

# Une percée dans la conception des parafoudres

J.S. Kresge, F.D. Martzloff, S.A. Miske, E.C. Sakshaug  
General Electric Company

*Reprinted from Proceedings, IEEE Canadian Conference on Power and Energy, 1978*

## **Significance**

Part 7 – Mitigation Techniques

A summary translation into French of the seminal Sakshaug et al. paper (see “[Sakshaug](#)” in the Annex), aimed at introducing the novel zinc-oxide arresters to the French-speaking Canadian engineering community.

## UNE PERCEE DANS LA CONCEPTION DES PARAFONDRES

J.S. Kresge  
General Electric Co.  
Pittsfield, Mass.

F.D. Martzloff  
General Electric Co.  
Schenectady, NY

S.A. Miske  
General Electric Co.  
Schenectady, NY

E.C. Sakshaug  
General Electric Co.  
Pittsfield, Mass.

### SOMMAIRE

Un nouveau matériau permettant la réalisation de résistances variables de caractéristiques supérieures a été mis au point en 1968 par Matsushita Electrical Industrial. Les premières applications en ont été faites dans l'électronique. En 1970, des études ont été lancées à la General Electric et se poursuivent encore, afin de produire des blocs de taille suffisante pour la construction de parafoudres de station, au lieu des blocs classiques en carbure de silicium. Ces études ont progressé au point où il est maintenant possible de réaliser grâce à ce matériau des parafoudres qui n'ont plus besoin d'éclateurs en série.

### INTRODUCTION

Les caractéristiques souhaitables pour un parafoudre idéal sont bien connues:

- 1 - La conduction commence à une tension quelque peu supérieure à la valeur nominale;
- 2 - La tension est maintenue à ce niveau pendant toute la décharge;
- 3 - La conduction se bloque pratiquement à la même tension où elle a commencé.

Ce parafoudre idéal ne laisserait ainsi passer que le courant nécessaire pour réduire la surtension à la valeur de protection du parafoudre. Tout parafoudre qui maintient une tension inférieure à cette valeur de protection pendant tout ou partie de la décharge doit écouler une intensité plus élevée et par conséquent dissiper une plus grande énergie. L'élimination des éclateurs, rendue possible par la mise au point du nouveau matériau, représente une nouvelle étape vers l'obtention des caractéristiques idéales.

Il est bien connu qu'il serait avantageux de réaliser un parafoudre sans éclateurs en série pour les raisons suivantes:

- 1 - Les éclateurs peuvent avoir des tensions d'amorçage variables si le parafoudre n'est pas bien scellé.
- 2 - Le fonctionnement sous éclateur momentanément plus élevée peut être limité du fait des risques de l'amorçage d'un éclateur dû à une pollution de surface;
- 3 - Le nombre de pièces nécessaires à la construction d'un éclateur est important par rapport au nombre total employé pour le parafoudre, ce qui augmente la probabilité d'une erreur de fabrication ou d'une défaillance.

La courbe A de la Figure 1 montre la caractéristique tension-courant d'une résistance variable faite du nouveau matériau à base d'oxyde de zinc. La caractéristique non-linéaire de ce matériau reste constante sur une large gamme de courant. Il en résulte qu'un parafoudre construit avec ces résistances, sans éclateur en série, se rapproche davantage du parafoudre idéal qu'un parafoudre à éclateur classique, aussi perfectionné qu'il soit, construit avec des résistances au carbure de silicium dont la caractéristique est indiquée par la courbe B de la Figure 1. Le nouveau parafoudre ne

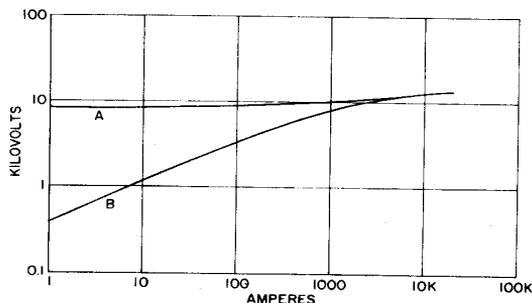


Figure 1. Caractéristique tension-courant d'un élément de 6 kV. A = oxyde de zinc; B = carbure de silicium

laisse passer qu'un courant très faible jusqu'à ce que la tension ait atteint le voisinage du niveau de protection, et même alors il n'écoule que le courant nécessaire pour limiter la surtension au niveau de protection. L'énergie absorbée par le parafoudre est ainsi réduite au minimum.

