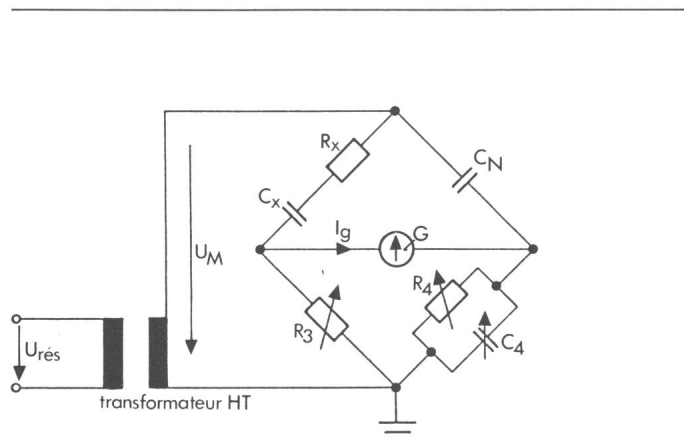


Fig. 1 Schéma du pont de Schering

|                 |  |
|-----------------|--|
| $U_{res}$       | Tension d'alimentation du réseau           |
| $U_M$           | Tension d'alimentation de l'objet en essai |
| $C_x, R_x$      | Objet en essai                             |
| $C_N$           | Condensateur étalon                        |
| $R_3, R_4, C_4$ | Élément ajustables du pont de mesure       |
| $I_g$           | Courant du pont                            |
| $G$             | Galvanomètre                               |

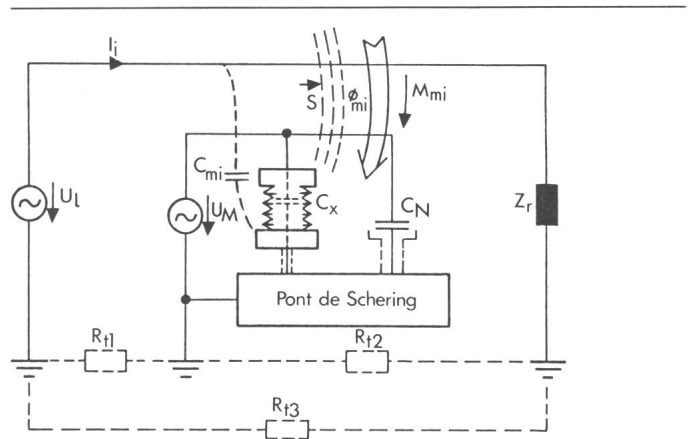


Fig. 2 Schéma équivalent du couplage entre le système perturbateur ( $i$ ) et le système perturbé ( $m$ )

|           |   |
|-----------|---|
| $U_1$     | Haute tension d'alimentation du réseau                                      |
| $I_1$     | Courant nominal du réseau   |
| $C_{mi}$  | Capacité parasite entre les circuits $i$ et la cuve du transformateur $C_x$ |
| $M_{mi}$  | Inductance mutuelle entre les circuits $i$ et $m$                           |
| $\vec{S}$ | Rayonnement dû à l'effet de couronne  |
| $Z_r$     | Charge équivalente du réseau  |

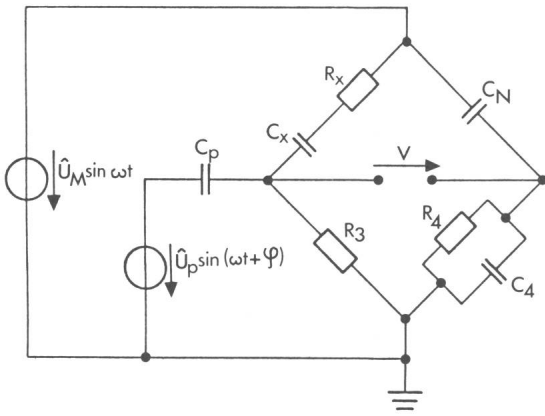


Fig. 3 Schéma équivalent du système perturbé

- $U_M$  Tension de mesure
- $U_P$  Tension perturbatrice résultant de la combinaison des effets des nappes des jeux de barres triphasés  $f(U_1)$
- $\varphi$  Déphasage entre tension perturbatrice et tension de mesure
- $C_p$  Couplage capacitif équivalent entre circuits perturbateur et perturbé
- $V$  Tension d'équilibrage

ferts nombreux, coûteux et dangereux vers les laboratoires spécialisés.

