

Bole 4

THESE

présentée devant
L'ECOLE CENTRALE DE LYON

pour obtenir

le titre de **DOCTEUR**
Spécialité : **Electrotechnique**

par

M. Manuel SERRANO SERVIN

Etude du Comportement Electrique et Thermique de Parafoudres à ZnO

Soutenue le 7 décembre 1988 devant la Commission d'Examen :

Jury MM. Ph. AURIOL Président

A. FOGGIA

A. ROUSSEAU

G. MEUNIER

F. BURET

ECOLE CENTRALE DE LYON

Directeur : J. BORDET
Directeur Adjoint : R. RICHE
Directeur de l'Administration de la Recherche : P. CLECHET
Directeur des Etudes : F. SIDOROFF

LISTE DES PERSONNES HABILITEES A ENCADRER DES THESES A L'E.C.L.

(Doctorat d'Etat ou Habilitation au sens de l'Arrêté du 5 juillet 1984,
modifié par l'Arrêté du 21 mars 1988)

Mathématiques-Informatique-Systèmes

B. DAVID	Professeur 2e Classe
C.M. BRAUNER	Professeur 2e Classe - Univ.- Bordeaux
J.F. MAITRE	Professeur 1ère Classe
F. CONRAD	Maître Assistant ENSM-St-Etienne
G. THOMAS	Maître de Conférences
F. MUSY	Maître de Conférences
Cl. SCHMIDT-LAINE	Chargée de Recherche au CNRS

Physicochimie des Matériaux

P. CLECHET	Professeur 1ère Classe
J. JOSEPH	Professeur 2e Classe
P. PICHAT	Directeur de Recherche au CNRS
J.M. HERRMANN	Directeur de Recherche au CNRS
N. JAFFREZIC	Chargée de Recherche au CNRS
G. ESCHALIER	Maître de Conférences
A. GAGNAIRE	Maître de Conférences
Cl. MARTELET	Maître de Conférences
J.R. MARTIN	Maître de Conférences
R. OLIER	Maître de Conférences
A. TAILLAND	Maître de Conférences

Métallurgie et Physique des Matériaux

P. GUIRALDENQ	Professeur 1ère Classe
D. TREHEUX	Professeur 2e Classe
J. BLANC-BENON	Professeur - LYON I
J. BRUGIRARD	Professeur - LYON I
B. COQUILLET	Maître de Conférences
D. JUVE (Mme)	Ingénieur d'Etude - 2e C.
NGUYEN Du	Assistant Titulaire

Electronique

P. VIKTOROVITCH	Directeur de Recherche au CNRS
G. HOLLINGER	Directeur de Recherche au CNRS
R. BLANCHET	Professeur 2e Classe
S. KRAWCZYK	Chargé de Recherche au CNRS
M. LE HELLEY	Maître de Conférences
P. LEYRAL	Maître Assistant
O. BONNAUD	Professeur - INSA - Rennes
J. BOREL	Direct. Technique Sté E.F.C.I.S.
J.P. CHANTE	Professeur - INSA - Lyon

Electrotechnique

Ph. AURIOL
A. FOGGIA
A. NICOLAS
G. ROJAT

Professeur 2e Classe
Professeur 1ère Classe - I.N.P.G.
Maître de Conférences
Maître de Conférences

Mécanique des Solides

B. CAMBOU
F. SIDOROFF
L. JEZEQUEL
Cl. SURRY
L. VINCENT

Professeur 2e Classe
Professeur 1ère Classe
Maître de Conférences
Professeur - E.N.I.S.E.
Maître de Conférences

Technologie des Surfaces

J.M. GEORGES
J. SABOT
T. MATHIA
Ph. KAPSA
J.L. LOUBET
J.L. MANSOT
J.M. MARTIN
H. MONTES

Professeur 1ère Classe
Professeur 2e Classe
Directeur de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS
Maître de Conférences
Maître de Conférences

Mécanique des Fluides

J. MATHIEU
J. BATAILLE
B. GAY
J.N. GENCE
D. JEANDEL
E. ALCARAZ
F. LEBOEUF
R. MOREL
Cl. CAMBON
J.P. BERTOGLIO
P. FERRAND
M. LANCE

Professeur Classe Exceptionnelle
Professeur Lyon I
Professeur Lyon I
Professeur Lyon I
Professeur 2e Classe
Professeur 2e Classe
Maître de Conférences
Maître de Conférences INSA
Chargé de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS
Chargé de Recherche au CNRS

Acoustique

(Mlle) G. COMTE-BELLOT
M. SUNYACH
D. JUVE
Ph. BLANC-BENON

Professeur Classe Exceptionnelle
Professeur IUT-Lyon
Maître de Conférences - LYON I
Chargé de Recherche au CNRS

Machines Thermiques

M. BRUN
Ph. ARQUES

Professeur 2e Classe
Professeur 2e Classe

Ce travail a été réalisé au laboratoire d'Electrotechnique de l'Ecole Centrale de Lyon en collaboration avec la Direction des Etudes et Recherches de l'Electricité de France.

Nous remercions sincèrement Messieurs les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour cette étude :

- Monsieur Philippe AURIOL, Directeur du laboratoire d'Electrotechnique de l'ECL pour l'honneur qui nous a fait de présider le jury de cette thèse.

- Monsieur Albert FOGGIA qui a assuré la direction scientifique de l'étude.

- Monsieur Alain ROUSSEAU, Ingénieur EDF, pour le soutien et conseils qu'il nous a accordé.

- Monsieur François BURET, professeur agrégé à l'Ecole Centrale de Lyon.

- Monsieur Gérard MEUNIER, chargé de recherche au CNRS.

Nous remercions également les Institutions Mexicaines :

• CONACYT,

• BANCO DE MEXICO,

• INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

pour le soutien moral et financier qu'elles m'ont apporté pour réaliser mes études en France.

Nous tenons à remercier tous les collègues chercheurs et techniciens du laboratoire d'Electrotechnique de l'ECL qui ont su créer une atmosphère propice au bon déroulement de ce travail.

RESUME

Les parafoudres à Oxyde de Zinc (ZnO) sont de plus en plus utilisés dans les réseaux électriques de Haute Tension (HT) et de Moyenne Tension (MT) pour limiter les surtensions susceptibles d'endommager le matériel électrique. Le mode de défaillance le plus étudié de ce type de parafoudres est "l'emballement thermique" (cf. II.3). De ce fait, le comportement thermique et son imbrication avec les phénomènes électriques sont des points fondamentaux dans l'étude de parafoudres à ZnO.

Afin d'étudier le comportement thermique et électrique de ces parafoudres, nous avons développé un modèle thermo-électrique en utilisant le logiciel ASTEC3. Il tient compte des caractéristiques électriques non-linéaires de la partie active (céramiques ZnO), ainsi que leur dépendance non-linéaire en température. Ce modèle est basé sur l'analogie thermique-électrique et donne la répartition de température sur l'ensemble du parafoudre aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

Les essais réalisés en laboratoire sur différents types de structures de parafoudres, utilisés dans les réseaux HT et MT, ont permis de valider les résultats calculés à l'aide d'ASTEC3. Le modèle ainsi développé peut être appliqué à toute étude de caractère thermique.

En particulier, il a été démontré qu'il était possible d'améliorer la conception de ces parafoudres en augmentant la quantité de chaleur évacuée par les capots.

INTRODUCTION

Les parafoudres utilisant des céramiques à Oxyde de Zinc sont employés sur les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique, pour assurer la protection contre les surtensions et pour améliorer la qualité du service fourni à l'abonné. Un des aspects les plus importants pour ce type de parafoudres est celui des contraintes thermiques. En effet, lors de la protection des matériels, le parafoudre absorbe de l'énergie qui provoque une augmentation de température des éléments ZnO. Les pertes par effet joule sous la tensions de service augmentent avec la température et il est alors possible que le parafoudre s'emballe thermiquement, conduisant à sa destruction. Dans ces conditions, il est évident que les phénomènes thermiques sont particulièrement étudiés tant chez les constructeurs que chez les utilisateurs.

Deux méthodes permettent d'étudier le comportement thermique des parafoudres : les essais et la modélisation. C'est la modélisation que nous avons retenue afin de pouvoir changer rapidement tous les paramètres. Des essais de validations ont par ailleurs été effectués pour s'assurer de la représentativité du modèle.

Un modèle thermique a donc été développé qui prend en compte la non-linéarité de la caractéristique électrique du ZnO, ainsi que la non-linéarité des phénomènes thermiques. Ce modèle donne la répartition de la température sur l'ensemble des parafoudres (capots, céramiques, porcelaine) en fonction du temps. Il permet d'étudier aussi bien le régime permanent que les régimes transitoires (foudre...).

Ce modèle est basé sur des considérations théoriques mais les résultats obtenus ont été comparés à de nombreuses expériences réalisées sur le parafoudre équipé de dispositifs de mesure de température par fibre optique.

Enfin ce modèle a été appliqué à d'autres types de parafoudres pour vérifier sa validité aussi que sa facilité d'adaptation.

Dans le chapitre I nous présentons le rôle de parafoudres dans la protection des matériels reliés aux réseaux électriques. Après une étude bibliographique sur les principales caractéristiques des parafoudres à ZnO (Chapitre II), nous décrivons la

modélisation et le logiciel utilisé pour l'étude thermique-électrique des parafoudres (Chapitre III). Dans le Chapitre IV nous décrivons les essais réalisés et nous analysons les résultats expérimentaux obtenus à partir d'un parafoudre HT. Enfin dans le Chapitre V nous appliquons le modèle à un parafoudre MT et nous proposons des nouvelles structures des parafoudres.

NOTATIONS

V_s	Tension de seuil d'une céramique ZnO
N	Nombre de jonctions
α_1	Coefficient de non-linéarité d'une céramique ZnO
e_z	Epaisseur d'une céramique
d	Diamètre moyen des grains de ZnO.
P	Puissance générée ou pertes
T	Température de fonctionnement
T^*	Température critique d'emballement thermique
P^*	Puissance critique d'emballement thermique
I_r^*	Courant critique d'emballement thermique
T_a	Température ambiante
σ	Constante de Stefan Boltzmann $0,86 \cdot 10^{-4} \text{ eV}/^\circ\text{K}$, ou, $5,729 \cdot 10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4$
W_c	Energie d'activation
S_z	Surface d'une pastille à ZnO
H	Hauteur d'une pastille
h_T	Coefficient de dissipation de la chaleur totale entre deux corps
D	Diamètre d'une pastille
E	Champ électrique
a_0	Constante dans la détermination de la durée de vie d'une céramique ZnO.
a	Durée de vie d'une céramique ZnO
t	temps
r	Vitesse de dégradation en fonction des conditions de fonctionnement
$J_0(E)$	Constante qui dépend de la valeur du champ appliqué
$J_d(E)$	Densité du courant lors du fonctionnement
Φ	Quantité de chaleur écoulee.
$T_j - T_i$ ou ΔT	Ecart de température entre deux corps

C	Capacité thermique
S	Section droite, perpendiculaire à l'axe à travers lequel s'écoule la chaleur
λ	Conductivité thermique
GD	Conductance thermique par conduction
e	Trajet parcouru par Φ .
ϵ	Emissivité
F	Coefficient de configuration géométrique
GR	Conductance thermique par rayonnement
α	Coefficient superficiel des échanges thermiques par convection.
T_s	Température de la surface.
GV	Conductance thermique par convection.
α'	Coefficient moyen des échanges thermiques par convection.
Gr	Nombre de Grachof, sans dimension. $Gr = x^3 \rho_a^2 g \beta_a \Delta t / \mu_a^2$ est relatif à une enceinte fermée et remplie d'air. $Gr = L^3 \rho_a^2 g \beta_a \Delta t / \mu_a^2$ est relatif à une surface verticale.
Nu	Nombre de Nusselt, sans dimension. $Nu = \alpha L / \lambda_a$ est relatif à une surface verticale. $Nu = \alpha x / \lambda_a$ est relatif à une enceinte fermée remplie d'air.
Pr	Nombre de Prandtl, sans dimension. $Pr = C_p \mu / \lambda$
x	Espace libre dans une enceinte fermée
ρ_a	Densité de l'air.
g	Accélération de la pesanteur.
β_a	Coefficient cubique de dilatation de l'air
μ_a	Viscosité de l'air
C_p	Chaleur spécifique.
L	Hauteur d'une surface verticale.
K	Constante de dissipation de chaleur du parafoudre
τ	Constante de temps de refroidissement du parafoudre

CHAPITRE I

PRESENTATION DES PARAFONDRES A ZnO ET DE LEUR ROLE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES

Introduction

L'appareillage électrique, de par sa place privilégiée dans les réseaux électriques, peut engendrer, en cas de défaillance, des pertes économiques importantes et porter aussi atteinte à la sécurité des personnes et à l'utilisation des équipements. Un appareil électrique doit fonctionner parfaitement et donner satisfaction pendant toute sa durée de vie. Un équipement qui a été bien conçu et qui donne toute satisfaction en laboratoire, peut présenter des anomalies de fonctionnement, voire une dégradation partielle ou totale à la suite de phénomènes perturbateurs, tels que les surtensions ou l'absence momentanée de tension - microcoupures -.

La protection des matériels reliés aux réseaux électriques contre les surtensions provoquées par la foudre et les manoeuvres était auparavant assurée par de simples dispositifs appelés éclateurs à cornes, puis par des systèmes plus complexes associant un éclateur et des céramiques constituées de Carbone de Silicium (SiC). Actuellement, au niveau mondial, on observe une généralisation de l'utilisation des parafoudres plus simples constitués d'un empilement de céramiques, formées principalement de grains de ZnO. La simplification de l'architecture du parafoudre a conduit à une réduction de prix, une amélioration des performances électriques et de la fiabilité des dispositifs de protection [1-4].

Les excellentes caractéristiques de protection des parafoudres à ZnO permettent, entre autre, de reconsidérer la coordination des isolements des réseaux électriques [5,6], de diminuer le coût des appareils protégés, et d'améliorer la qualité du service [7,8].

I.1 PRINCIPAUX TYPES DE SURTENSIONS

Les lignes aériennes, les câbles et les appareils électriques sont très souvent exposés à des surtensions électriques transitoires, dangereuses pour le matériel électrique et pour la sécurité des personnes.

En général, l'amplitude des surtensions est inversement liée à leur durée ; les surtensions d'amplitude très élevées ont très souvent des durées courtes [9-11]. Ce qui est assez heureux, car l'isolement du matériel protégé supporte très souvent des tensions d'autant plus élevées que leur durée d'application est plus faible. Ces surtensions sont généralement classées :

- surtensions temporaires;
- surtensions de manoeuvre;
- surtensions de foudre.

Les surtensions temporaires

Ce sont des surtensions de basse fréquence, proches de la fréquence de service, avec des durées plus grandes qu'une période de la fréquence de service [12,13]. Elles sont généralement provoquées par le changement brusque de la configuration électrique du réseau: défauts entre une ou deux phases et la terre, rejet de la charge, fonctionnement à vide d'une ligne longue (effet Ferranti), alimentation d'une charge capacitive au travers d'une impédance élevée. Elles sont également dues à des événements tels que le phénomène de ferrorésonance ou par une simultanéité des facteurs précédents. Ces types de surtensions sont déterminantes pour le choix des parafoudres [13-15].

Les surtensions de manoeuvre

Elles sont essentiellement provoquées par la manoeuvre des disjoncteurs. Ces changements de configuration du réseau électrique créent des régimes transitoires complexes, accompagnés de surtensions plus ou moins élevées [13,16,17]: coupures des courants de lignes à vide, des câbles à vide ou des batteries de condensateurs; coupure des faibles courants inductifs ou magnétisants (transformateurs à vide ou chargés par inductances); mise sous tension des lignes. Elles sont de courte durée, inférieure à une période de la fréquence de service, avec une fréquence de l'ordre de 1 KHz à 100 KHz. Les surtensions les plus élevées sont produites par l'enclenchement et le réenclenchement des lignes à vide.