### CARACTERISTIQUES DES RESISTANCES

L'élément de résistance variable (non-linéaire) est fait d'un matériau fritté à haute température, contenant principalement de l'oxyde de zinc, avec des additifs de divers oxydes produisant les caractéristiques non-linéaires désirées. La structure du matériau comprend un réseau de grains conducteurs d'oxyde de zinc séparés par des couches intermédiaires résistantes contenant les oxydes additifs. Lorsque la contrainte diélectrique augmente, cette couche intermédiaire devient progressivement conductrice, suivant une loi non-linéaire représentée à la Figure 1. Les propriétés utiles à la réalisation d'un parafoudre sont les suivantes:

- 1 - La caractéristique tension-courant est remarquablement peu inclinée: une variation de courant de cinq décades, ne produisant qu'une variation de tension de 50%.
- 2 - Le coefficient de température est très faible, de sorte que les caractéristiques de protection du parafoudre sont indépendantes de la température. Ceci n'est pas le cas pour le carbure de silicium classique, celui-ci ayant un coefficient d'environ  $-0.24\%/^{\circ}\text{C}$ . Les résistances variables à l'oxyde de zinc ont aussi un coefficient négatif pour les très faibles courants; ceci n'a pas d'influence sur les caractéristiques de protection mais on doit en tenir compte dans les calculs thermiques du parafoudre.
- 3 - Aux très fortes densités de courant (au-dessus de  $10 \text{ A/cm}^2$ ), la caractéristique tension-courant monte plus vite, en raison de la résistivité des grains d'oxyde de zinc. Ceci est aussi le cas du carbure de silicium, mais le phénomène est moins marqué pour l'oxyde de zinc même aux plus fortes densités de courant rencontrées dans le fonctionnement d'un parafoudre.

- 4 - Un dernier point très important est la stabilité des caractéristiques de l'oxyde de zinc à la suite de décharges d'intensité très élevées. Ceci n'est pas le cas du carbure de silicium qui peut produire des tensions de protection plus élevées à la suite de décharges.

## ESSAIS SUR LES PARAFONDRES

### CARACTERISTIQUES

#### 1 - Amorçage

Comme le parafoudre n'emploie pas d'éclateur, il n'a pas de caractéristiques d'amorçage. Au fur et à mesure que la tension monte, les éléments non-linéaires deviennent progressivement plus conducteurs, comme indiqué par la courbe A de la Figure 1.

#### 2 - Tension résiduelle

Les courbes de la Figure 1 ont été tracées à partir d'un point commun à 10 kA pour une décharge normalisée de  $8 \times 20 \mu\text{s}$  (1.6 fois la tension nominale du parafoudre). Pour des intensités supérieures à 10 kA, la tension résiduelle du nouveau parafoudre est inférieure à celle du parafoudre classique. Pour des formes d'ondes plus raides que la norme  $8 \times 20$ , l'élément à l'oxyde de zinc est encore meilleur, comme indiqué à la Figure 2. La stabilité des caractéristiques pour des impulsions de haute intensité est remarquable: par exemple, deux décharges de  $4 \times 8 \text{ s}$  à 65 kA ne produisent qu'un changement de 2% à 100 ampères et moins de 3% à 10 kA. Des décharges répétées de 10 kA ne produisent aucun changement mesurable de la tension résiduelle, ce qui n'est pas le cas d'un élément au carbure de silicium, comme le montrent les normes qui permettent une variation de 10% à la suite de décharges de 10 kA.<sup>2</sup>

#### 3 - Durabilité

##### a) Essais de fonctionnement

Un des essais fondamentaux d'un parafoudre, établi à la suite d'une longue expérience, est l'essai de fonctionnement<sup>3</sup>. L'oscillogramme de la Figure 3 montre l'absence d'un courant de suite pour le nouveau parafoudre après passage de la décharge à un angle de  $30^\circ$  avant la crête. De plus, l'allure du courant dans le parafoudre reste la même avant et après la décharge. Pour des décharges répétées, le courant augmente légèrement pour un certain temps, et revient à sa valeur originale après dissipation de la chaleur produite par les décharges successives.