### 2.2 Perturbations électromagnétiques

Lors de la mesure d'appareils découplés, mais situés directement dans un poste de couplage en exploitation, le circuit d'essai est soumis à l'influence électromagnétique des jeux de barres restés en service. On distingue (fig. 2) les couplages galvaniques ( $R_{ti}$ ) par les terres, inductifs mutuels ( $M_{mi}$ ), capacitifs ( $C_{mi}$ ) et par rayonnement ( $\vec{s}$ ). D'après [2], on montre qu'aux fréquences industrielles seuls les couplages capacitifs entrent notablement en jeu dans un poste de couplage en exploitation normale.

### 2.3 Pont de Schering perturbé par un couplage capacitif

En combinant les schémas équivalents des figures 1 et 2, on obtient le schéma équivalent de la figure 3. A l'équilibre du pont ( $V = 0$ ), en présence de perturbations [2, annexe complétée], on mesure

$$\text{tg} \delta_{x \text{ mes}} = \text{tg} \delta_x \left( 1 - \frac{\cos \varphi \cdot U_p \cdot C_p}{U_M \cdot C_x + \cos \varphi \cdot U_p \cdot C_p} \right) + \frac{\sin \varphi \cdot U_p \cdot C_p}{U_M \cdot C_x + \cos \varphi \cdot U_p \cdot C_p} \quad (3)$$

L'équation (3) montre que la valeur du facteur de pertes diélectriques effectif peut être calculée à partir de la valeur mesurée en atmosphère électromagnétiquement perturbée à condition que  $\varphi = 0 \pm k\pi$ . Dans ce cas on a

$$\text{tg} \delta_{x \text{ mes}} = \text{tg} \delta_x \left( 1 - \frac{U_p C_p}{U_M C_x + U_p C_p} \right) \quad (4)$$

L'erreur relative sur  $\text{tg} \delta_{x \text{ mes}}$  vaut

$$\varepsilon = \frac{\text{tg} \delta_{x \text{ mes}} - \text{tg} \delta_x}{\text{tg} \delta_x} = - \frac{1}{\frac{U_M C_x}{U_p C_p} + 1} \quad (5)$$

La figure 4 présente la variation de l'erreur relative sur le facteur de pertes diélectriques mesuré en fonction du rapport

entre la tension appliquée pour la mesure  $U_M$  et la tension perturbatrice  $U_p$ . Cette variation est calculée pour une capacité parasite  $C_p$  de 90 pF et une capacité de l'objet à mesurer  $C_x$  de 300 pF. Sur cette courbe, on constate que l'on fait une erreur sur  $\text{tg} \delta_x$  mesuré inférieur à  $-10\%$  pour un rapport  $U_M/U_p$  supérieur à 3.

### 2.4 Essais en laboratoire à haute tension de la méthode du déphasage nul

Afin de minimiser l'erreur sur  $\text{tg} \delta_{x \text{ mes}}$ , on a établi un montage en laboratoire à haute tension original permettant de mettre en phase la tension perturbatrice avec la tension de mesure (fig. 5 et photo 6).