Les surtensions de foudre

Ces surtensions sont occasionnées par la chute de la foudre : directement sur la ligne, sur un support ou sur un fil de garde de la ligne; sur un poste ou sur le sol à proximité de la ligne. Elles peuvent atteindre des valeurs de plusieurs millions de volts [18,19], ou quelques centaines de kilovolts. Par exemple, lorsque la foudre tombe au voisinage d'une ligne, elle peut générer, par induction électromagnétique, des surtensions qui peuvent atteindre 200 kV dans un réseau de haute tension [20]. Leur durée est de quelques dizaines de microsecondes, avec un front de montée de l'ordre de la microseconde. Leurs fréquence est de 50 KHz à 1 MHz.

La figure I.1 montre, de manière approximative, la dépendance de l'amplitude de la surtension phase-terre (en p.u.) par rapport à la valeur crête phase-terre de la de service permanent.

Effets des surtensions sur le matériel

Les surtensions peuvent avoir des effets très néfastes sur la qualité du diélectrique utilisé pour le constructeur du matériel; ces effets sont l'accélération du vieillissement de l'isolant ou la dégradation de sa tenue diélectrique.

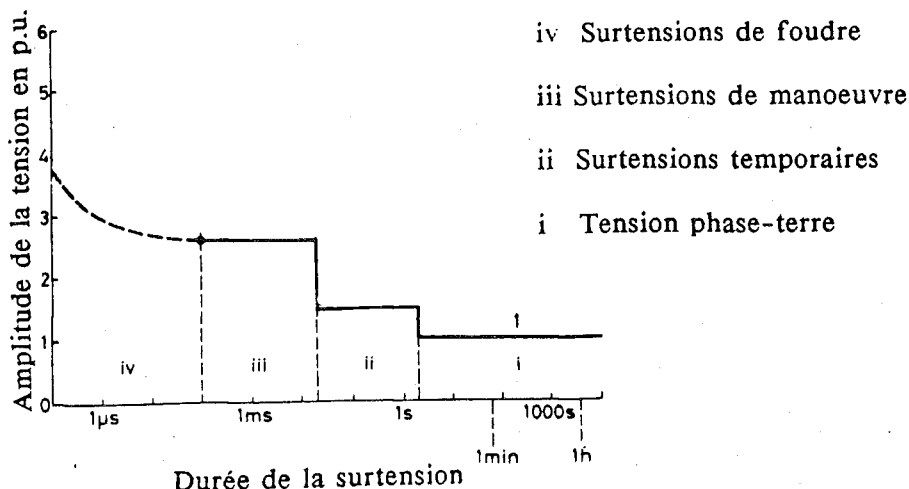


Figure I.1. Caractéristique Amplitude de la surtension .vs. durée.
1 p.u.= tension phase-terre [6].

Pour limiter les effets dus aux surtensions de foudre et de manoeuvre, on crée des points faibles dans l'isolement du réseau en des endroits choisis. Ces points sont les éclateurs et les parafoudres. Ils sont généralement placés aux bornes des transformateurs ou à l'extrémité des lignes et des câbles.

1.2 DISPOSITIFS DE PROTECTION UTILISES CONTRE LES SURTENSIONS

Le premier dispositif utilisé a été l'éclateur à cornes. Quelques années plus tard un dispositif plus complexe, associant en particulier des éclateurs et des céramiques à SiC, a été développé. Récemment, le développement des céramiques à base d'oxyde de zinc (ZnO) avec une caractéristique Tension - Courant fortement non linéaire a rendu possible la construction de parafoudres plus simples, constitués d'un empilement de varistances dépourvu d'éclateurs.

Afin de mettre en évidence les meilleures performances atteintes avec les parafoudres à ZnO, nous présenterons les caractéristiques du matériel de protection.

1.2.1 Les Eclateurs

Un éclateur est constitué essentiellement de deux électrodes séparées par un intervalle d'air, l'une reliée au conducteur ou à l'appareil à protéger et l'autre reliée à la terre (figure I.2). L'intervalle d'air est réglé pour s'amorcer si les surtensions dépassent le niveau de protection. La tension d'amorçage est toujours inférieure à la tension d'isolement de l'appareil protégé.

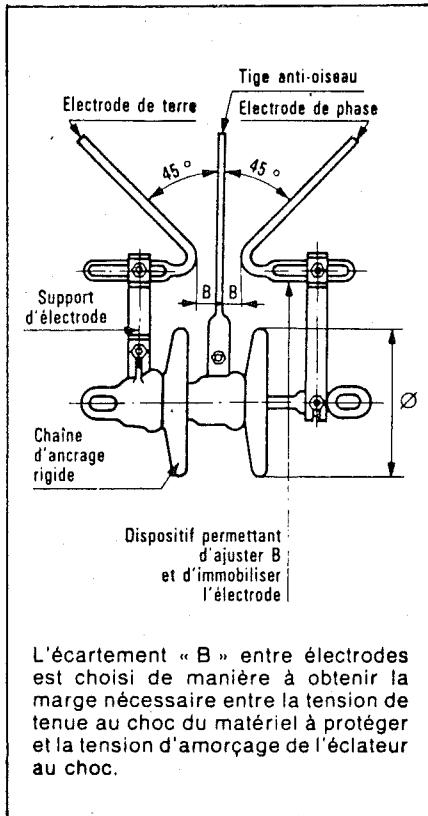


Figure I.2. Eclateur anti-oiseaux utilisé en Moyenne Tension [9].

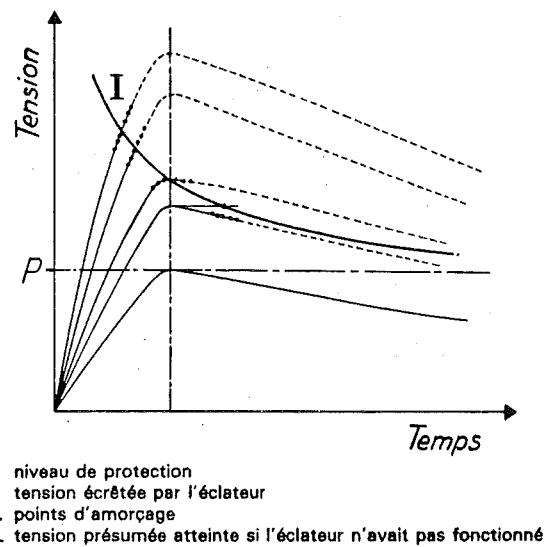


Figure I.3. Retard à l'amorçage d'un éclateur à une onde de choc de 1,2/50 μ s [9].

Le comportement des éclateurs est caractérisé par sa courbe $V(t)$, (figure I.3). Le niveau de protection est de l'ordre de 3,3 à 3,5 p.u (1 p.u = $V \sqrt{2} / \sqrt{3}$). Dans ces conditions, le niveau de tenue au choc de foudre des matériels est inférieur à 4 ou 4,5 p.u. [5].

Actuellement, existent en expérimentation des éclateurs autoextincteurs sur le réseau de distribution : ils ont la possibilité de couper le courant de suite de faible intensité (<400 A), et impliquent un coût modéré [7]. Malheureusement, ils ne permettent pas de

couper les défauts de fortes intensités (défauts polyphasés) et ils peuvent présenter des amorçages intempestifs analogues à ceux des éclateurs classiques.

L'éclateur est le plus simple, le moins coûteux et le plus ancien des moyens de protection. Malheureusement, il présente de nombreux inconvénients :

Inconvénients

- Malgré un réglage rigoureux, leur niveau d'amorçage est peu précis et très sensible aux conditions atmosphériques (température, humidité, pression...), à l'état d'ionisation de l'air et au temps de montée de la surtension appliquée.
- Un éclateur ne se désamorce pas spontanément et il donne lieu à un courant de suite. Pour l'extinction de ce courant, il nécessite le déclenchement du disjoncteur en tête de ligne. De ce fait, un éclateur ne peut pas être utilisé pour lutter contre les surtensions de manoeuvre.
- Ils sont sujet à des amorçages intempestifs, du fait des oiseaux, de la neige, de pailles...
- Ils sont réglés à un niveau de tension élevé pour éviter des amorçages intempestifs, d'où un niveau de protection élevé et un niveau d'isolement élevé du matériel protégé.
- Le déclenchement des disjoncteurs pour éliminer le courant de suite d'un éclateur provoque des coupures brèves de l'ordre de la seconde, nuisibles à la qualité du service.
- L'amorçage d'un éclateur provoque une onde coupée à front raide, susceptible d'endommager les enroulements du transformateur protégé, ou tout circuit bobiné proche.

1.2.2 Les Parafoudres à SiC

Un parafoudre à SiC est constitué par des résistances non linéaires au SiC en série avec des éclateurs (figure I.4). Lorsque la tension dépasse le niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les résistances. Lorsque la tension augmente, les valeurs de ces résistances diminuent rapidement et limitent ainsi la surtension [21]. Une fois la tension revenue à la valeur

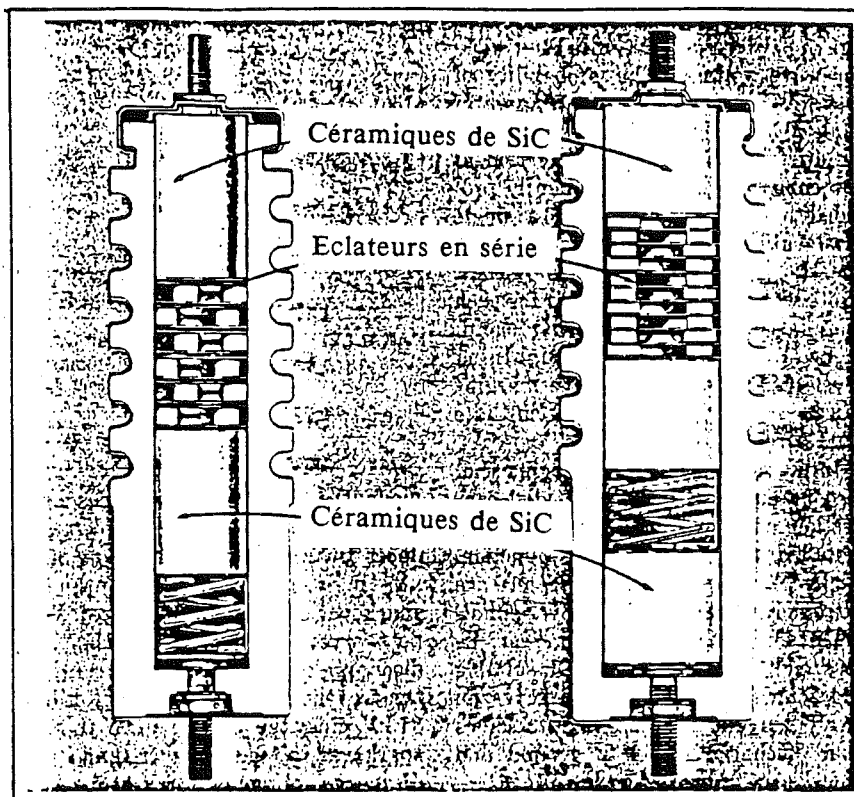


Figure I.4. Parafoudre à SiC utilisé dans le réseau de distribution [21].

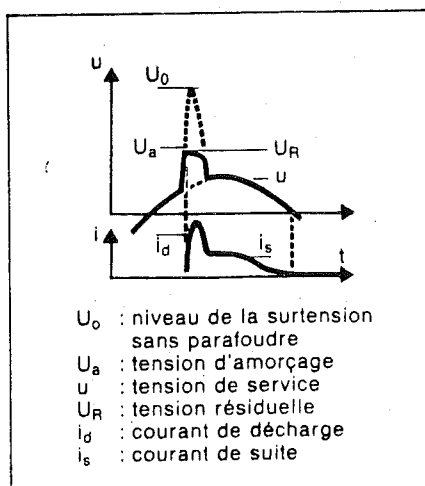


Figure I.5. Fonctionnement typique d'un parafoudre à SiC [9].

normale du réseau, le courant est limité à une faible intensité et peut être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro (figure I.5). En THT le désamorçage du parafoudre est facilité par le champs magnétique des bobines associées aux éclateurs.

Les performances d'un parafoudre à SiC peuvent se traduire par le rapport :

Valeur crête de la tension la plus faible
produisant l'amorçage (foudre)

Valeur efficace de la tension d'extinction

Ce rapport est de l'ordre de : 3,2 pour les parafoudres MT (sans bobines de soufflage) et de 2,3 pour les parafoudres HT [5].

Cet ensemble présente certains avantages par rapport à l'éclateur de protection :

Avantages

- Elimination du défaut sans l'intervention des protections.
- La présence des résistances en série avec les éclateurs empêche l'apparition d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.
- Les contraintes atmosphériques sont éliminées car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).
- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour les surtensions à front raide.
- De par sa construction, un parafoudre à SiC peut limiter les surtensions de manoeuvre (particulièrement en THT), ce qui se traduit par une diminution du niveau de protection par rapport a celui obtenu avec des éclateurs.

Inconvénients

- Les céramiques à SiC supportent très mal un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une tension temporaire; l'énergie qu'il aurait à dissiper provoquerait sa destruction.

- Pour le fonctionnement correct des parafoudres, il faut que la tension appliquée soit uniformément répartie entre les éclateurs. On fait face à ce problème par des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui fait augmenter le prix de l'appareil et le rend plus complexe et moins fiables.

1.2.3 Les Parafoudres à ZnO

Ils sont constitués d'un empilement en série ou en parallèle des varistances ZnO dépourvu d'éclateurs (figure I.6). La suppression des éclateurs a été rendue possible grâce à la forte non linéarité de la caractéristique $V(I)$ des varistances (figure I.7). N'étant pas munis d'éclateurs, les varistances sont parcourues par un courant à la tension de service. De par sa forte non linéarité le courant de fuite qui en résulte est très faible (< 1 mA), l'échauffement produit par ce courant ne met pas en danger le fonctionnement normal du parafoudre.

Dans la zone des faibles courants, la caractéristique $V(I)$ présente un coefficient de température négatif (la résistance électrique diminue avec l'élévation de la température) qui même s'il n'agit pas sur le niveau de protection, peut influencer à long terme sa durée de vie.

Les parafoudres à ZnO présentent de nombreux avantages par rapport aux parafoudres à SiC :

Avantages

- Ils sont capables d'absorber des courants de forte intensité tout en maintenant une tension à leurs bornes beaucoup plus faible que celle des parafoudres à SiC.
- Grâce à leur architecture, il est possible de les utiliser dans des différents milieux [22]: SF6, air, isolants solides...
- En général, la surface des varistances est d'environ la moitié de celle des SiC pour fournir la même protection.