##### b) Décharge d'une ligne de transport

L'essai de décharge d'une ligne de transport spécifié par la norme ANSI C 62.1-1975, ne présente aucune difficulté pour un parafoudre à l'oxyde de zinc. La forme d'onde de courant pour la dernière décharge est sensiblement la même que pour la première de l'essai.

##### c) Capacité de tenue aux surtensions

Certaines applications exigent qu'un parafoudre soit capable de survivre à plusieurs périodes à une tension au-dessus de la valeur nominale à la suite d'une décharge relativement élevée due à une surtension de manœuvre.

Dans les parafoudres classiques, la difficulté de cet essai résulte d'un réamorçage des éclateurs. Dans le cas du nouveau parafoudre, ce problème ne se pose plus, mais il faut toutefois démontrer que les résistances variables peuvent absorber l'énergie correspondant à la tension la plus élevée.

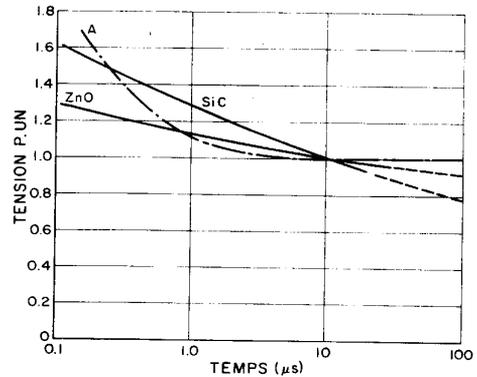


Figure 2. Tension résiduelle à 10 kA en fonction du temps de crête pour les éléments de parafoudre à l'oxyde de zinc et au carbure de silicium. La courbe A est la caractéristique d'amorçage d'un parafoudre de 264 kV exprimée en pour-un, dans le cas d'une décharge de 10 kA,  $8 \times 20 \mu\text{s}$ .

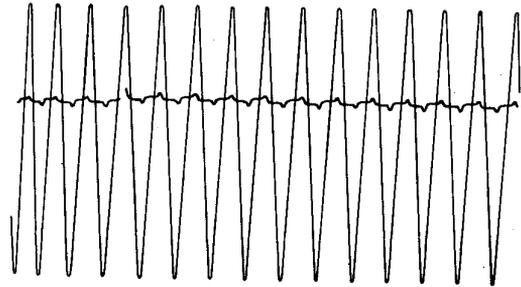


Figure 3. Essai de fonctionnement typique à la tension nominale pour une onde de choc de  $8 \times 20 \mu\text{s}$ . La sinusoïde de grande amplitude est la tension aux bornes du parafoudre, l'onde de petite amplitude est le courant dans le parafoudre (9 mA de crête à crête).

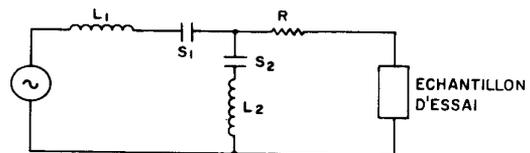


Figure 4. Circuit d'essai de surtension 60 Hz à 2 niveaux  $L_1$  = inductance de la source;  $L_2$  = inductance de charge  $S_1$  &  $S_2$  = interrupteurs synchronisés ( $S_2$  est fermé une demi-période après  $S_1$ )  $R$  = impédance caractéristique de la ligne de transport

La Figure 4 montre le schéma d'un circuit employé pour soumettre des sections de parafoudre à des tensions dépassant la valeur nominale. L'échantillon à essayer est relié à l'alternateur ayant une inductance  $L_1$  par une résistance  $R$ , égale à l'impédance caractéristique de