Ce montage comporte une source de perturbation triphasée, reliée à une nappe de trois conducteurs plans parallèles simulant les jeux de barres d'un poste à haute tension. A proximité (environ 2 m), on dispose le circuit de mesure et sa source. Cette source à haute tension peut être réglée en phase au moyen d'un régulateur basé sur un moteur asynchrone à rotor bobiné et bloqué. La figure 7 présente la variation du facteur de pertes diélectriques, mesuré en atmosphère électromagnétiquement perturbée, par rapport à la valeur réelle en fonction du déphasage  $\varphi$  entre la tension perturbatrice et la tension de mesure. On constate, expérimentalement, que pour  $\varphi = 0 \pm k\pi$  (équat. 4) on s'approche bien de la valeur du facteur de pertes diélectriques réel. Une analyse de sensibilité expérimentale (fig. 8) a montré l'exactitude de l'expression (5). La tension de ligne  $U_1$  étant directement liée à la tension perturbatrice  $U_p$  par l'intermédiaire de couplages capacitifs, on observe que plus la tension de ligne est élevée par rapport à la tension de mesure, plus l'erreur sur  $\text{tg} \delta_{x \text{ mes}}$  est importante. On tiendra compte de ces comportements lors des mesures sur le site.

Lors de cette mesure en laboratoire, on a introduit, en plus de la méthode de déphasage nul, une méthode d'inversion de phase suggérée par la figure 7. Cette méthode connue, consistant à faire la moyenne entre deux mesures de  $\text{tg} \delta$  obtenues en inversant les phases du transformateur d'alimentation, a donné de bons résultats (fig. 8), mais elle s'est avérée d'application limitée dans les postes à haute tension.

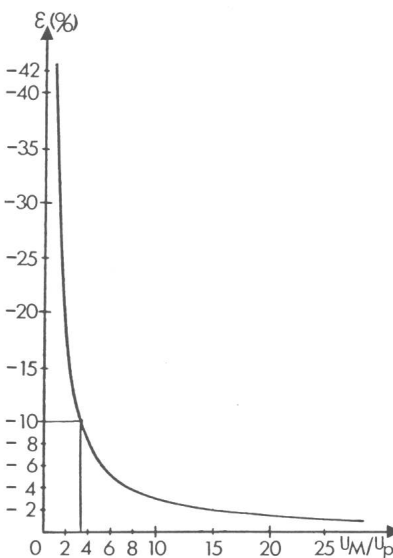


Fig. 4 Variation de l'erreur relative  $\text{tg} \delta_{x \text{ mes}}$  en fonction du rapport  $U_M/U_p$  pour un rapport  $C_x/C_p = 3,33$

### 2.5 Mesures du facteur de pertes diélectriques sur le site

Lors d'une campagne portant sur la mesure de 200 transformateurs de mesure situés dans les postes de couplage, par la méthode du déphasage nul (photo 9), on a obtenu la répartition statistique de la figure 10. Cette courbe indique que si l'on fixe des seuils de mise au rebut du matériel à  $\text{tg}\delta = 5\text{‰}$ , 12,5% des appareils doivent être rejetés, alors que pour  $\text{tg}\delta = 8\text{‰}$  ce pourcentage tombe à 5%.

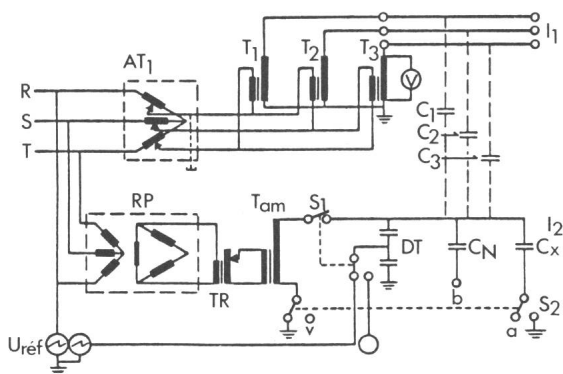


Fig. 5 Schéma électrique de l'installation de simulation de la mesure en laboratoire haute tension