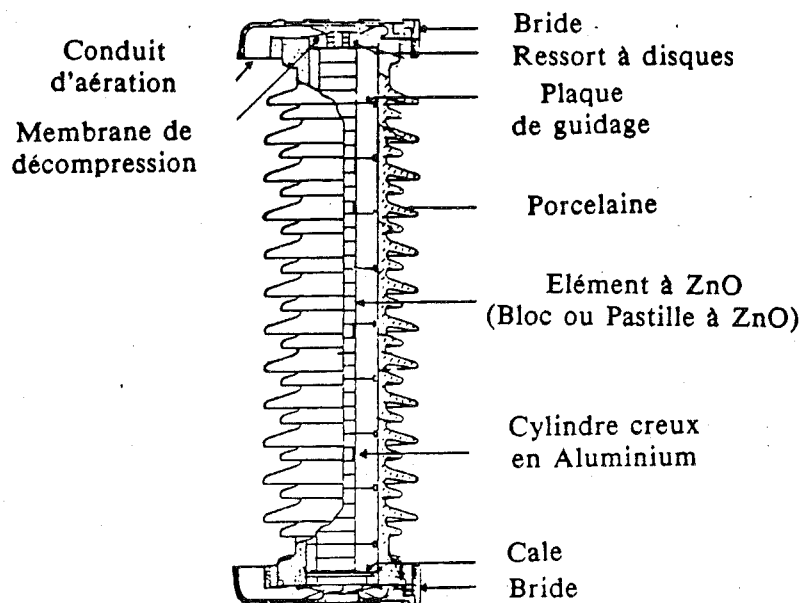


Figure I.6. Parafoudre à ZnO

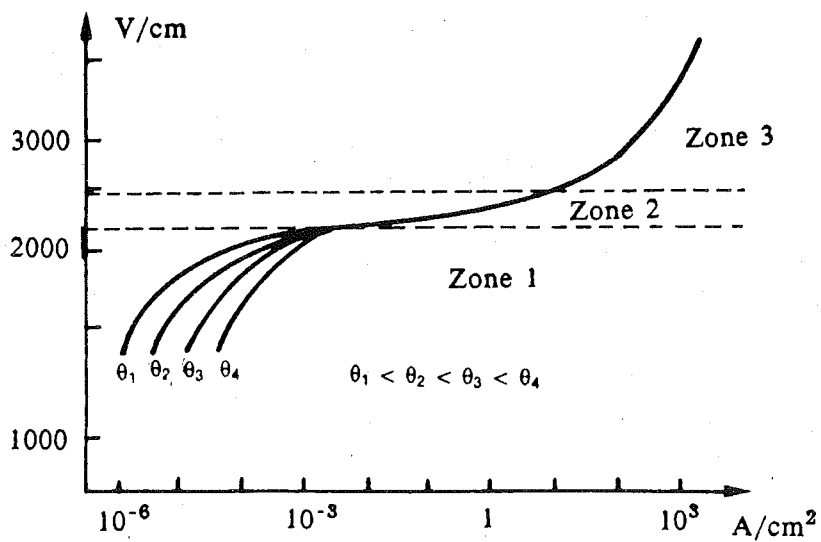


Figure I.7. Caractéristique V .vs. I typique d'une céramique à ZnO

- Etant donné les meilleures caractéristiques de varistances, et de par leur plus simple construction, les parafoudres à ZnO sont plus compacts que les parafoudres conventionnels.
- Les parafoudres à ZnO ne sont pas soumis aux limitations introduites par les éclateurs. Par exemple la probabilité de décharges inattendues dues à la contamination des éclateurs est inexistante.
- La puissance instantanée dissipée par un parafoudre à ZnO peut être multipliée avec l'utilisation de plusieurs unités en parallèle [22-24].
- Meilleure stabilité des caractéristiques électriques des céramiques de ZnO après absorption des chocs énergétiques de très fort courant (quelques dizaines de nanosecondes).
- Excellente réponse aux ondes de front raide, obtenue par l'élimination des éclateurs et le faible temps de réponse des céramiques de ZnO. Cependant, pour des ondes à front très raide (< 100 ns) des études sont actuellement menées pour étudier l'influence de l'inductance propre du parafoudre.
- La dispersion de la caractéristique $V(I)$ des céramiques de ZnO est inférieure à celle des céramiques à SiC (dans un rapport de 1 à 5, [1]).
- Tension résiduelle beaucoup plus faible par rapport à celle des parafoudres à SiC.
- Meilleure protection des réseaux souterrains [25,26].
- Possibilité de les utiliser dans des conditions de forte pollution grâce à un lavage sous tension [27].
- L'écrêtement des surtensions à des valeurs plus faibles par les parafoudres à ZnO se traduit par une meilleure protection du matériel.

Inconvénients

- L'ensemble de ces avantages se traduit par un coût élevé par rapport aux éclateurs. Comparés aux parafoudres conventionnels, ils sont plus économiques en THT qu'en MT.
- Dans la zone des faibles courants, la caractéristique $V(I)$ des varistances présente un coefficient de température négatif. Une augmentation de température provoque une

augmentation de la puissance consommée. Une élévation excessive de la température ambiante pourrait même, dans certaines conditions, conduire à la défaillance thermique du parafoudre.

- La caractéristique électrique peut se dégrader du fait de l'absorption de courants très élevés (coup de foudre). Ceci se traduit par une élévation de l'échauffement à sa tension de service et par une diminution de sa capacité d'absorption des chocs d'énergie. Cette dégradation peut entraîner l'emballement thermique dans des conditions normales de fonctionnement.

1.3 ROLE DES PARAFONDRES SUR LA COORDINATION DES ISOLEMENTS

La coordination des isolements consiste à prendre une série de mesures afin d'empêcher des dommages sur le matériel électrique dus aux surtensions, et de localiser les amorçages (écoulement à terre des surtensions) en des points choisis où ils ne produiront aucun dommage.

Dans la pratique, la coordination consiste à effectuer des corrélations entre la rigidité diélectrique du matériel et les surtensions possibles, ainsi qu'avec les caractéristiques des appareils limiteurs de tension (éclateurs et parafoudres). Les conséquences d'un incident sur les isolements sont alors réduites à un niveau de probabilité acceptable.

Dans cette optique, les risques de défaillance doivent être pratiquement nuls pour les transformateurs et très faibles pour l'isolation d'un jeu de barres d'un poste, où les conséquences d'un contournement sont graves. En revanche, un contournement accidentel peut être toléré sur la ligne d'un réseau fortement maillé, surtout si la technique du réenclenchement rapide est utilisée. Un facteur qui intervient ici est par exemple la qualité du service exigé par un abonné donné.

Les excellentes caractéristiques de limitation des surtensions obtenues avec les parafoudres à ZnO permettent de diminuer les surtensions à des niveaux nettement inférieurs à ceux obtenus avec les dispositifs conventionnels (éclateurs et parafoudres à

SiC). Par exemple, dans le réseau français à 225 kV, protégé actuellement par des éclateurs, les transformateurs pourraient bénéficier d'une diminution de leur tenue au choc de 900 kV à 500 kV avec l'utilisation des parafoudres à ZnO [5], voir tableau I. Cette diminution du niveau d'isolement entraînerait une économie considérable sur le prix des transformateurs.

Dans l'analyse de la coordination des isollements il est nécessaire de tenir compte de toutes les surtensions que le matériel est susceptible de supporter, et en particulier les surtensions de foudre et de manoeuvre. Dans ces conditions, les bonnes limitations de tension phase-terre obtenues avec les parafoudres à ZnO pourraient avoir un effet négligeable sur les surtensions phase-phase, car elles peuvent avoir des amplitudes similaires et des polarités opposées. Il en résulterait une tension phase-phase égale à deux fois la surtension phase terre [6].

1.4 ROLE DES PARAFOUDRES A ZnO SUR LA QUALITE DU SERVICE

La distribution de l'énergie électrique doit être réalisée dans un souci de qualité, afin de donner pleine satisfaction aux exigences de tous les usagers de l'électricité.

La qualité de service est souvent définie par :

- la qualité du réglage de la fréquence et de la tension
- les anomalies dans la forme et l'amplitude des surtensions
- la continuité du service
- les creux de tension et les coupures brèves

L'amélioration que les parafoudres à ZnO peuvent apporter sur la qualité de service réside principalement dans le dernier point cité ci-dessus.

Actuellement, les réseaux aériens français, jusqu'à 225 kV, sont normalement protégés contre les surtensions atmosphériques par des éclateurs. Ces dispositifs, ainsi que le réseau lui même sont sensibles aux contraintes climatiques et aux éventuels agents externes, nuisibles à la qualité de service. Ils sont souvent le siège des défauts de très courte durée (défauts fugitifs), se traduisant par des coupures brèves. Ces coupures sont

Tableau I

Coordination des isolements dans le réseau de 225 kV [5]

I - SITUATION ACTUELLE

PARAFOUDRE SiC	Tension nominale Niveau de protection U_p	246 kVeff 615 kV
ECLATEUR	Niveau de protection U_e	600 kV
TRANSFORMATEUR	Tenue au choc U_T	900 kV
	Marge U_T/U_p	1,46
	U_T/U_e	1,5

II - AVEC PARAFOUDRES ZnO

PARAFOUDRE ZnO	Tension nominale Niveau de protection U_p	192 kVeff 450 kV
TRANSFORMATEUR	Tenue au choc U_T	550 kV*
	Marge U_T/U_p	1,22

* Valeur normalisée CEI

le résultat d'un fonctionnement des automatismes d'enclenchement-réenclenchement des disjoncteurs.

Une étude menée par l'E.D.F, entre 1982 et 1984 sur les réseaux ruraux de moyenne tension [7], a permis de connaître la répartition des défauts selon leur forme et leur nature. Ils sont classés par leur forme en :

- monophasés
- polyphasés

et par leur nature en :

- défauts fugitifs : élimination du défaut par le premier cycle de déclenchement-réenclenchement rapide, entraînant une coupure du service de quelques secondes.

- défauts semi-permanent : élimination du défaut par un ou plusieurs cycles lents, coupure du service de quelques secondes.

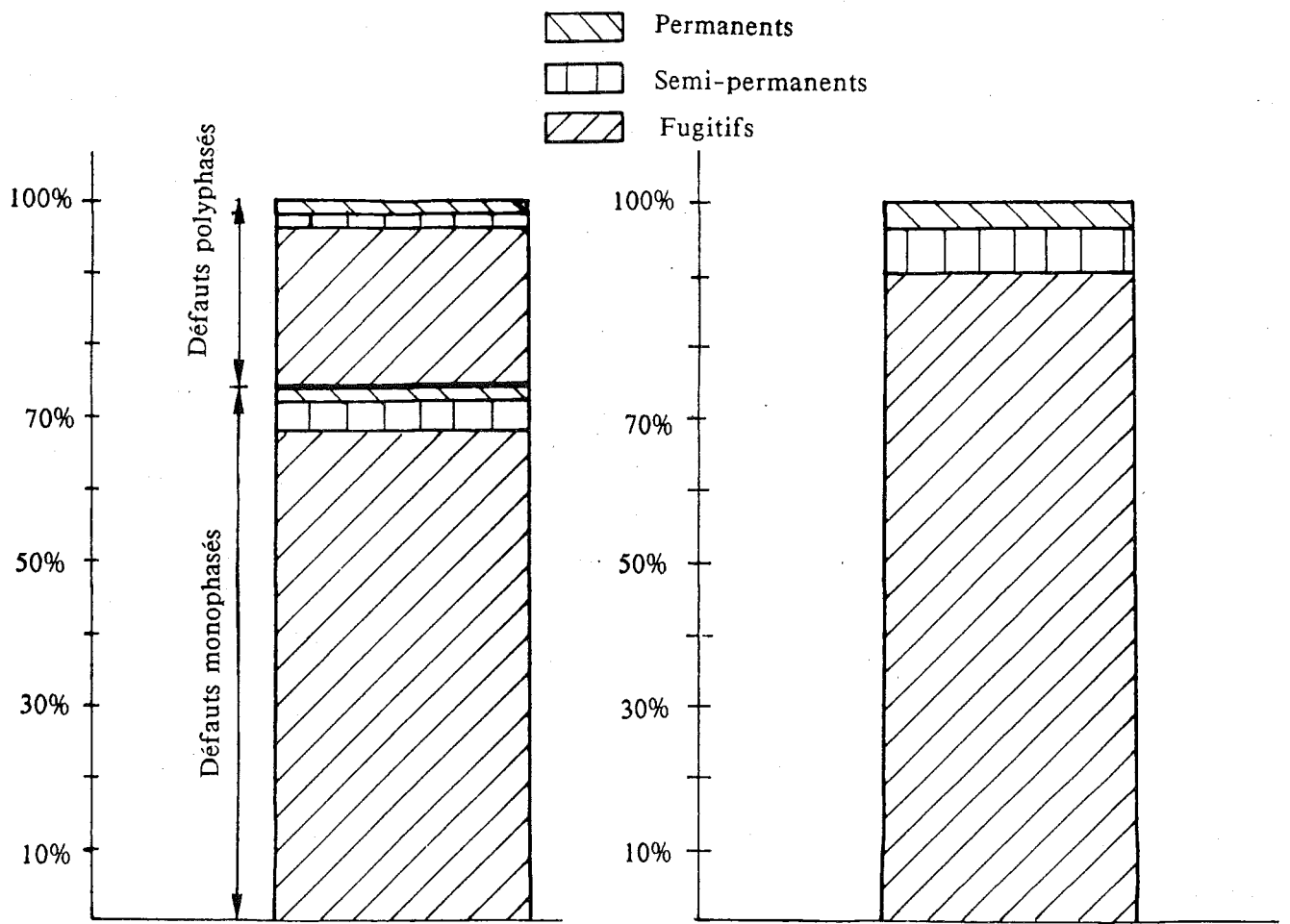
- défauts permanents : non éliminés par les cycles de réenclenchements. Le disjoncteur se déclenche définitivement et l'intervention humaine est nécessaire pour la reprise du service.

De cette étude il résulte que 68% de défauts observés se produisent entre une phase et la terre et, seulement 22% sont polyphasés (figure I.8). 50 % de l'ensemble des défauts sont imputés aux éclateurs. D'autre part, les orages sont responsables de 50% des défauts (dont 75 % provoquent le fonctionnement des éclateurs).

Pour faire face à ce problème plusieurs solutions sont envisagées, parmi lesquelles l'utilisation des parafoudres à ZnO associés à des disjoncteurs shunt. En effet, cette association apporte une nette amélioration de la qualité de service :

- diminution du nombre de coupures brèves
- diminution du nombre de coupures permanentes
- diminution du risque de la montée en potentiel des installations voisines.

Les coupures brèves sont provoquées essentiellement par des défauts dits fugitifs : le cycle déclenchement-réenclenchement rapide du disjoncteur MT pour éliminer le courant de suite aux bornes des éclateurs entraîne une coupure du service de l'ordre de 0,3 sec.



a) Répartition des défauts selon leur forme et nature

b) Répartition des défauts selon leur nature

Figure I.8. Répartition des défauts observés dans un réseau rural de moyenne tension [7].

La suppression des éclateurs (et donc l'utilisation de parafoudres) diminuerait de plus de 50% le nombre de ces défauts [7,8].

Les coupures permanentes sont dues principalement à des contraintes externes (oiseaux, pailles, neige polluée...) sur les éclateurs. Il est évident que les parafoudres apporteraient une solution à ce problème, grâce leur architecture.

Le fonctionnement d'un éclateur entraîne la montée en potentiel des masses locales et des prises de terre. Cette montée en potentiel peut atteindre quelques kilovolts par rapport à d'autres prises de terre (ex. circuits téléphoniques, circuits de BT reliés à la prise de terre du neutre...). Cette élévation de tension est l'une des principales causes des avaries du matériel des PTT. Le remplacement des éclateurs par des parafoudres entraînerait une forte diminution de la durée de la montée en potentiel. En effet, après le passage de la surtension de foudre, les parafoudres limitent rapidement le courant de fuite à des valeurs très faibles (<1mA); de ce fait, la durée de la montée en potentiel provoquée par le courant écoulé à terre est fortement réduite.

CONCLUSION

Les trois dispositifs limiteurs des surtensions évoqués dans ce chapitre correspondent à une protection d'efficacité croissante :

- les éclateurs sont réglés pour s'amorcer lors de l'apparition d'une surtension de foudre. Ils ne protègent pas contre les surtensions de manoeuvre, ni contre les surtensions temporaires.
- les parafoudres à SiC sont capables de protéger le matériel contre les surtensions de foudre et de manoeuvre, mais ils ne doivent jamais fonctionner pour des surtensions temporaires.
- les parafoudres à ZnO, de par leur architecture, sont capables de supporter des surtensions temporaires (sans protéger le matériel). Ces surtensions permettent de choisir la tension assignée du parafoudre et par conséquent un niveau de protection plus faible. Ils offrent une protection efficace contre les surtensions de foudre et de manoeuvre; le

gain obtenu sur le niveau de protection permet d'envisager une diminution de la coordination des isolements du matériel protégé, surtout sur les transformateurs utilisés en THT.