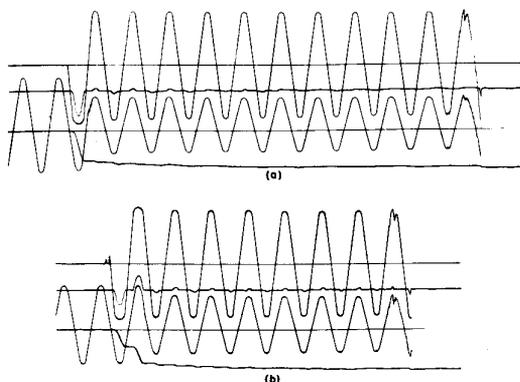


Figure 5. Fonctionnement du parafoudre dans le circuit de surtension 60 Hz de la Figure 4. Les traces, de haut en bas, sont la tension du parafoudre, le courant dans le parafoudre, la tension de la source en amont de l'impédance caractéristique, et l'énergie dissipée dans le parafoudre.

(a) Tensions présumées de 2.0, 1.32, 1.35, 1.29, 1.26, etc. la valeur nominale. L'intensité maximum dans le parafoudre est 760 A en crête. L'énergie totale est de 5.1 kW-s par kV de valeur nominale

(b) Tensions présumées de 1.61, 1.61, 1.34, 1.31, etc. la valeur nominale. L'intensité maximum dans le parafoudre est de 450 A en crête. L'énergie totale est de 5.3 kW-s par kV de valeur nominale.

la ligne, en fermant le contact (synchronisé)  $S_1$ . En fermant  $S_2$  une ou plusieurs demi-périodes plus tard, la tension est réduite par le diviseur  $L_1/L_2$ . La Figure 5 montre deux oscillogrammes enregistrés avec ce circuit pour une section du nouveau parafoudre prévue pour un niveau de protection de 1.39 en cas de surtension de manœuvre et de 1.6 pour une décharge de 10 kA.

Pour les oscillogrammes de la Figure 5, les valeurs présumées des crêtes des demi-périodes successives (qui auraient été atteintes si le parafoudre n'avait pas été branché sur le circuit d'essai) sont décroissantes du fait du changement de l'impédance de la machine tournante d'essai en régime transitoire. Pour la Figure 5(a), les crêtes présumées successives sont 2.0, 1.32, 1.35, 1.29, 1.29, ... etc, décroissant à 1.19 fois la valeur nominale pour la dixième période, point auquel la tension a été coupée. Le parafoudre a écoulé un courant de crête de 760 ampères pour la première demi-période, avec des crêtes de moins de 80 ampères pour les périodes suivantes. L'énergie totale absorbée par le parafoudre a été 5.1 kW-s par kV de valeur nominale.

Dans le cas de la Figure 5 (b), les crêtes présumées de la tension étaient 1.61, 1.61, 1.34, 1.31, ...etc, décroissant à 1.24 pour la huitième période. Dans ce cas, le parafoudre a écoulé un courant maximum de 450 ampères en crête, et a absorbé une énergie totale de 5.3 kW-s par kV de valeur nominale. Les traces de courant pour les deux oscillogrammes correspondent exactement aux intensités prévisibles d'après les caractéristiques de tension-courant des résistances variables. Il est donc bien évident que l'échauffement dû à l'énergie dissipée n'a aucun effet nuisible sur les capacités des résistances à limiter le courant quand la tension 60 Hz revient à sa valeur normale.

Des surtensions temporaires mais persistant pendant de nombreuses périodes peuvent survenir dans certaines conditions de l'exploitation d'un réseau, par exemple la mise sous tension d'un transformateur, des effets de résonance, ou un délestage. Dans ces cas, la capacité d'un parafoudre de supporter des surtensions modérées mais de longue durée est très intéressante.<sup>5</sup> Des essais ont démontré une capacité suffisante pour supporter des surtensions de 120% de la valeur nominale pendant une seconde. L'énergie totale absorbée pendant un tel incident n'est que de 3.1 kW-s par kV de valeur nominale.