- AT<sub>1</sub> Auto-transformateur triphasé, 3 × 380 V/6 kVA
- T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> Transformateurs pour l'alimentation du circuit perturbateur 0,440/100 kV/5 kVA
- RP Régulateur de phase
- TR Transformateur de réglage 380/0-500 V/20 kVA
- T<sub>am</sub> Transformateur d'essais pour l'alimentation du circuit de mesure 0,5/200 kV/20 kVA
- DT Diviseur de tension capacitif, 100 pF
- C<sub>N</sub> Condensateur étalon 103,65 pF, 195 kV
- C<sub>x</sub> Objet en essai;
- a, b, v Bornes d'accès du pont de Schering
- U<sub>ref</sub> Tension de références
- C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> Capacités parasites
- l<sub>1</sub> Ligne perturbatrice
- l<sub>2</sub> Ligne de mesure
- S<sub>1</sub> Pendant la mesure de la phase de la perturbation: ouvert; pendant la mesure de la capacité et du  $\text{tg}\delta$ : fermé
- S<sub>2</sub> Objet isolé, connecté sur a; objet mis à la terre, connecté à la terre

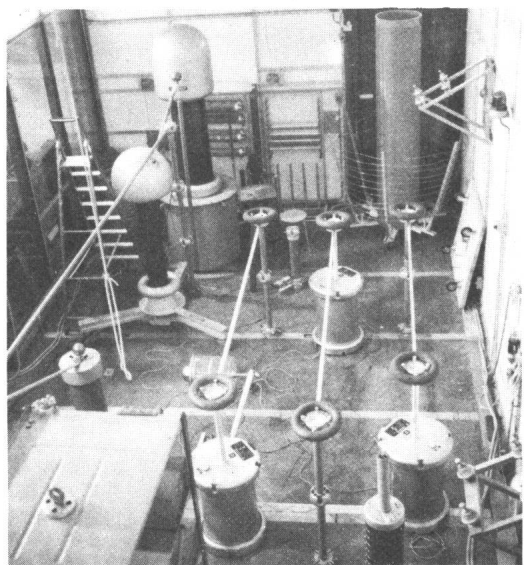


Fig. 6 Vue de l'installation de simulation de mesure du facteur de pertes diélectriques en atmosphère perturbée

Sur la droite les 3 lignes perturbatrices, sur la gauche la ligne perturbée

### 3. Mesure des décharges partielles en atmosphère électromagnétiquement perturbée

La mesure des décharges partielles permet d'évaluer de l'état d'un système d'isolation à haute tension. En tension alternative, elle peut s'effectuer par des méthodes directes ou des méthodes en pont. C'est cette deuxième méthode qui a été retenue, car elle permet d'éliminer, en partie, les perturbations électromagnétiques provenant du circuit extérieur.

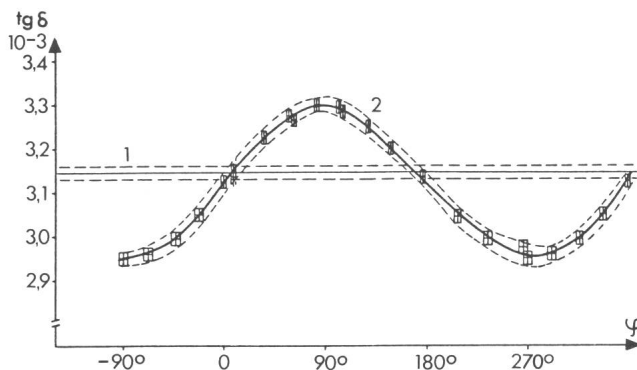


Fig. 7 Variation du facteur de pertes diélectriques ( $\text{tg}\delta_x$ ) en fonction de la phase  $\varphi$

- 1 Valeur mesurée sans perturbation
- 2 Courbe des valeurs mesurées avec la zone d'erreur