D'autre part, les parafoudres offrent une réelle alternative pour l'amélioration de la qualité de service des réseaux électriques protégés actuellement par des éclateurs. Par exemple, le remplacement des éclateurs, utilisés dans les réseaux aériens de moyenne tension, par des parafoudres associés à des disjoncteurs shunt permettrait de supprimer jusqu'à 90% des coupures brèves constatées sur ces réseaux [7].

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES PARAFONDRES A ZnO

Introduction

Le premier article publié sur les varistances ZnO est paru en 1969 [28]. Depuis, d'énormes efforts ont été réalisés afin d'améliorer leurs caractéristiques électriques et thermiques, jusqu'à les rendre plus stables durant leur fonctionnement. Actuellement, grâce à leurs excellentes caractéristiques électriques, leur facilité d'implantation et leur prix compétitif, l'utilisation des parafoudres se développe de plus en plus de la TBT à la UHT [1,4,29]. Aujourd'hui, aucun argument théorique ne permet d'affirmer que ces composants ont atteint leur limites d'utilisation.

II.1 LES CERAMIQUES DE ZnO

L'élément fondamental d'un parafoudre sont les céramiques de ZnO, la maîtrise de leurs caractéristiques électriques et thermiques a permis de construire des parafoudres plus performants. Dans les paragraphes qui suivent, nous donnerons leurs principales caractéristiques, ainsi que leur processus de fabrication.

II.1.1 Processus de fabrication

Les céramiques de ZnO sont fabriquées par des techniques qui consistent à mélanger et broyer des matières premières, les granuler à l'aide d'un liant et à en presser des disques, frittés à des températures de l'ordre de 1100 à 1400°C [30,31] (voir figure II.1). Les céramiques ainsi obtenues sont constituées d'environ 90% de grains semi-conducteurs

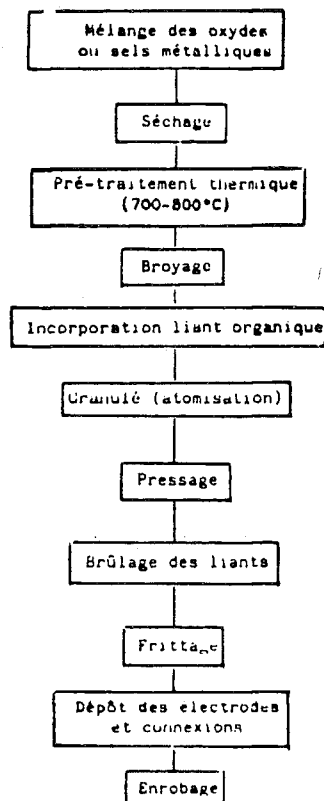


Figure II.1. Processus de fabrication des céramiques de ZnO [29].

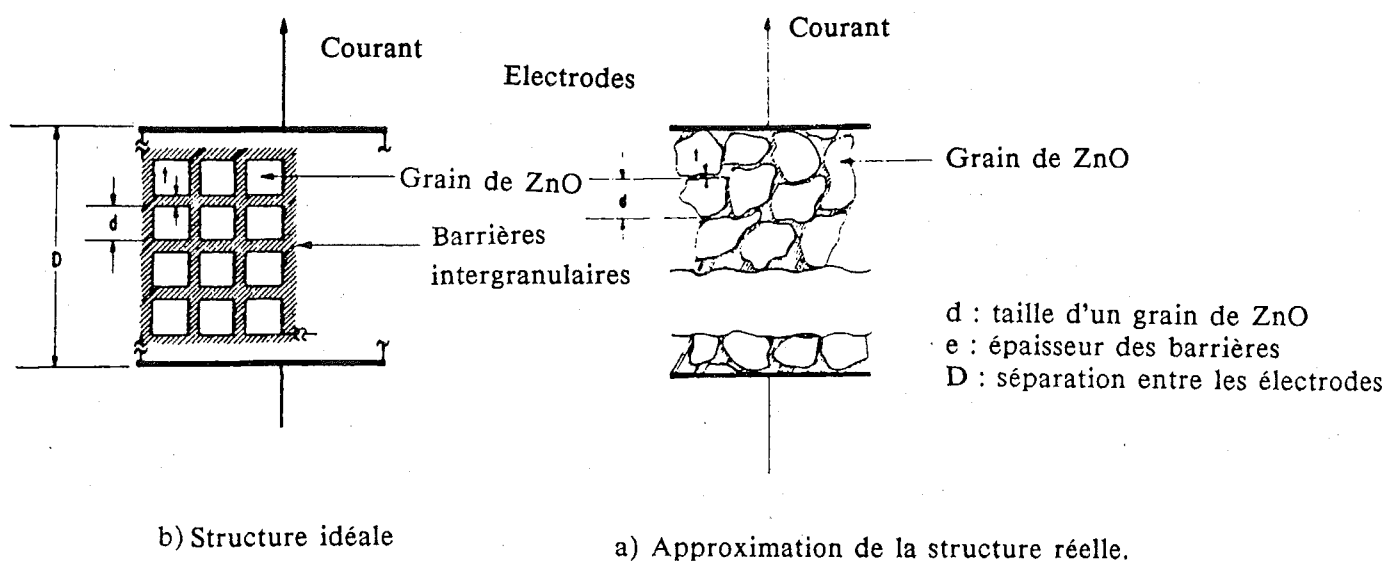


Figure II.2. Microstructure des céramiques de ZnO [33].

(type n) à oxyde de zinc de conductivité très élevée (de l'ordre de $10 (\Omega\text{cm})^{-1}$) et de taille homogène (d'un diamètre moyen d'environ $20\mu\text{m}$), séparés par des interfaces fortement isolants (figure II.2). Ces interfaces déterminent les propriétés non-linéaires des céramiques [32-34]. Dans le tableau I sont donnés les principaux éléments qui constituent les interfaces ainsi que leur influence sur les propriétés électriques des céramiques [29].

Tableau I. Influence des principaux dopants et structures sur les propriétés électriques des varistances [29].

Nature des dopants ou de la structure	Action
Bi, Pr, Ba, Nd	Formation de l'effet varistance
Co, Mn, Ni, Al, Sn	Amélioration de l'effet varistance
Sb, Cr, Ni	Stabilité des caractéristiques électriques
Verre	Stabilité des caractéristiques électriques
Structure spinelle	Contrôle de la croissance des cristallites
Structure pyrochlôre	Sans
Bi_2O_3 (α , β , γ , δ)	Stabilité des caractéristiques électriques

• Fabrication des céramiques destinées à la haute tension

Dans le processus de fabrication des céramiques destinées à la HT, on cherche à diminuer la taille moyenne des grains de ZnO par des techniques de frittage non conventionnelles (ex. frittages sous charge) appliquées à des poudres extra-fines [35-37], afin d'augmenter la tension de seuil par mm des pastilles (de l'ordre de 220 V/mm). Mais, cette diminution doit tenir compte, en outre, de la surface des grains de ZnO et des interfaces : une diminution de leur surface entraînerait une dégradation de l'effet de non-linéarité; inversement, l'oxydation de cette interface entraînerait un renforcement de ce même effet [30].

• Fabrication des céramiques destinées à la basse tension

Dans la BT, on cherche à augmenter la taille des grains [38-42] et à mieux contrôler l'homogénéité de la répartition des interfaces actives par des méthodes telles que le dépôt en couches minces ou épaisses, les techniques d'imprégnation, le spullering [43-46]. La diminution de l'épaisseur affaiblit la capacité de dissipation d'énergies élevées, d'autre

part, le petit nombre de grains de ZnO concernés (de faible épaisseur) augmente la possibilité de rencontrer des interfaces inactives, de sorte que la non-linéarité diminue.

II.1.2 Propriétés électriques

D'un point de vue électrique, les céramiques se définissent par la caractéristique $V(I)$, la capacité, les pertes électriques, le temps de réponse, leur tenue aux perturbations transitoires, leur tenue sous contraintes électriques et thermiques.

• Caractéristique $V(I)$

Une céramique de ZnO est un composant bidirectionnel dont la caractéristique $V(I)$ présente trois zones de fonctionnement (voir figure I.7).

Dans la zone I la céramique présente une résistance très élevée (de l'ordre de $10^9 \Omega$), avec un comportement du type ohmique et très dépendante de sa température. α_1 varie entre 1 et 30 lorsque la tension augmente de 0 à la valeur seuil. En régime alternatif, la permittivité relative apparente est de l'ordre de 1000. Le courant qui traverse le parafoudre de manière permanente est nettement inférieur au milliampère et il a une forme similaire à celle indiquée dans la figure II.3.

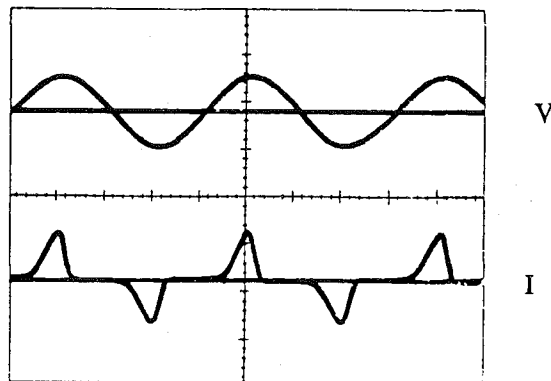


Figure II.3. Courant qui traverse le parafoudre à ZnO en régime permanent sous une tension alternative. V : Tensions au bornes du parafoudre, I : Courant résistif qui traverse le parafoudre [55].

Au delà de sa tension de seuil (zone II), son comportement est beaucoup moins sensible à la température : la tension et le courant peuvent être reliés par l'équation

$I=KV^{\alpha_1}$. Dans les céramiques conventionnelles, α_1 varie entre 30 et 70 ; des valeurs de 150 sont possibles actuellement dans des échantillons de laboratoire. Dans cette zone apparaît un comportement partiellement inductif [70].

La zone III est la zone de faibles courants, la caractéristique tend à devenir ohmique, la résistance est de l'ordre de 1 - 10 Ω . Les zones II et III représentent la caractéristique de protection proprement dite.

Dans la région de faibles courants, le courant de fuite en alternative est plus grand que celui en continu, mais la caractéristique alternative est moins dépendante de la température (figure II.4). L'influence de la température sur le courant capacitif est très faible.

• Relation entre les dimensions d'une céramique et ses caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques et thermiques d'une céramique sont déterminées par sa structure chimique et physique. Ses dimensions nous donnent une idée de la tension, du courant et de l'énergie qu'elle peut absorber :

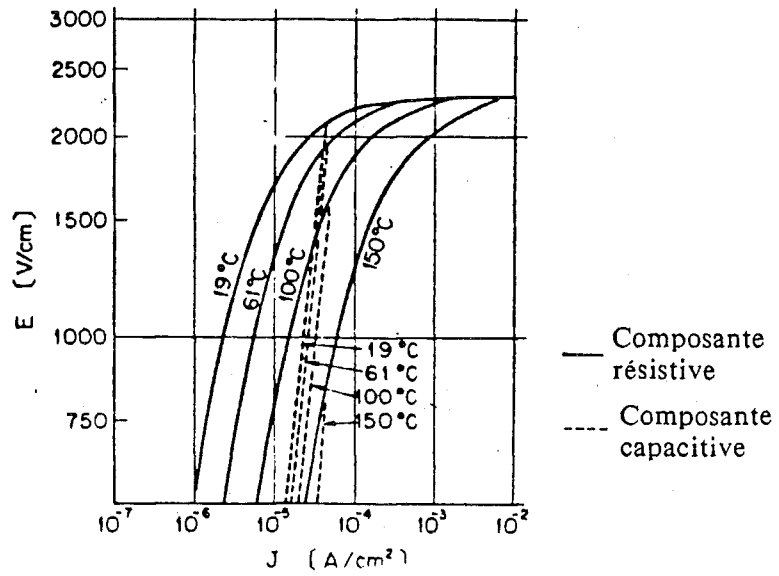
- la tension aux bornes de la céramique est proportionnelle à son épaisseur ;
- le diamètre est proportionnel au courant de choc admissible ;
- le volume est proportionnel à l'énergie qu'il est capable d'absorber.

• Tension de seuil d'une céramique

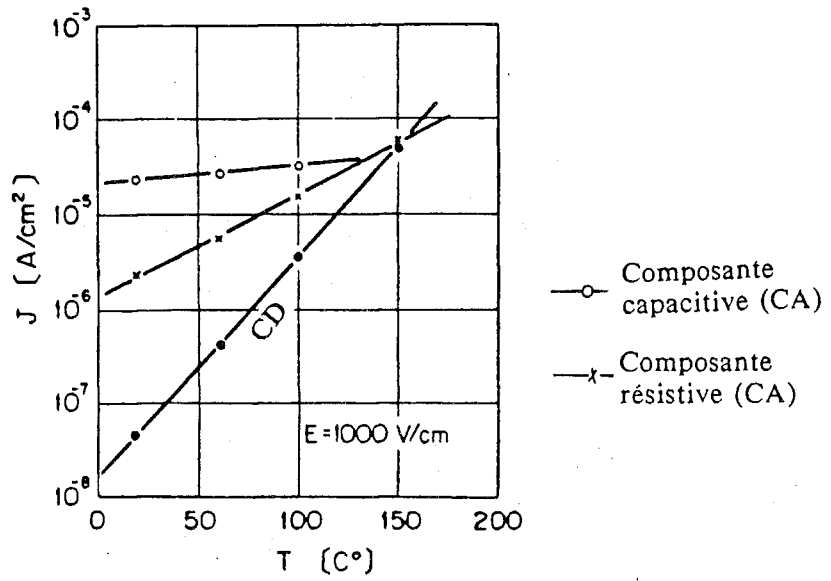
La chute de tension observée sur chaque joint de grain de ZnO est de l'ordre de 3 à 3,6 Volts sous un courant de 1mA/cm² [32,38], et semble être peu dépendante de la nature de la concentration en oxydes additifs. La tension aux bornes de la céramique sous un courant de 1 mA, appelée tension de seuil V_s , est donnée par :

$$V_s = 3N = 3 e_z/d \quad (2.1)$$

où N est le nombre de jonctions, e_z est l'épaisseur de la céramique et d est le diamètre



a) Effet de la température sur le courant de fuite, sous une tension alternative.



b) Dépendance en température du courant de fuite en CA et en CD.

Figure II.4. Influence de la température sur le courant de fuite [3].

moyen des grains de ZnO. Par exemple, pour une céramique de 1mm d'épaisseur dont le diamètre moyen des grains de ZnO est de 20 μm , sa tension de seuil V_g est de 150 Volts.