#### 4. Application pour décharge de condensateur

Les constructeurs et les utilisateurs de parafoudres savent depuis longtemps que l'une des applications les plus difficiles est rencontrée au voisinage de batteries de condensateurs. En cas de surtension des condensateurs, avec amorçage du parafoudre en parallèle, la résistance des éléments non-linéaires est la seule à limiter le courant de décharge des condensateurs, dont l'impédance est pratiquement nulle. Si la surtension présumée dépasse la tension d'amorçage du parafoudre, un appoint de courant provenant de l'énergie emmagasinée dans l'inductance du circuit peut venir s'ajouter au courant de décharge des condensateurs.<sup>6</sup> Les éclateurs d'un parafoudre classique peuvent être endommagés par des courants résultant d'un transfert de charge dépassant 1 coulomb, entraînant un réamorçage de l'éclateur.

Le nouveau parafoudre commence à écouler un courant dès que la tension s'approche du niveau de protection et ce courant est limité à la valeur correspondant à ce niveau. Par conséquent, les crêtes de courant, les charges et les énergies mises en cause sont bien moindres que pour un parafoudre à éclateurs. La Figure 6 indique les résultats comparatifs pour les deux types de parafoudre, d'après un calcul à l'ordinateur. En a), le circuit correspond à une batterie de 135 MVAR déconnectée d'un réseau à 242 kV ayant une puissance de court-circuit de 15 kA, protégée par un parafoudre (A) de 180 kV du côté source de l'interrupteur. La surtension présumée qui aurait été atteinte sans le parafoudre est indiquée en pointillé sur les Figures 6b et 6c. Dans la Figure 6b, un parafoudre classique ayant une tension d'amorçage de 385 kV (1.5 fois la valeur nominale) produirait une crête de courant de 12.4 kA, avec une charge totale de 1.1 coulomb écoulé entre l'amorçage et le point où le courant tombe au-dessous de 1.5 kA. Par contre, le parafoudre à l'oxyde de zinc de la Figure 6c, sans éclateurs, ne laisse passer qu'une crête de 1.8 kA, tout en limitant la surtension à 1.39 fois la valeur nominale. L'énergie absorbée par le parafoudre n'est que de 0.7 kW-s par kV de valeur nominale.

Il est donc bien évident dans cette application que le nouveau parafoudre peut assurer une meilleure protection tout en étant soumis à une dissipation d'énergie moindre que le parafoudre classique.

#### STABILITE SOUS CONTRAINTE CA PROLONGEE

Une propriété des résistances variables à l'oxyde de zinc semble être une tendance à la dérive de la caractéristique tension-courant aux faibles intensités sous une contrainte CA de longue durée. Cette dérive tend à augmenter les pertes dans le matériau, et du fait que le coefficient de température est positif, il faut démontrer que les résistances sont stables à long terme dans les conditions de température et de tension rencontrées en service.

Des essais effectués à divers niveaux de contrainte et de températures ont confirmé que le taux d'augmentation des pertes en fonction de la température suit la loi

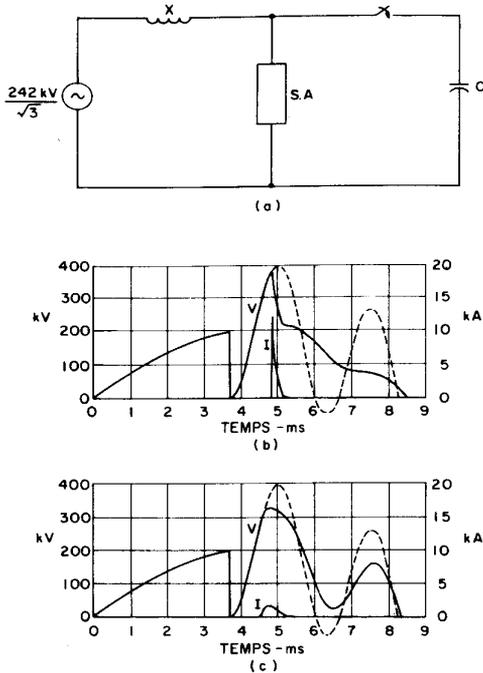


Figure 6. Comparaison entre le fonctionnement d'un parafoudre classique et d'un parafoudre à l'oxyde de zinc installés près d'un banc de condensateurs.