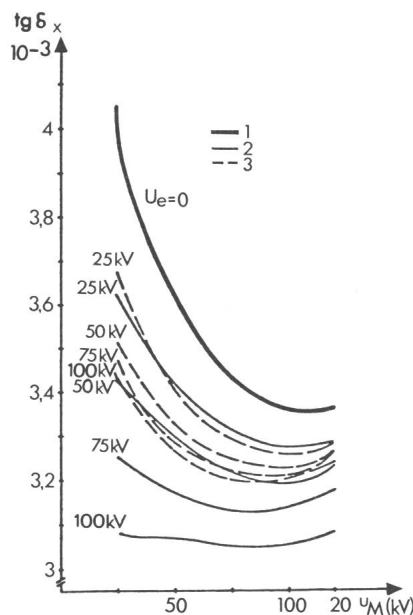


Fig. 8 Mesure du facteur de pertes diélectriques en laboratoire à haute tension sur un condensateur ( $C_x = 300 \text{ pF}$ ) papier imprégné à l'huile minérale

- 1 Sans perturbation
- 2 Avec perturbation, méthode du déphasage nul
- 3 Avec perturbation, méthode de l'inversion de phase

U<sub>M</sub> Tension de mesure  
U<sub>1</sub> Tension du réseau

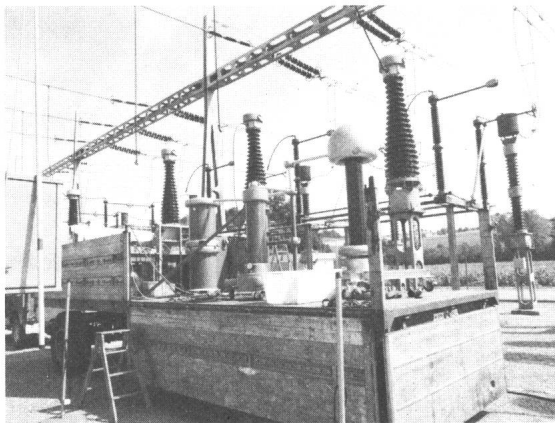
Remarque: Le comportement descendant de la caractéristique  $\text{tg}\delta$  est dû au fait que les mesures s'effectuent à contraintes diélectriques relativement faibles

### 3.1 Pont de mesure de décharges partielles

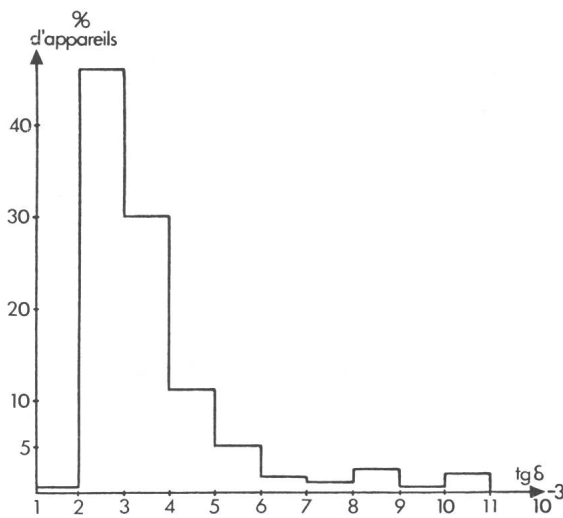
Le pont de mesure de décharges partielles (fig. 11) a l'avantage d'atténuer (d'un facteur 10 à 1000) les perturbations de mode commun provenant de l'alimentation. Le mode différentiel provenant de l'objet est alors mesuré correctement.