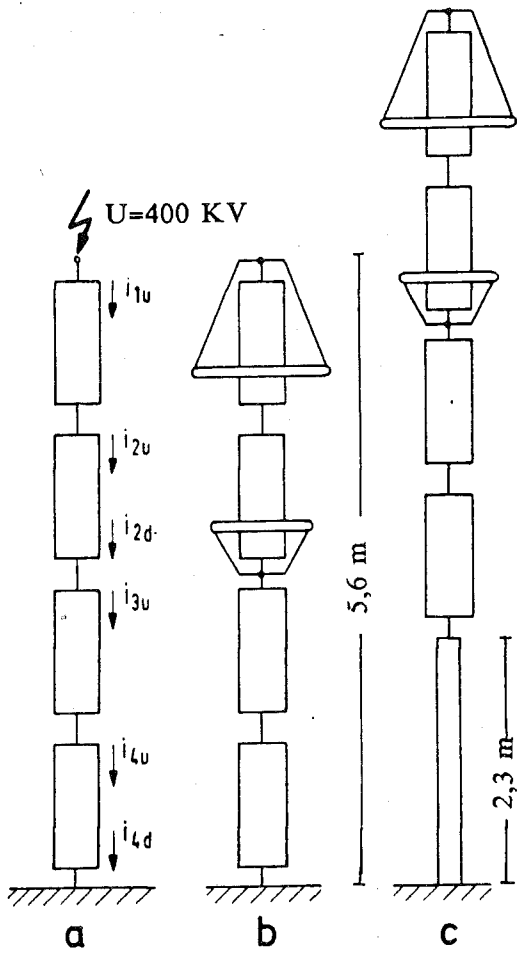
II.1.3 Comportement des céramiques lors des impulsions très rapides

Les impulsions très rapides sont observées par les céramiques d'une manière capacitive, ensuite la chaleur est dissipée à travers la résistance du matériel sur des temps plus longs. Cette caractéristique de capacité et résistance dans le temps est essentiellement constante pour des tensions supérieures à la tension de coude [58].

II.1.4 Répartition de tension sur la colonne de ZnO

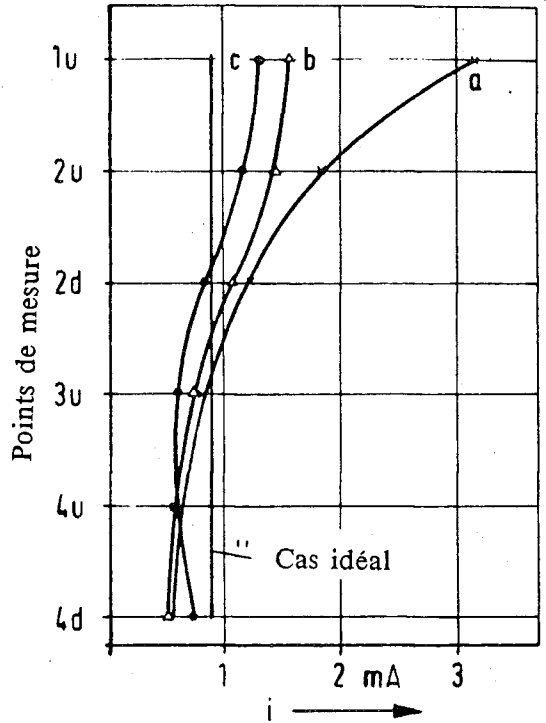
Les céramiques de ZnO se comportent électriquement comme des condensateurs raccordés en série. Les capacités parasites par rapport à la terre provoquent une distorsion de la répartition de la tension par rapport à la répartition linéaire avec un effet plus important sur les céramiques situées au sommet du parafoudre. Cette dérive de la tension est influencée par des facteurs tels que : la hauteur du parafoudre, le nombre et la longueur des unités en série et les anneaux de garde. La répartition de tension se rapproche très fortement de la répartition linéaire quand la composante résistive du courant augmente avec la température des céramiques [59].

Dans les parafoudres THT composés de plusieurs unités, les capacités parasites à la terre sont élevées, ce qui provoque une répartition de tension et de courant asymétrique [76] (figure II.5). Pour obtenir une répartition plus uniforme on utilise des anneaux de garde et on augmente aussi la distance à la terre du parafoudre.



- a) Sans anneaux de garde
- b) Avec anneaux de garde
- c) Avec anneaux de garde et installé sur un support de 2,3 m de hauteur.

1) Structure du parafoudre



- 2) Courant de fuite mesuré sur chaque point de mesure pour les structures a,b et c.

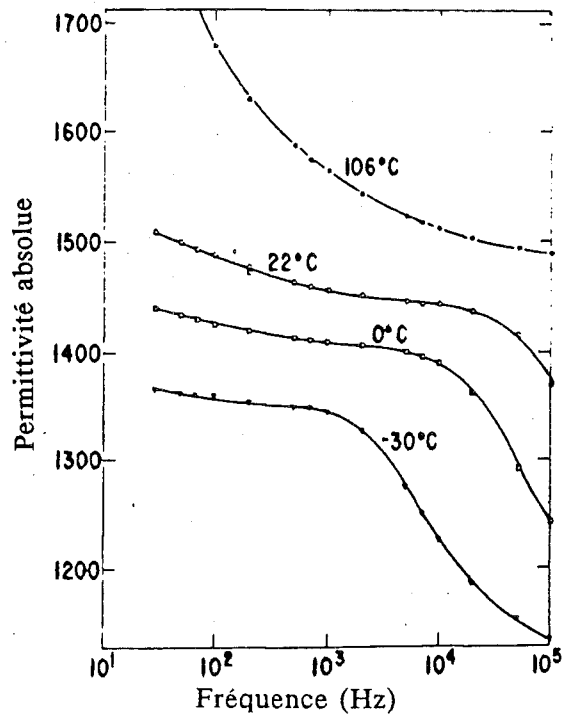
Figure II.5. Répartition du courant sur un parafoudre à ZnO de THT constitué de 4 unités. Chaque unité contient 56 céramiques de ZnO [76].

II.1.5 Caractéristiques générales des céramiques de ZnO

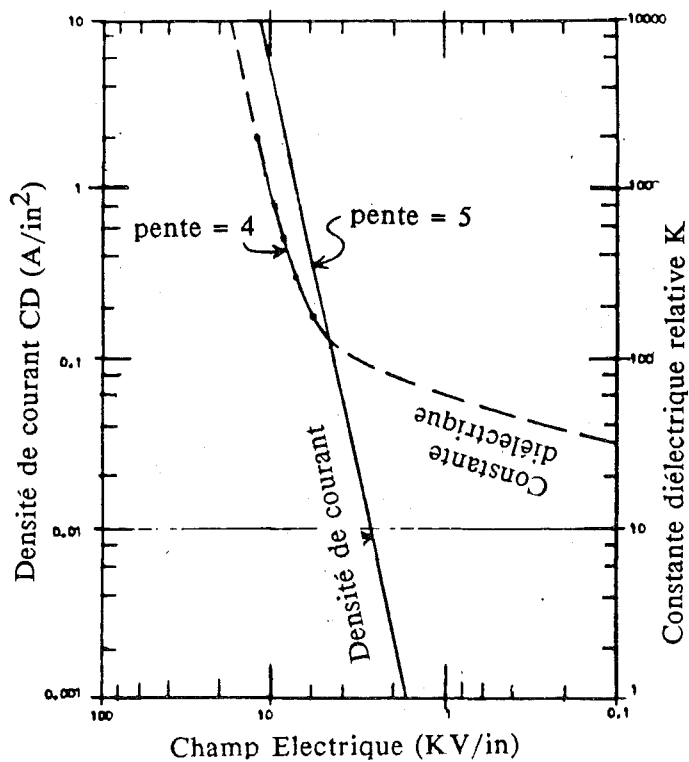
Les principaux paramètres qui déterminent, en général, les caractéristiques électriques et thermiques des céramiques de ZnO ont été rassemblées dans le Tableau II.

Tableau II. Caractéristiques des céramiques à ZnO

<u>PARAMETRES</u>		
Polarité	bipolaire	[34]
Grains à ZnO	semi-conducteur type N	[34]
Tension Nominale	10 - 8000 V	[29]
Courant de crête	100 KA	[29]
Courant de repos	1 - 100 μ A	[29]
Température maximale de fonctionnement	85°C	[29]
Energie d'activation	0,5 eV	[70]
Barrière de pôles	3 - 3,5 V	[38]
Constante diélectrique	(voir figure II.6)	[35]
Tension	\approx 220 V/mm	[29]
Valeur de capacité	50 - 10000 pF	[29]
Coefficient de température	-0,05% par °C	[71]
Temps de réponse	< 10 ns	[29]
Pouvoir d'absorption	jusqu'à 400 J/cm ³	[51]
α_1	25 à 80	[34,70]



a) Constante diélectrique en fonction de la fréquence



b) Constante diélectrique relative et densité du courant continu (CD) en fonction du champ électrique E.

Figure II.6. Constante diélectrique d'une varistance [35].

II.2 EXIGENCES DEMANDEES AUX PARAFONDRES ET LEURS CAUSES PRINCIPALES DE DEFAILLANCE

• Exigences principales demandées aux parafoudres

L'utilisation des parafoudres à ZnO dans les réseaux électriques est justifiée, s'ils apportent un "plus", tant du point de vue électrique qu'économique, par rapport aux moyens de protection existants. Dans cette optique, nous pouvons résumer en quatre points les principales exigences demandées à un parafoudre :

- 1.- Améliorer la protection des installations contre les surtensions de foudre et de manoeuvre.
- 2.- Pouvoir servir de nouveau après une onde de choc
- 3.- Avoir une durée de vie moyenne de plus de 40 ans
- 4.- Leur utilisation doit amortir leur coût

• Causes de défaillance des parafoudres à ZnO

La cause principale de défaillance d'un parafoudre à ZnO est l'emballement thermique. L'apparition de ce phénomène peut se manifester de plusieurs façons :

- Destruction immédiate du parafoudre par perforation ou par contournement des pastilles lors de surtensions très importantes
- Augmentation de la puissance consommée sous sa tension de service permanent, provoquée par l'absorption de courants très élevés.
- Le vieillissement des céramiques provoque aussi une élévation de la puissance consommée en régime permanent.
- La pollution
- La dégradation d'une ou de plusieurs céramiques qui constituent le parafoudre peut conduire à un emballement thermique.

II.3 L'EMBALLLEMENT THERMIQUE

Quant une tension alternative ou continue est appliquée continuellement au parafoudre le courant de fuite qui traverse les céramiques provoque un échauffement, augmentant la température des céramiques. Si la tension appliquée est en dessous d'un certain seuil la température des pastilles atteint un point d'équilibre : la chaleur générée par les pertes est en équilibre avec la chaleur dissipée par le parafoudre vers l'air ambiant. Cependant, si la tension appliquée dépasse ce seuil, le courant et la température n'ont pas de point d'équilibre, et ils augmenteront continuellement jusqu'à la destruction de l'appareil. Ce phénomène est appelé "emballement thermique" [47].

Quand un parafoudre est branché à un réseau électrique, le courant résistif est inférieur à 1mA. Cependant, quand il absorbe des chocs d'énergie, la température des céramiques augmente, leurs résistances diminuent, le courant augmente et de ce fait la chaleur générée également. Si l'élévation de température produite par le choc d'énergie est inférieure à une certaine limite (cf.II.4) la chaleur dissipée par les pertes est plus faible que la chaleur dissipée par le parafoudre. Dans ces conditions, le parafoudre se refroidit jusqu'à un point d'équilibre entre les pertes et la chaleur dissipée (courbe A, figure II.7). Dans le cas contraire, il y aura un emballement thermique. Il est donc très important de déterminer les températures limites de fonctionnement dans l'étude thermoélectrique des parafoudres [55].

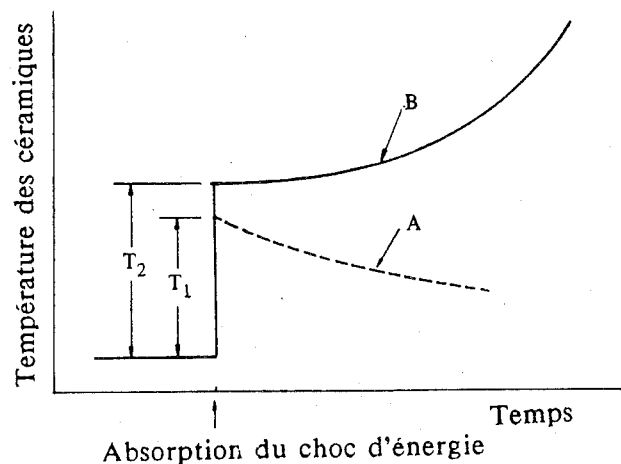


Figure II.7. Comportement d'un parafoudre après un choc adiabatique d'énergie. Courbe B apparition du phénomène d'emballement thermique. Courbe A le parafoudre absorbe le choc énergétique et se refroidit [55].

• Conditions critiques de l'emballement thermique

La condition critique de l'emballement thermique peut être évaluée analytiquement sur les bases de la dépendance en température et en chaleur dissipée vers l'air ambiant [47] : à une certaine tension, P et Q auront un seul point d'intersection (voir figure II.8). Pour toute température légèrement supérieure l'emballement thermique aura lieu. Dans ce cas, la température, la puissance et le courant sont donnés par :

$$T^* = [(\sigma T_a / W_c)(1 + 2\sigma T_a / W_c) + 1] T_a \quad (2.2)$$

$$P^* = (4S_z H h_T T_a / D)(\sigma T_a / W_c)(1 + 2\sigma T_a / W_c) \quad (2.3)$$

$$I_r^* = (2\sqrt{\pi h_T S_z T_a / E})(\sigma T_a / W_c)(1 + 2\sigma T_a / W_c) \quad (2.4)$$

Dans la pratique, un niveau de température d'environ 200°C pourrait être pris comme un point de fonctionnement instable [50].

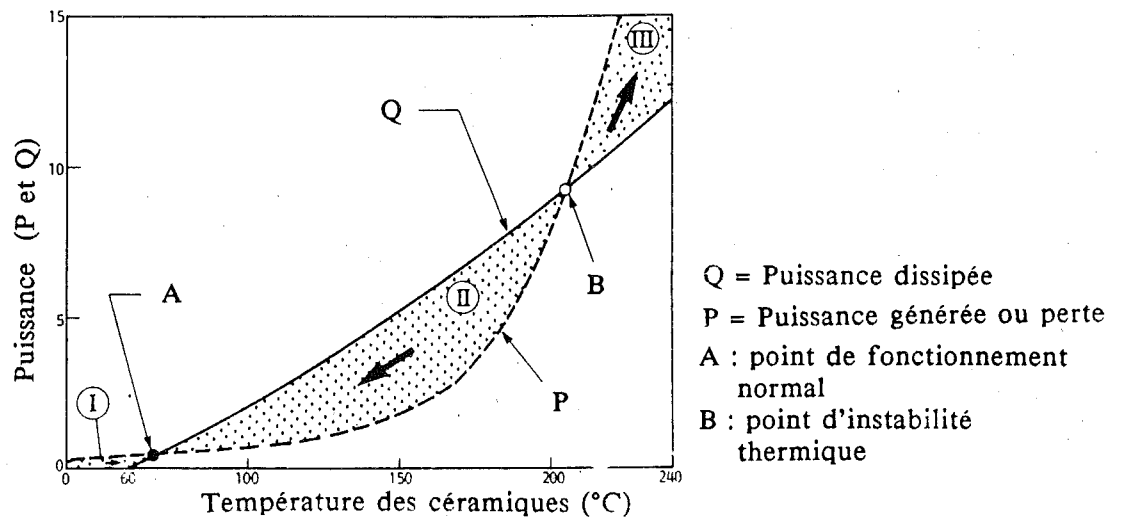


Figure II.8. Digramme de la stabilité thermique d'un parafoudre à ZnO [49].