- (a) Schéma du circuit
- (b) Parafoudre classique de 180 kV
- (c) Parafoudre à l'oxyde de zinc, de 180 kV

d'Arrhénius bien connue, qui décrit l'évolution d'un phénomène activé par la température. Cette loi énonce que le logarithme du temps nécessaire à produire un certain changement d'une caractéristique donnée est une fonction linéaire de l'inverse de la température absolue ( $^{\circ}\text{K}$ ). Cette loi est appliquée pour les essais de la température. Ceci est représenté sur le graphique de la Figure 7, indiquant le temps nécessaire pour doubler les pertes, en fonction de l'inverse de la température, au niveau de contrainte correspondant à une application de parafoudre à 72%.

Des études ont démontré que le maximum de la température moyenne pondérée pour un parafoudre installé dans un climat chaud, en plein soleil pour de longues durées, du genre existant à Phoenix, Arizona, ne dépasse pas  $45^{\circ}\text{C}$  ( $115^{\circ}\text{F}$ ). Cette moyenne pondérée a été obtenue en déterminant le profil présumé de la température en fonction du temps pour l'enveloppe de porcelaine, au cours d'une journée typique des quatre saisons de l'année. Ces résultats ont alors été traités selon la pente de la droite d'Arrhénius de la Figure 7 pour obtenir la température moyenne pondérée (ou efficace) dans le cas d'une application dans des conditions très dures. D'après la Figure 7, il faudrait environ 200 ans pour que les pertes d'un parafoudre à 72% doublent leur valeur initiale. Les pertes pour un parafoudre avec résistances à l'oxyde de zinc seront d'environ 0.15 watt par kV de valeur nominale à  $25^{\circ}\text{C}$ . Ceci ne représente que les deux-tiers des pertes mises en jeu dans un parafoudre de construction classique.

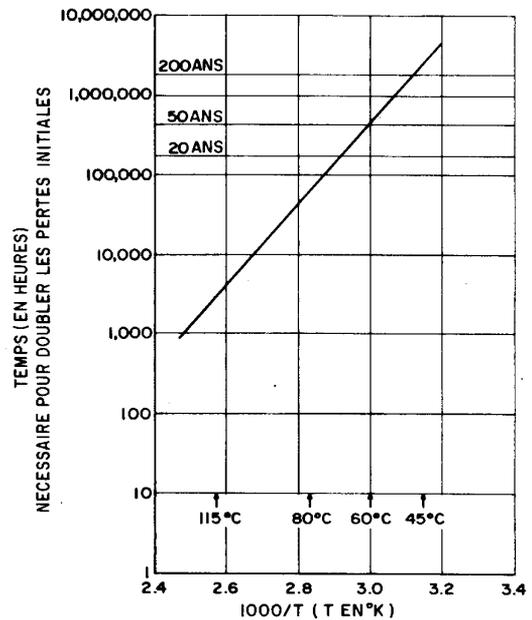


Figure 7. Diagramme d'Arrhénius pour la durée de vie d'un élément de résistance variable à l'oxyde de zinc en fonction de l'inverse de la température, sous une contrainte de tension à 60 Hz.

#### CAPACITE EN ENERGIE DE DECHARGE

Pour toute décharge unique, les disques réalisés pour des parafoudres de 312 kV et au-dessous sont capables d'absorber une énergie de 9 kW-s par kV de valeur nominale. Par exemple, une décharge unique de 1000 ampères d'une durée de 4 millisecondes est acceptable. L'absorption d'une énergie supérieure à cette valeur au cours d'une décharge unique peut provoquer des fissures dans les résistances par choc thermique. Après absorption d'une énergie de 9 kW-s par kV de valeur nominale pendant une décharge unique, un intervalle de 1 à 2 minutes est suffisant pour permettre l'égalisation de la température dans le disque; on peut alors faire absorber une quantité supplémentaire d'énergie qui n'est limitée que par la stabilité thermique en régime transitoire discutée plus loin.

On peut se faire une idée sur la capacité à absorber de l'énergie en remarquant que l'énergie emmagasinée dans la ligne employée pour effectuer les essais normalisés de décharge de ligne de transport pour des parafoudres de 345 kV est moins de 4.5 kW-s par kV de valeur nominale du parafoudre, et que l'énergie réellement dissipée par un parafoudre à l'oxyde de zinc pour une protection de 72% est inférieure à 3 kW-s par kV de valeur nominale.