### 3.2 Mesure en laboratoire

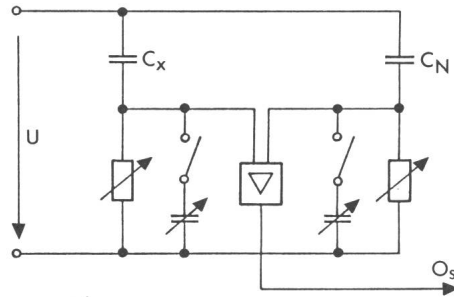
Des mesures de décharges partielles ont été effectuées sur des transformateurs de mesure au laboratoire à haute puissance de Préverengues dans une ambiance électromagnétiquement peu perturbée (bruit de fond < 2 pC). Les mesures sont présentées aux figures 12 à 14. On constate que l'appareil de la figure 12 est sain, alors que le comportement et l'hystérèse des décharges partielles des figures 13 et 14 traduisent un mauvais état de l'isolation.



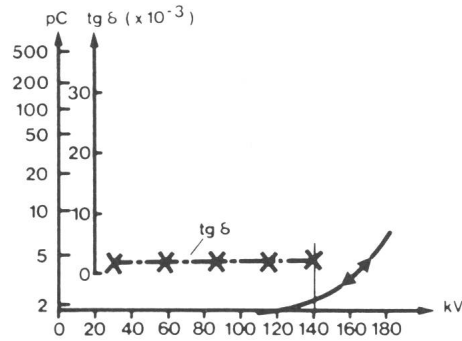
**Fig. 9** Mesure du facteur de pertes diélectriques sur des transformateurs de courant «in situ»  
 Au premier plan: la remorque supportant l'installation de commande, sécurité, régulation de phase, mesure, les transformateurs à haute tension, le condensateur étalon et le diviseur capacitif de mesure de tension. Au second plan: les appareils à mesurer (Poste EOS Romanel)



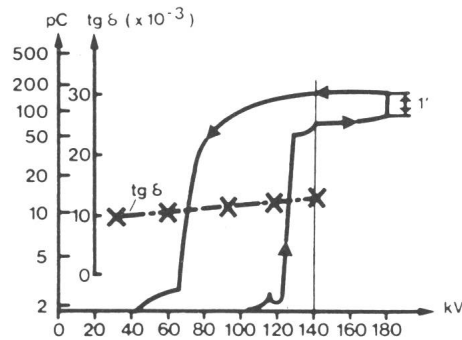
**Fig. 10** Histogramme de la répartition du facteur de pertes diélectriques ( $tg \delta$ ) mesuré «in situ» sur 200 TI et TI-TP (132 kV et 220 kV) dans la région romande (1979-1981)  
 Tension de mesure:  $U_m/\sqrt{3} \triangleq 84 \text{ kV}/145 \text{ kV}$  et  $142 \text{ kV}/245 \text{ kV}$



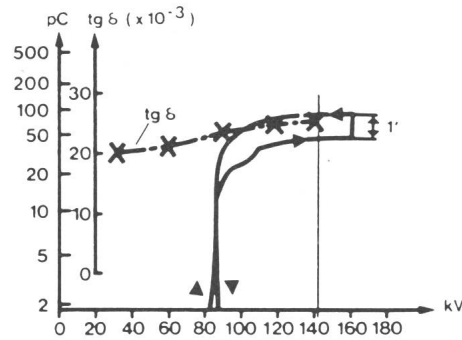
**Fig. 11** Pont de mesure de décharges partielles  
 Os Oscilloscope x-y ou table traçante d. p. = f(U)



**Fig. 12** Facteur de pertes diélectriques et niveau de décharges partielles en fonction de la tension sur un transformateur de mesure sain



**Fig. 13** Facteur de pertes diélectriques et niveau de décharges partielles en fonction de la tension sur un transformateur dégradé  
 Extinction et allumage des décharges partielles en dessous de la tension d'essai (forte hystérèse)



**Fig. 14** Facteur de pertes diélectriques et niveau de décharges partielles en fonction de la tension sur un transformateur dégradé  
 Extinction et allumage des décharges partielles en dessous de la tension d'essai (faible hystérèse)

### 3.3 Mesure des décharges partielles sur le site

Diverses techniques ont été utilisées pour travailler dans l'atmosphère électromagnétiquement perturbée d'un poste à haute tension en exploitation :

- une mesure en pont simple;
- une mesure au moyen d'un pont à discriminateur électronique de provenance de perturbation;
- une mesure au moyen de cages blindées (mailles de 50 mm) et de conducteurs coaxiaux à haute tension (fig. 15 et 16).