II.4 STABILITE THERMIQUE

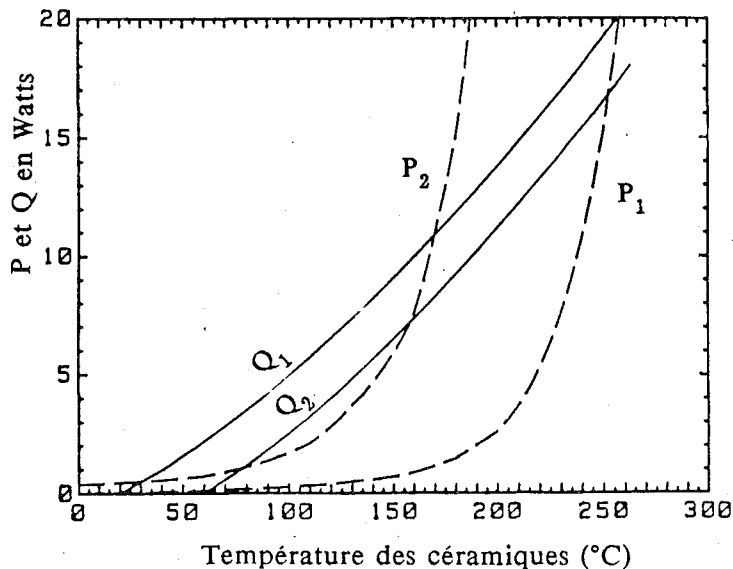
La stabilité thermique est l'un des critères les plus importants pour l'utilisation des parafoudres à ZnO [2,47-50]. Elle est analysée par l'équilibre thermique entre l'énergie générée ou pertes (P) et l'énergie dissipée par le parafoudre (figure II.8). En ce qui

concerne les deux points d'intersection a et b, le premier correspond à un point de fonctionnement stable, ou point d'opération normal ; le deuxième correspond à un point de fonctionnement instable. L'écart de température ΔT entre les deux points détermine l'élévation de température que la céramique peut supporter après un choc d'énergie (généralement adiabatique). Des températures supérieures à la limite de la stabilité thermique (point b) provoqueront une défaillance thermique du parafoudre appelée "emballement thermique".

Pour atteindre une stabilité thermique, la puissance générée doit être balancée par la puissance dissipée (Q) vers l'air ambiant. Si P est supérieure à Q, zones II et III, l'excès d'énergie est stocké dans la céramique, faisant augmenter sa température. Inversement, si Q est supérieure à P la température de la céramique diminue. De ce fait, la température des céramiques est toujours située dans un point d'équilibre.

La caractéristique de stabilité thermique peut être modifiée :

- Un changement de la température ambiante ou des pertes se traduit par une modification des limites de température (figure II.9).



P_1 : Pertes à une tension $V_a = 0,7$
 P_2 : Pertes à une tension $V_a = 1$
 Q_1 : Chaleur dissipée à une température ambiante de 20°C
 Q_2 : Chaleur dissipée à une température ambiante 60°C

$$V_a = \frac{V_{\text{crête d'opération}}}{V_{1\text{mA en CD}}}$$

Figure II.9. Les pertes P en fonction de la tension appliquée et de la température des céramiques. La chaleur dissipée Q en fonction de la température ambiante et de la température des céramiques [51].

- Un changement de l'architecture ou de la conception du parafoudre entraînerait une augmentation ou une diminution du flux de la chaleur dissipée (figure II.10). L'augmentation de la chaleur dissipée entraîne l'élévation de température admissible ΔT , mais surtout elle permet au parafoudre de dégager une énergie supérieure entre une série de chocs, par exemple entre enclenchement et réenclenchement des disjoncteurs.

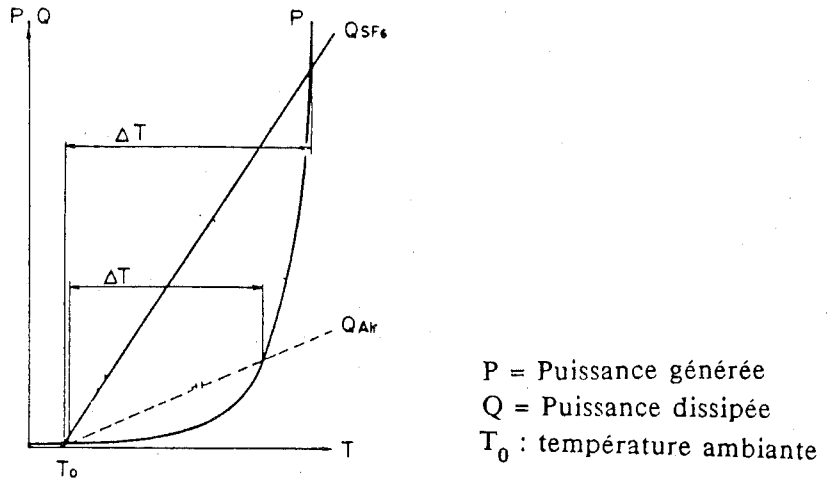


Figure II.10. La chaleur dissipée Q est modifiée par le changement de la conception du parafoudre. Par exemple, le remplacement de l'air par le SF6 [75].

• Influence de la température ambiante sur la stabilité thermique

La figure II.11 montre qu'il est évident que les températures limites de la stabilité thermique sont presque indépendantes de la température ambiante, tandis que les températures de fonctionnement dépendent directement de la température ambiante [51].

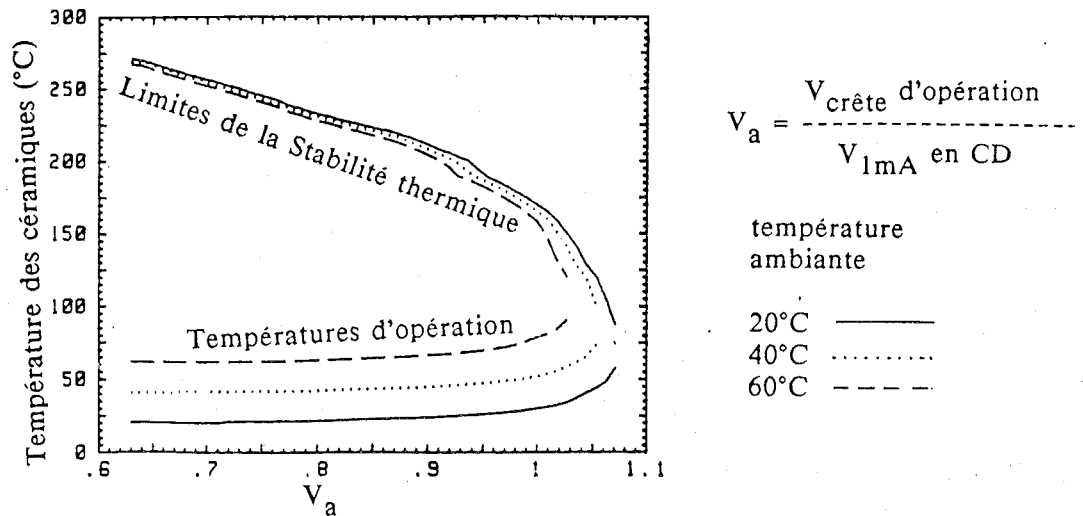


Figure II.11. Influence de la tension appliquée et de la température ambiante sur les limites de la stabilité thermique [51].

• Constante de dissipation de chaleur d'un parafoudre

Autour de la limite de la stabilité thermique, l'élevation de la température d'une céramique se fait lentement, même pendant l'emballement thermique, tandis que la température des gaz, à l'intérieur de la porcelaine, augmente rapidement jusqu'à un état proche de l'équilibre thermique. De ce fait, la constante de dissipation de chaleur en régime permanent est considérée comme similaire à celle du régime transitoire. Cela justifie l'intérêt d'étudier la constante de dissipation de chaleur en régime permanent à l'aide du diagramme de la figure II.8 [48].

II.5 CAPACITE D'ABSORPTION D'ENERGIE

Un parafoudre ne doit pas être stable à sa tension de service uniquement du point de vue thermique mais doit aussi absorber plusieurs surtensions et revenir à son état initial de stabilité thermique. Les problèmes des céramiques pour absorber l'énergie dérivée de surtensions sont classés en deux types :

1) Défaillance des céramiques

2) Dégradation des céramiques

La défaillance des céramiques : elle est similaire à la défaillance des isolateurs solides, ce qui provoque un percement instantané des céramiques.

La dégradation des céramiques : la caractéristique $V(I)$ dans la région de faibles courants se modifie du fait de l'énergie absorbée ; ceci crée une augmentation du courant résistif, et par conséquent augmente la puissance générée, ce qui peut provoquer un emballement thermique.

La quantité d'énergie absorbée par un parafoudre lors d'un choc d'énergie adiabatique est limitée par l'uniformité du choc de courant et par les caractéristiques de la céramique [51]. Actuellement, une céramique peut absorber entre 135 J/cm^3 et 400 J/cm^3 , certains fabricants prévoyant d'améliorer les niveaux actuels.

Les études réalisées sur les effets des chocs énergétiques sont divisées en trois groupes :

- chocs d'énergie dus aux surtensions de manoeuvre
- chocs d'énergie dus aux surtensions temporaires
- chocs d'énergie dus aux surtensions de foudre

Certains chercheurs [48] arrivent à la conclusion que la défaillance des céramiques due aux surtensions temporaires et de manoeuvre est une défaillance du type thermique. Dans ce cas, la capacité de décharge du parafoudre peut être traitée en supposant que l'énergie qui provoque la défaillance du matériel est la même pour les deux types de surtensions. D'autre part, étant donné la défaillance de type thermique, la capacité de décharge est affectée par la température initiale des céramiques.

La caractéristique des surtensions temporaires dépend fortement de la valeur crête de la surtension. Quand la valeur de la surtension est élevée, la limite du parafoudre est donnée par les surtensions temporaires. Si la valeur crête est petite, la limite à tension élevée est donnée par la stabilité thermique contre les surtensions de manoeuvre.

Normalement, dans les réseaux, l'énergie de décharge de la foudre que le parafoudre doit absorber est faible, comparée à celle des surtensions de manoeuvre ou temporaires. Dans la pratique un coup de foudre influe plus sur la dégradation des céramiques que sur la caractéristique d'emballage thermique [48].

II.6 DUREE DE VIE DES CERAMIQUES

Pour déterminer la durée de vie d'un parafoudre il est nécessaire de tenir compte de :

- La dégradation (ou variation) de sa caractéristique électrique due à l'absorption des surtensions.
- La dégradation due à l'application d'une tension.

L'estimation de la durée de vie à différents niveaux de température et de tension est basée sur les équations de Arrhenius [2,47,51].

$$a = a_0 e^{-Wc/\sigma T} \quad (2.5)$$

où a_0 est une constante, σ est la constante de Boltzmann, T la température en °K et Wc l'énergie d'activation.

Cette méthode part de l'hypothèse que chaque augmentation de 10°C en température diminue l'espoir de vie de moitié (figure II.12). [57].

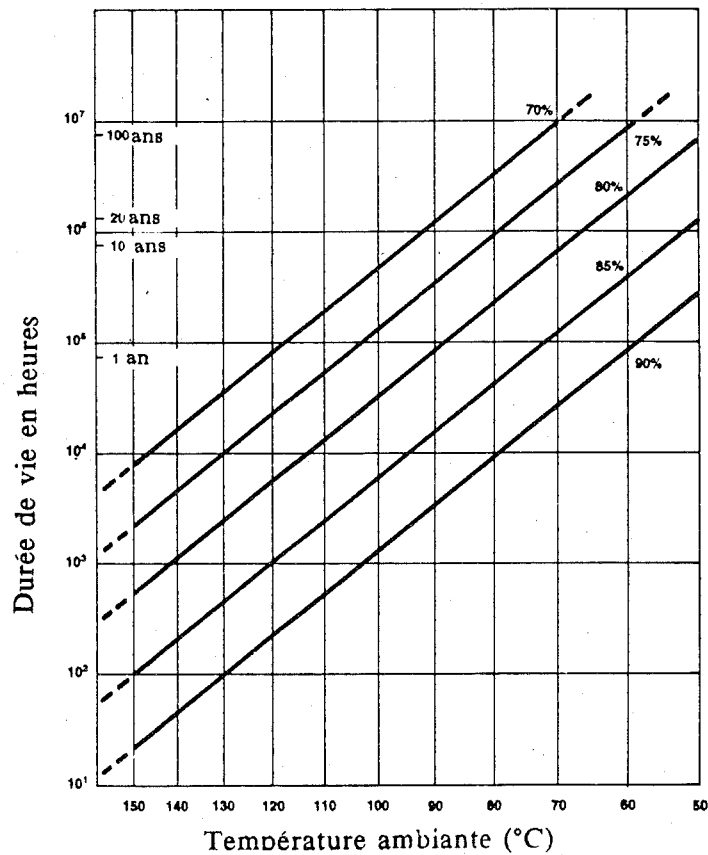


Figure II.12. Durée de vie des céramiques en fonction de la température et de la tension appliquée [50].

L'estimation de la durée de vie d'un parafoudre à partir de la caractéristique $P(t)$ n'est pas toujours déterminée par la vitesse d'augmentation des pertes dans une certaine période de temps. Par exemple, dans la figure II.13, les céramiques B et C ont une durée de vie supérieure à celle de la céramique A, elles atteignent leur valeur maximale en un temps court, après leur mise sous tension. Ensuite les pertes diminuent dans leur période

de fonctionnement normale (Zone I et partie de la Zone II). A la fin de leur vie, un phénomène d'emballage thermique est observé (Zone III) [50].

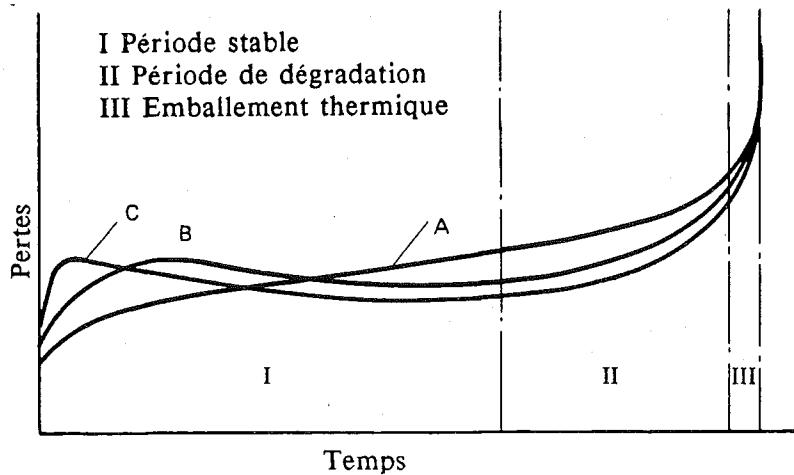


Figure II.13. Variation des pertes dans le temps des différents types des céramiques [50].

• Dégradation des céramiques

Du point de vue physique, les mécanismes de dégradation ont été attribués soit à des déplacements ioniques ou électroniques au voisinage des barrières de potentiel, soit à des échanges d'oxygène entre la varistance et l'atmosphère qui l'entoure.

Dans la pratique, on considère que lorsqu'une céramique absorbe de l'énergie et atteint une température élevée, il est considéré qu'une délicate différence entre les frontières des grains provoque une concentration du courant dans un certain point, lequel verra sa température s'élever. Par conséquent, le courant se concentre dans un point et éventuellement fond le matériau et provoque ainsi une fracture de la céramique.

La dégradation d'une céramique dépend très fortement de la composition du matériel, du processus de fabrication de la nature de la tension appliquée, alternative ou continue, (figure II.14) [56].