Les résistances variables à l'oxyde de zinc ont un coefficient positif de perte en fonction de la température. Cette relation entre les pertes et la température du disque rend nécessaire de prévoir la construction du parafoudre avec un système de transfert de chaleur pour assurer que les pertes à la tension de service ne soient pas augmentées au-delà des possibilités de dissipation de chaleur de l'ensemble. Afin d'assurer la stabilité des résistances à la suite de décharges de

haute énergie, le parafoudre a été réalisé de telle sorte que l'enveloppe de porcelaine dont les dimensions sont assez importantes puisse servir de puits thermique pour les disques. De cette façon, on est arrivé à obtenir une capacité d'absorption d'énergie de 17.7 kW-s par kV de valeur nominale pour un bref intervalle de temps.

### PERFORMANCE AVEC POLLUTION

Un problème difficile pour les utilisateurs de parafoudres, datant de l'origine de leur emploi, se présente avec la possibilité d'une défaillance du parafoudre due à la pollution de la surface de l'enveloppe. Pour les parafoudres classiques, le problème est dû à la possibilité que la tension d'amorçage soit abaissée à la tension de fonctionnement, du moins pour de brèves périodes, selon le mécanisme bien connu où la répartition de tension est déséquilibrée sous l'effet de la pollution. Le courant de suite, normalement associé à chaque amorçage, peut très rapidement provoquer un échauffement excessif du parafoudre, voire sa défaillance si il perdait sa capacité à couper le courant de suite.

Le nouveau parafoudre peut passer très facilement l'essai de pollution normalisé ANSI. En fait, comme cet essai normalisé ne produit pratiquement aucun effet sur le parafoudre, des essais plus sévères ont été effectués. La performance en essai de pollution du nouveau parafoudre, comparée à celle des conceptions existantes qui donnent satisfaction en service, indique que la nouvelle conception possède une capacité remarquable à résister aux effets d'une pollution externe poussée.

### CONCLUSIONS

1. La mise au point de résistances variables à base d'oxyde de zinc est arrivée au point où des disques capables de dissiper une haute énergie sont disponibles et permettent de réaliser toutes les valeurs nominales des parafoudres de station, sans éclateurs en série, et offrant des caractéristiques de protection supérieures à celles des conceptions actuelles.

2. Le nouveau parafoudre offre des avantages très intéressants:
  - a) Fiabilité accrue du fait de la simplicité de la nouvelle conception;
  - b) Caractéristiques de protection supérieures;
  - c) Absorption d'énergie minimum par rapport aux niveaux de protection obtenus;
  - d) Performance supérieure à celle des parafoudres classiques pour les circuits de faible impédance (applications avec câbles ou condensateurs).
  - e) Fonctionnement en douceur - le matériel protégé n'est pas soumis aux fronts raides associés à l'amorçage.
  - f) Capacité d'absorption d'énergie supérieure à celles des parafoudres actuels.
3. Des essais poussés ont démontré que la performance de ces nouveaux parafoudres donne toute satisfaction.

### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à leurs collègues de la General Electric qui ont contribué au succès de ce travail, en particulier Herbert Fishman, Howard Ellis, et Dr Lionel Levinson.

### REFERENCES

1. E.C. Sakshaug, J.S. Kresge, S.A. Miske, "A New Concept in Station Arrester Design" IEEE Paper F-76 393-9, Summer Meeting Power Engineering Society, Portland. (A publier au Bulletin PAS)
2. American National Standard C62.1-1975, "Surge Arresters for Alternating Current Circuits"
3. *Ibid.*
4. Commission Electrotechnique Internationale, Publication 99-1, 1970. "Parafoudres, Première partie: Parafoudre à résistance variable pour réseaux à courant alternatif"
5. H.C. Barnes, *Preliminary Analysis of Extensive Switching Surge Testing of American Electric Powers First 765 kV Line and Station* IEEE Transactions (PAS), Vol. PAS-90, No 2, Mars-Avril 1971.
6. D.J. Melvold, S.A. Miske, E.C. Sakshaug, "Switching Cables Can Stress Arresters", *Electrical World*, 15 Mai 1974.