En complément à une alimentation électrique autonome (groupe électrogène permettant un découplage par rapport au circuit électrique d'alimentation du poste), seule la méthode de blindage a donné de bons résultats (bruit de fond < 2 pC). Une telle méthode a l'inconvénient d'être relativement longue à mettre en œuvre, raison pour laquelle des solutions sont à l'étude pour améliorer cette situation (cage blindée démontable).

### 4. Conclusions

La comparaison entre les résultats de mesure des figures 12 à 14 montre que l'on a pu constater une corrélation entre le comportement des décharges partielles et l'évolution du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension appliquée à l'appareil (tableau I). Un haut niveau et une forte hystérèse des décharges partielles correspondent à un facteur de pertes diélectriques plus élevé variant avec la tension appliquée. Ce

Critères d'évaluation des qualités d'isolation

Tableau I

|          |                     |                         |                             |                    |
|----------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| tg δ     | ↘                   | ↘                       | ↗                           | ↗                  |
| d.p.     | ↘                   | ↗                       | ↗                           | ↘                  |
| Etat     | Sortie fabrication  | Dégradation lente       | Dégradation forte           | Proche du claquage |
| Décision | Bon pour le service | Suivre d'année en année | Mise hors service immédiate |                    |

tg δ ↘ : 2-5 ‰; ↗ 8-15 ‰  
d.p. ↘ : 1-10 pC; ↗ 100-1000 pC

Tensions de mesure normalisées selon CEI [11]

Tableau II

| Tension nominale | Tension la plus élevée | Facteur de pertes diélectriques | Décharges partielles          |                                   |                             |
|------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
|                  |                        |                                 | Tension simple la plus élevée | Tension de précontrainte (≥ 10 s) | Tension de mesure (≥ 1 min) |
| $U_n$            | $U_m$                  |                                 | $U_m/\sqrt{3}$                | $0,8 \cdot 1,3 U_m$               | $1,1 U_m/\sqrt{3}$          |
| 66               | 72,5                   |                                 | 42                            | 78,5                              | 47                          |
| 110              | 123                    |                                 | 71                            | 133                               | 78                          |
| 132              | 145                    |                                 | 84                            | 157                               | 93                          |
| 220              | 245                    |                                 | 142                           | 265                               | 157                         |
| 380              | 420                    |                                 | 243                           | 454                               | 268                         |