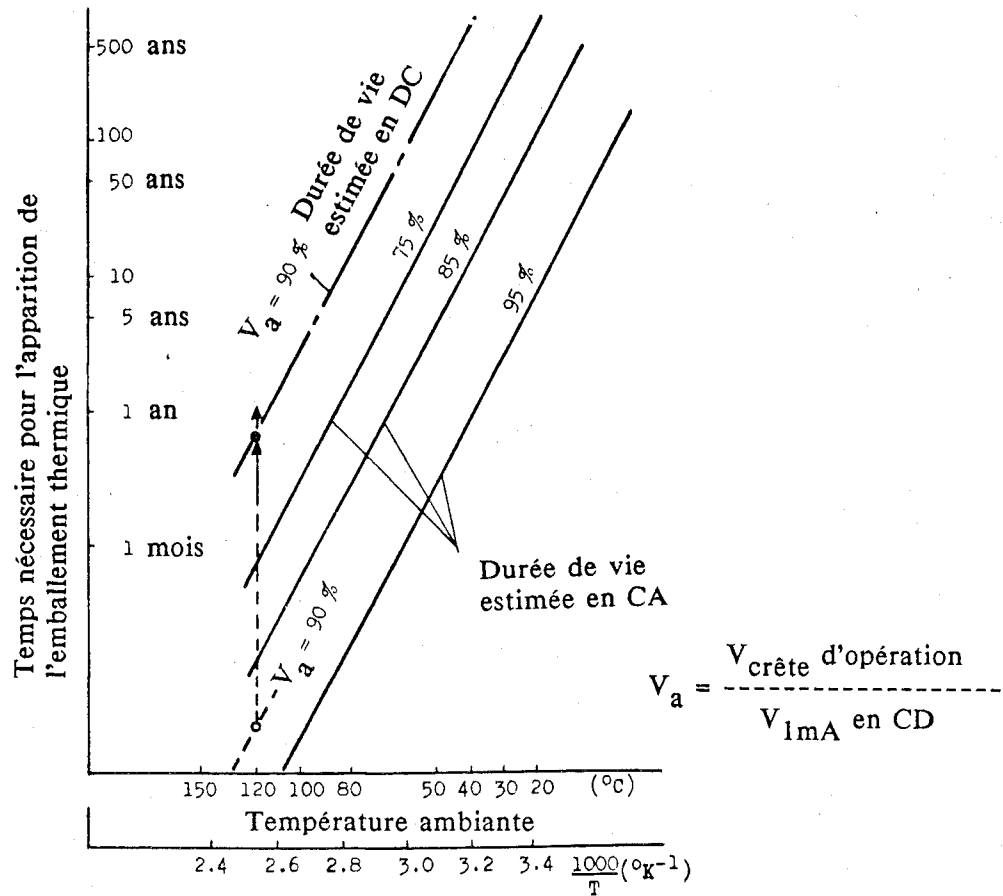


Figure II.14. Durée de vie d'une céramique en CA et en DC [56].

• Dégradation due à l'application d'une tension de service permanent

Pour une céramique dégradée, le courant de fuite augmente en fonction du temps suivant la relation :

$$J_d(E) = J_0(E) (1+r\sqrt{t}) \tag{2.6}$$

où r est la vitesse de dégradation en fonction de la température et de la tension de fonctionnement.

• Dégradation due aux surtensions

La dégradation des céramiques due aux surtensions temporaires et de manoeuvre est pratiquement négligeable ; en revanche, un coup de foudre peut dégrader les céramiques.

Ainsi, la dégradation dépend fortement de la valeur crête du courant de décharge plutôt que de l'énergie de décharge.

II.7 VIEILLISSEMENT DES CERAMIQUES

De nombreuses études sur la dégradation des céramiques sous différentes conditions de fonctionnement ont été réalisées [2,47,53,54]. De ces travaux, il résulte que la dégradation des céramiques due à leur tension de service semble être plus importante dans l'huile et le SF₆ que dans l'air [53]. Cette dégradation affecte principalement la périphérie de la céramique sur une épaisseur d'environ 100 μm; cet effet est d'autant plus important que le milieu environnant est appauvri en oxygène.

Du point de vue chimique, si le milieu est non réducteur il ne portera aucune dégradation. En revanche, des dégradations importantes ont lieu si le milieu est réducteur et si les espèces chimiques peuvent diffuser jusqu'à la céramique ; ces effets ont été observés dans l'huile et dans les gaz réducteurs activés [53]. Ces derniers peuvent également se produire lors du fonctionnement normal du parafoudre.

II.8 ESPOIR DE VIE DES CERAMIQUES

L'espoir de vie d'un parafoudre à ZnO est souvent évalué par les tests d'endurance effectués sur une céramique à des températures élevées [1,2,47,52]. La fin de sa vie est déterminé par l'apparition du phénomène d'emballement thermique.

L'espoir de vie d'un parafoudre peut être déterminée analytiquement, à condition que l'équilibre thermique dans une céramique soit considéré [47,52] : à une température et à une tension données une céramique atteindra tôt ou tard l'emballement thermique. En effet, le courant résistif augmente continuellement avec le temps, par un facteur $1+r\sqrt{t}$. L'emballement thermique apparaît quand la caractéristique de pertes se déplace suffisamment de telle sorte qu'il n'ya pas d'intersection entre les deux courbes P et Q (diagramme de la figure II.8).

L'espoir de vie obtenu à partir de résultats donnés par les tests d'endurance sera considérablement réduit si l'on tient compte de l'élévation de température provoquée par l'absorption des chocs énergétiques à une température ambiante élevée.

II.9 POLLUTION

- Les parafoudres à ZnO peuvent supporter plus facilement les courants provoqués par la pollution à la surface de la porcelaine. En revanche, ces courants peuvent provoquer des amorçages dans les éclateurs des parafoudres à SiC [27].

- Il est possible de laver les parafoudres à ZnO avec de l'eau chaude [27].

• Influence de la pollution sur la répartition de tension

Lorsque la porcelaine est polluée, il se produit une distorsion de la répartition axiale de la tension due à la différence de conductivité dans la couche de polluant. En effet, des amorçages partiels à la surface de la porcelaine génèrent des décharges disruptives transitoires qui affectent les parties actives par couplage capacitif. Le couplage capacitif entre les courants à la surface de la porcelaine et dans la colonne de ZnO ainsi que le couplage résistif entre les brides et les parties actives provoquent une distorsion supplémentaire sur la répartition de tension.

Dans ces conditions, un certain nombre de céramiques sont soumises à une contrainte électrique plus sévère et par conséquent elles sont aussi soumises à une contrainte thermique plus accrue.

Dans certaines zones très polluées, l'échauffement des céramiques est essentiellement déterminé par le type de pollution et par la conception du parafoudre. Par exemple, sous un brouillard salin (essai CEI au brouillard salin) et pour une pollution très importante, un parafoudre composé de plusieurs unités et sans anneaux de garde subit un échauffement plus rapide et plus important qu'un parafoudre muni d'anneaux de garde [59].

Une étude sur le comportement sous tension des parafoudres en présence des différentes conditions d'environnement, réalisée par Le CERL, l'EDF et l'ENEL [60] montre que :

Les conditions d'environnement telles que la pluie, le brouillard et la pollution peuvent provoquer une ionisation interne dont l'effet est une décomposition du milieu entourant les céramiques. Ce phénomène peut conduire à un vieillissement accéléré des céramiques et par la suite à un emballement thermique.

Quand un parafoudre constitué de plusieurs unités est soumis à des environnements très pollués, la conductivité de la surface (polluée) des unités peut être différente. De ce fait, dans les unités où la conductivité de couches polluantes est faible, le courant interne sera plus élevé que sur les unités où la couche isolante a une conductivité élevée (figure II.15). Le courant dû à cette pollution peut atteindre des valeurs de l'ordre de 100 mA.

A - Parafoudre constitué de plusieurs unités

B - Parafoudre constitué d'une seule unité

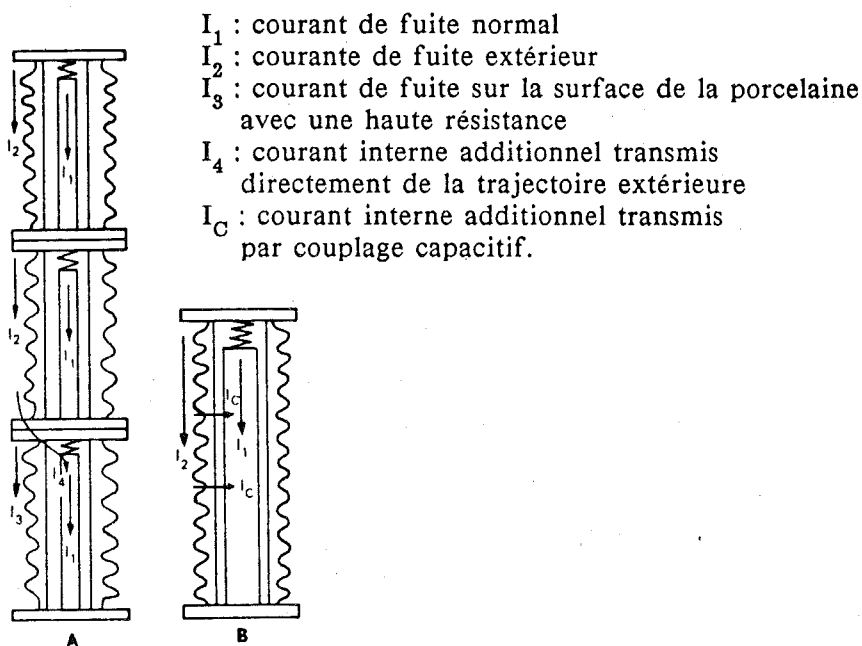


Figure II.15. Ecoulement du courant dans un parafoudre dans environnement pollué [27].

Ce courant est suffisant pour provoquer des amorçages entre les éclateurs d'un parafoudre à SiC. Une solution à ce problème peut être obtenue avec la construction des parafoudres à SiC d'une seule unité ; dans ce cas la porcelaine est conçue avec une longue ligne de fuite pour minimiser le courant de fuite sur la porcelaine.

Dans les parafoudres constitués d'une seule unité, le courant peut être transféré à travers les capacités parasites, pouvant entraîner des amorçages dans les éclateurs des parafoudres à SiC. En effet, bien que les capacités parasites soient petites, le courant transféré peut être élevé pour des variations rapides de la tension sur la surface extérieure de la porcelaine. Ces types de variations sont provoquées par la distorsion rapide de la tension due à des amorçages dans les sections sèches à travers la ligne de fuite. Ces sections ont été préalablement séchées par l'écoulement du courant de fuite.

II.10 DETECTION DES PARAFOUDRES DEFECTUEUX

L'identification d'un parafoudre défectueux est l'un des grands soucis des entreprises distribuant l'énergie électrique. Actuellement sur le réseau de distribution un parafoudre dégradé peut être isolé du réseau par un dispositif déconnecteur, de manière à assurer la continuité du service. Cependant, il n'est pas toujours facile d'identifier le parafoudre défectueux et le matériel électrique, tel que les transformateurs, n'est plus protégé. On peut aussi utiliser les parafoudres sans déconnecteur et l'identification des parafoudres dégradés peut alors être réalisée par un indicateur fiable, visible à distance, permettant de le repérer et de le remplacer rapidement [67].

Un autre moyen de détection des parafoudres dégradés a été développé par Mr. HOWARD [68] : il a observé qu'un parafoudre dégradé par l'humidité émet des ondes électromagnétiques de l'ordre de 40 MHz permettant de l'identifier.

II.11 DIMENSIONNEMENT DES PARAFONDRES

Le dimensionnement des parafoudres de moyenne tension est essentiellement fondé sur leur capacité à absorber l'énergie due aux coups de foudre directs. Les études réalisées pour déterminer l'énergie susceptible d'être absorbée par les parafoudres lors de leur fonctionnement, ont montré qu'un courant d'essai de 65 KA est nécessaire pour le bon dimensionnement des parafoudres dans les réseaux moyenne tension français [73], et de 100 KA pour les parafoudres HT [72]. Le taux de défaillance pour des parafoudres ainsi dimensionnés devrait être de l'ordre de 0,15% annuel.

Dans le tableau III sont résumées les exigences fixées par les spécifications d'essais. Dans le tableau IV sont données les distances maximales d'installation entre le parafoudre et le transformateur de puissance à protéger, obtenus à partir des simulations [72].

Tableau III. Caractéristiques demandées aux parafoudres [72].

Tension nominale du réseau (kV eff)	63	90	225	400
Tension maximale d'exploitation (kV eff)	42	58	142	243
Tension assignée du parafoudre (kV eff)	72	96	192	360
Tension résiduelle au courant nominal (kV crête)	180	235	475	850
Courant nominal, onde 8/20 μ s (kA)	5	5	10	10

Tableau IV. Distances maximales entre parafoudre et appareil protégé [72].

Tension nominale du réseau (kV)	63	90	225	400	
			isolement normal *	isolement à 1175 kV	isolement à 1425 kV
Distance max. d'installation (m)	30	30	40	30	40

* Dans le cas des transformateurs à isolement réduit du réseau 225 kV, il est plus commode d'installer systématiquement à la construction, les parafoudres sur la cuve du transformateur. En effet, les contraintes d'agencement dans le poste ne permettent pas toujours de garantir la distance maximale d'installation qui est de 10 mètres.

II.12 AMELIORATION DU FONCTIONNEMENT DES PARAFODRES A ZnO

Le comportement des parafoudres peut être amélioré par l'adoption des mesures suivantes :

- Une bonne conception de l'isolation externe (ligne de fuite et profil de la porcelaine).
- Une distribution uniforme de la tension dans chaque unité et entre les différentes unités.
- Utilisation de céramiques comportant un revêtement protecteur spécial sur leur surface externe. Ces céramiques supportent mieux les effets de l'ionisation interne ainsi que de la perte de l'oxygène du milieu environnant.
- Réduction des sources internes d'effet couronne.
- Remplissage du volume qui entoure les céramiques à l'aide d'un milieu passif. Un milieu qui ne contiendrait pas d'oxygène pourrait empêcher la formation d'espèces chimiques actives à la suite de l'ionisation interne.
- Utilisation des pièces internes de formes appropriées installées dans un ensemble avec une bonne tenue mécanique pour éviter tout déplacement des pièces lors du transport du parafoudre. Ceci aurait pour effet la réduction de l'ionisation interne.

II.13 APPLICATION DES PARAFODRES A ZnO

Les premières applications des parafoudres à ZnO ont été réalisées sur les réseaux THT et HT [2], puisque comparés aux parafoudres conventionnels à SiC, les parafoudres à ZnO offraient :

- une meilleure caractéristique de protection, plus avantageuse pour la protection du matériel THT et HT,
- le coût plus élevé de cette nouvelle technologie pouvait être plus facilement justifié pour les réseaux THT et HT.

Depuis, la technologie de fabrication des céramiques a réalisé des progrès considérables. De ce fait, ils ont été utilisés tout d'abord dans les réseaux de distribution souterrains, du fait des meilleures caractéristiques de protection et de la diminution du coût du matériel [69,25,26].

L'application des parafoudres à ZnO aux réseaux aériens de distribution s'est développée très tardivement, notamment du fait de son coût. Actuellement, dans certains secteurs, les parafoudres à ZnO peuvent améliorer la protection et la qualité du service à des prix plus abordables. On peut penser que l'utilisation des parafoudres à ZnO se développera considérablement avec la diminution de leur prix.

- Application des parafoudres au système souterrain de distribution

La protection des réseaux souterrains de distribution ainsi que le matériel branché a été un point d'étude important pour différents auteurs [25,74]. Ces études s'expliquent par la défaillance fréquente de parafoudres dans la protection de ce type de réseaux, l'élévation des niveaux de tension, associée à une marge plus faible de la protection donnée au matériel HT avec un bas niveau d'isolement.

- Application des parafoudres à ZnO sur des pylônes de 138 kV

Dans les pylônes THT les taux d'amorçage des coups de foudre dans les réseaux de transport peut être réduit en augmentant l'isolement ou en diminuant la résistance de mise à la terre des pylônes. Dans la pratique, ces mesures ne sont pas efficaces si les pylônes ne possèdent pas un système de récupération ou si les lignes sont situées sur un terrain de haute résistance de mise à la terre. Une solution alternative serait l'utilisation des parafoudres en parallèle avec les chaînes des isolateurs pour empêcher les amorçages.

Cette application a été étudiée par E. KOCH [65] : il utilisa un parafoudre à base de céramiques de ZnO, spécialement construit pour ce problème. Les résultats sont optimistes et laissent supposer que la protection de ce type de lignes peut être améliorée.