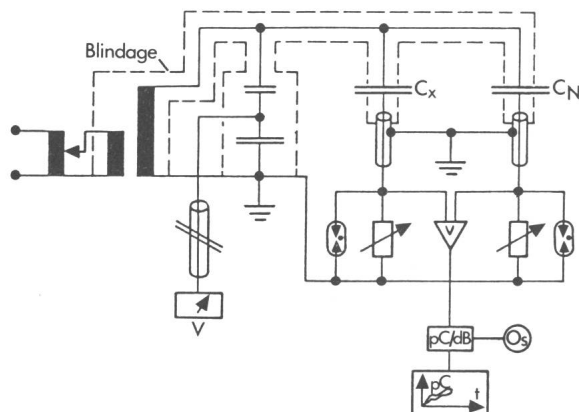


Fig. 15 Schéma du circuit blindé de mesure des décharges partielles

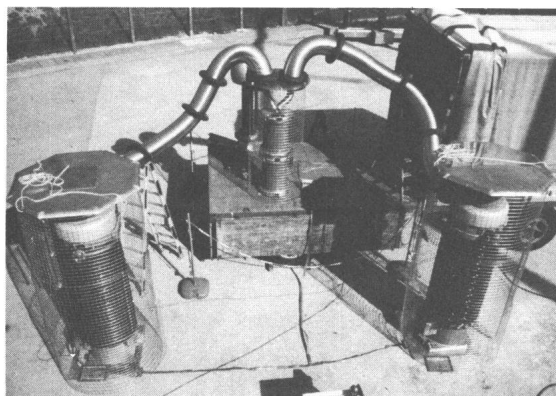


Fig. 16 Installation mobile blindée de mesure des décharges partielles

Au premier plan, les transformateurs à mesurer dans leur cage blindée. Au second plan, le transformateur d'alimentation à haute tension (200 kV). Entre eux les conducteurs à haute tension coaxiaux (FM Gougria SA)

comportement peut être expliqué par l'hypothèse que l'accumulation de décharges partielles au cours du temps dans le système diélectrique peut entraîner l'élévation du facteur de pertes diélectriques [9; 10]. Cette hypothèse, basée sur quelques constatations, devrait toutefois être vérifiée aussi bien sur un lot important d'appareils que par des simulations sur modèles<sup>1)</sup>.

Les valeurs de tension de test à appliquer lors des essais in situ sont données au tableau II en fonction des tensions nominales des réseaux.

Afin de faciliter aux exploitants des réseaux électriques suisses les mesures du facteur de pertes diélectriques et des décharges partielles selon les méthodes décrites, une préétude est en cours, en collaboration avec la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), en vue de réaliser des équipements de mesure mobiles.

<sup>1)</sup> Un article « Banc d'essais diélectriques assistés par ordinateur » est prévu pour l'automne 1982.

### Bibliographie

- [1] H. J. Vorwerk: Betriebserfahrungen mit Messwandlern > 100 kV und ihre Konsequenzen. Bull. SEV/VSE 72(1981)1, S. 27...34.
- [2] M. Aguet e. a.: Contrôle de qualité des isolations haute tension dans des postes de couplage en exploitation. Rapport CIGRE N° 23-02, 1980.
- [3] Méthode pour la détermination de la rigidité des huiles isolantes. Publication de la CEI N° 156, 1963.
- [4] Détermination de la teneur en hydrocarbures aromatiques des huiles isolantes minérales neuves. Publication de la CEI N° 590, 1977.
- [5] B. Fallou: Détection et recherche des caractéristiques d'un défaut latent à partir de l'analyse des gaz dissous dans l'huile d'une isolation. Electra (CIGRE) -(1975)42, p. 31...52.

- [6] Interprétation de l'analyse des gaz dans les transformateurs et autres matériels électriques remplis d'huile, en service. Publication de la CEI N° 599, 1978.
- [7] *M. Aguet et M. Ianovici*: Haute tension. Traité de l'électricité, N° XXII. St-Saphorin, Editions Georgi, 1982.
- [8] Pont de mesure de précision commutable pour la haute tension, selon Prof. D<sup>r</sup> H. Schering. Tettex Information N° 5(1976).
- [9] *R. B. Blodgett, R. M. Wade and W. D. Wilkens*: An attempt at predicting cable breakdown voltage from dielectric measurements. IEEE Trans. EI 16(1981)6, p. 564...567.
- [10] *F. Viale e. a.*: Corrélation entre l'énergie des décharges partielles et la dégradation de l'isolation papier imprégné d'huile. Rapport CIGRE Groupe 15, 1982.
- [11] Transformateurs de mesure. Quatrième partie: Mesure des décharges partielles. Publication de la CEI N° 44-4, 1980.

**Adresse de l'auteur**

*M. Aguet*, Ing. dipl. EPFL-SIA, Chargé de cours EPFL, Laboratoire de réseaux d'énergie électrique, 16 ch. de Bellerive, 1007 Lausanne.  
(Responsable du développement technique de Condensateurs Fribourg Holding S.A.)