- Application des parafoudres à ZnO dans les postes compacts à SF₆

Les bonnes performances des parafoudres à ZnO sont dues en grande partie à la forte caractéristique non-linéaire des céramiques. Celles-ci ont en général un gradient de tension de 2000 V/cm, elles sont destinées à être utilisées dans l'air ou dans l'azote. Dans les milieux isolants, un des problèmes majeurs est le contournement de la surface latérale des céramiques lors des essais d'impulsions de forts courants. La haute rigidité électrique et les bonnes propriétés de dissipation de chaleur du SF₆ permettent d'augmenter le gradient de tension sur les céramiques. Certaines études ont permis d'analyser plusieurs types de nouvelles céramiques possédant des gradients de tension plus élevés. Une diminution de l'épaisseur des céramiques entraîne une diminution de la surface des échanges thermiques et par conséquent une diminution de la constante de dissipation de chaleur du parafoudre. Mais étant donné la meilleure capacité de dissipation de la chaleur du SF₆ par rapport à l'air, cette diminution en épaisseur n'a pas un effet important. Pour une même tension de service, la constante de dissipation de chaleur dans le SF₆ peut être de l'ordre de 4 fois celle obtenue dans l'air.

- Développement des parafoudres à ZnO pour des systèmes de 1200 kV et 550 kV

Ces parafoudres ont été développés aux Etats Unis pour répondre aux besoins de compagnies d'électricité dans ce pays [66]. Le développement de ce type de parafoudres a permis de réduire le volume des parafoudres de 60% et leur poids de 50%, par rapport aux parafoudres conventionnels grâce à l'élimination des éclateurs et l'utilisation d'une porcelaine plus petite. En outre, ils ont bénéficié de tous les avantages offerts par cette technologie : réponse plus rapide, possibilité de réduire la coordination des isolements...

• Parafoudres à ZnO à enveloppe synthétique

En moyenne tension une nouvelle gamme de parafoudres à enveloppe synthétique a été développée ces dernières années [61,62].

Ces parafoudres sont constitués par une partie active (les céramiques de ZnO) et par une enveloppe synthétique placée directement sur la surface des céramiques (figure II.16).

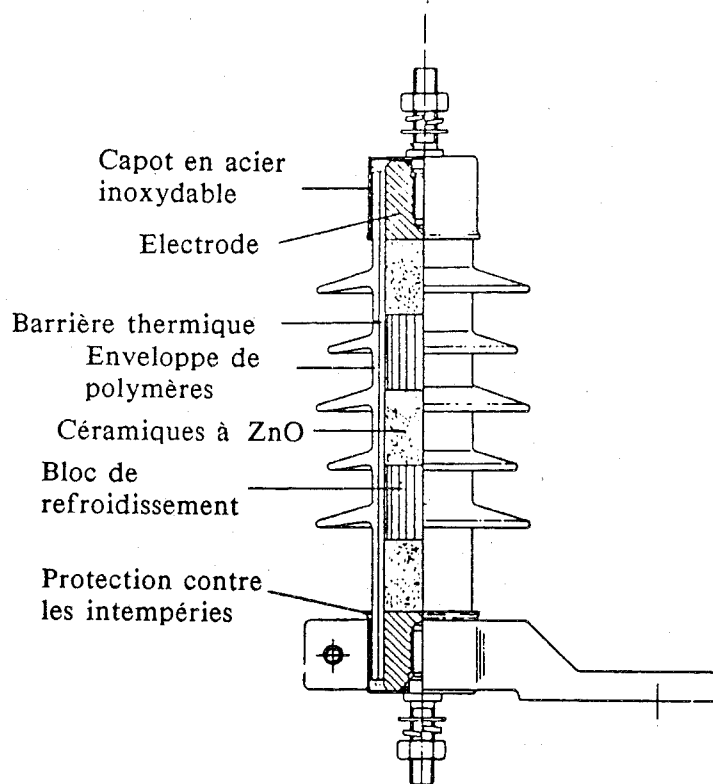


Figure II.16. Parafoudre à enveloppe synthétique [38].

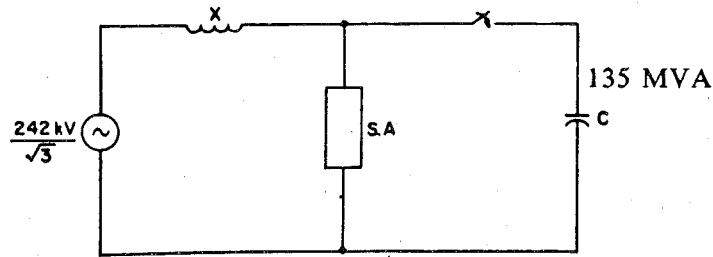
Les principales caractéristiques de ces parafoudres sont les suivantes :

- Grâce à son enveloppe inexplosible, ce type de parafoudre permet d'assurer la sécurité des personnes et du matériel en cas de défaillance.
- L'enveloppe synthétique conserve ses bonnes qualités d'isolation et d'hydrophobie, indépendamment du vieillissement, même après plusieurs années de service en milieux fortement pollués [63]
- Réduction du volume occupé

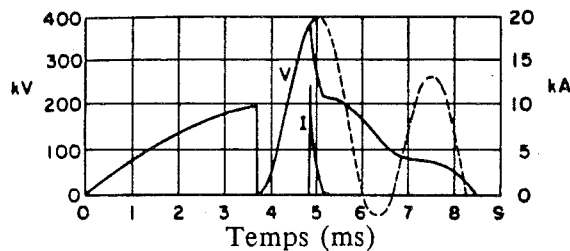
- Réduction du poids d'environ 50% par rapport au même parafoudre avec une enveloppe en porcelaine
- Elimination des défauts dus à l'humidité, grâce à la bonne étanchéité obtenue avec l'enveloppe synthétique.
- La rigidité diélectrique de l'enveloppe synthétique est moins sensible à la pollution que la porcelaine.

• Protection des bancs capacitifs

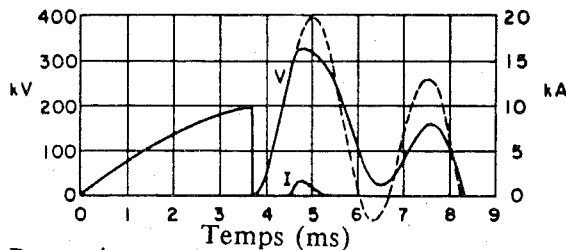
Une des applications les plus difficiles des parafoudres est la protection des bancs capacitifs. La figure II.17 montre les avantages offerts par les parafoudres à ZnO par rapport aux parafoudres conventionnels. Ces résultats ont été obtenus à partir d'une simulation par ordinateur. Le banc capacitif est connecté à un réseau 230 kV, le courant disponible grâce à ce système est de 15000 A, et il est protégé par un parafoudre 180 kV comme est indiqué à la figure II.7.



a) Circuit



b) Protection réalisée avec un parafoudre à SiC



c) Protection réalisée avec un parafoudre à ZnO

Figure II.17. Comparaison entre la protection réalisée avec des parafoudres à SiC et celle réalisée avec des parafoudres à ZnO sur un banc capacitif [2].

Les courbes en pointillés indiquent la tension que le système pourrait atteindre sans la protection des parafoudres. A partir de la figure II.17 il est clair que le parafoudre à ZnO donne une meilleure protection : il extrait du circuit uniquement l'énergie nécessaire pour réaliser sa fonction de protection ; en revanche le parafoudre à SiC absorbe plus d'énergie.

- Protection des machines tournantes

Les parafoudres à ZnO présentent d'excellentes caractéristiques pour la protection des machines tournantes [64]. L'absence d'éclateurs permet d'améliorer la protection contre des surtensions à front raide, et permet aussi une meilleure adaptation de la tension assignée du parafoudre pour différents besoins d'utilisation. En effet, les parafoudres conventionnels sont très souvent construits avec des unités en série de 1,5 à 3 kV pour des faibles tensions. Ceci est dû aux caractéristiques des éclateurs utilisés. En revanche, dans la construction des parafoudres à ZnO la tension peut être modifiée facilement par un simple contrôle de l'épaisseur de la céramique.

La publication [64] est une bonne assistance dans la sélection des tensions de parafoudres pour la protection des machines tournantes.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux aspects qui caractérisent les parafoudres à ZnO : structure des céramiques, comportement électrique et thermique des parafoudres, durée de vie...

Leurs bonnes caractéristiques ont permis de les utiliser partout où la protection contre les surtensions est nécessaire, remplaçant ainsi les éclateurs et les parafoudres conventionnels.

Cependant, certains points ne sont pas encore complètement connus. En voici deux exemples :

1) Les effets de la pollution sur les parafoudres à ZnO ne sont pas encore complètement maîtrisés ni de ce fait, leur tenue sous différents environnements.

2) Du point de vue de la constitution des céramiques, malgré la connaissance actuelle des mécanismes d'influence de chacun des additifs, il reste difficile de pronostiquer toutes les conséquences de leur ajout.

CHAPITRE III

MODELISATION ELECTRIQUE ET THERMIQUE DES PARAFONDRES A ZnO

Introduction

Le fonctionnement des parafoudres à ZnO, en régime permanent ou transitoire, est régi par leurs caractéristiques électriques et thermiques. En effet, le comportement électrique d'un parafoudre à ZnO est fortement lié à ses caractéristiques thermiques; par conséquent, les lois de transmission de la chaleur sont d'une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement des parafoudres à ZnO.

D'autre part, dans la simulation du comportement thermique des parafoudres nous sommes confrontés à une double non linéarité et à l'imbrication de phénomènes électriques et thermiques : d'une part la température d'une pastille est une fonction de ses pertes et de la tension qui lui est appliquée, d'autre part les pertes sont une fonction non-linéaire de la température et de la tension. Pour résoudre ce problème nous avons représenté le comportement thermique et électrique par deux modèles disjoints que nous avons utilisés simultanément [77]. Les sources de flux de chaleur (pertes électriques) font l'interaction entre les deux modèles.

Dans ce chapitre nous donnons les différents aspects électriques et thermiques qui interviennent dans l'étude des parafoudres, ainsi que leurs applications à notre sujet d'étude. Nous donnons aussi les bases de la modélisation thermique et le logiciel de calcul utilisé pour résoudre le modèle proposé. Ce modèle combine les aspects électriques et thermiques et utilise l'analogie thermique-électrique.

III.1 MECANISMES DES ECHANGES THERMIQUES

Les mécanismes de transmission de la chaleur d'un corps à un autre diffèrent beaucoup selon la température. Les phénomènes de conduction et convection dépendent principalement des différences de températures et peu de leur niveau, alors que les échanges de chaleur par rayonnement augmentent rapidement avec ce niveau. A basse température, la plus grande partie de la chaleur est transmise par convection et conduction, tandis qu'à température élevée le rayonnement est le facteur déterminant [78,79].

L'évacuation de la chaleur des pastilles vers l'air ambiant s'effectue par conduction, radiation et convection comme il est indiqué dans la figure III.1. La dissipation de la chaleur se réalise dans la direction axiale et dans la direction radiale. Dans la direction axiale, la chaleur est échangée par conduction entre les blocs de ZnO et entre les capots

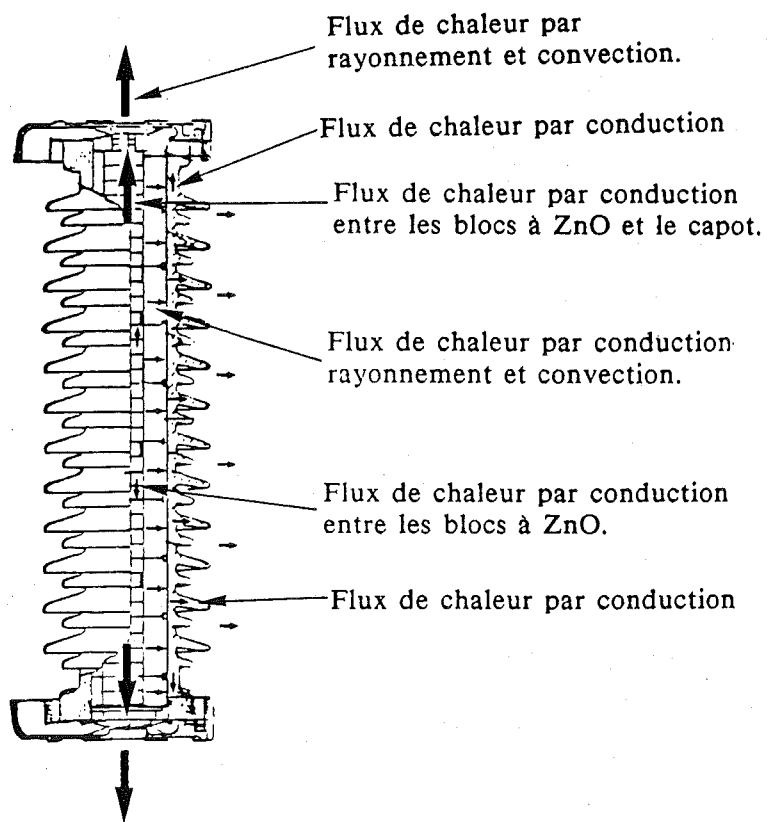


Figure III.1. Echanges thermiques dans un parafoudre à ZnO

et les blocs extrêmes de la colonne de ZnO. Dans la direction radiale, la chaleur est transmise entre la colonne et la porcelaine par convection, conduction et radiation, dans la porcelaine par conduction, et entre la porcelaine et l'air ambiant par rayonnement et convection.

III.2 MODELISATION THERMIQUE A L'AIDE DE LA METHODE NODALE

• Description de la méthode nodale

La méthode nodale consiste à discrétiser un système physique en un nombre fini d'éléments de volume Y_i . Le système physique est entièrement défini par:

- le potentiel de chacun des éléments Y_i , supposé constant dans tout l'élément.
- les flux échangés entre les différents éléments.

Dans le cas d'un système thermique, la méthode nodale nous conduit à discrétiser le système en un nombre fini de noeuds représentatifs d'un élément Y_i , supposés isothermes dotés d'une capacité thermique égale à la capacité de l'élément de volume Y_i considéré [80], voir figure III.2.

Les lois d'échanges thermiques entre deux noeuds sont exprimées, d'une manière générale, sous la forme :

$$\Phi = G (T_j - T_i) \quad (3.1)$$

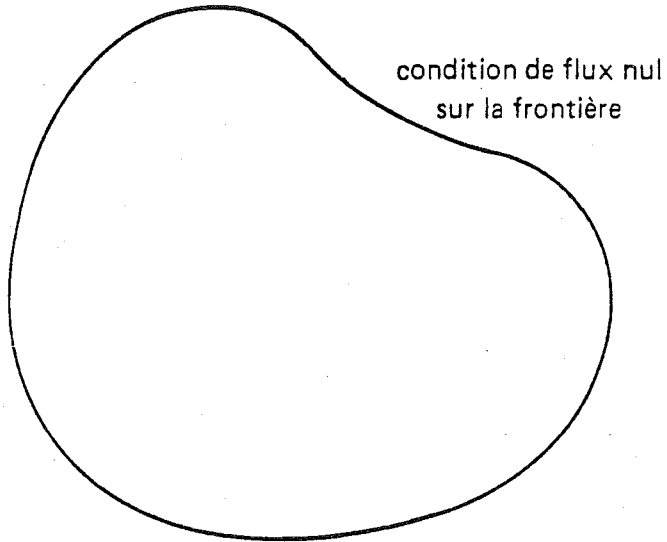
Φ étant la quantité de chaleur écoulee, $T_j - T_i$ l'écart de température entre les deux corps et G la conductance thermique entre les deux noeuds.

Les conductances thermiques sont mises en place entre les différents noeuds et correspondent aux mécanismes des échanges thermiques ayant lieu entre ses noeuds. L'apport d'énergie par les pertes est représenté par une source de chaleur sur le noeud concerné.

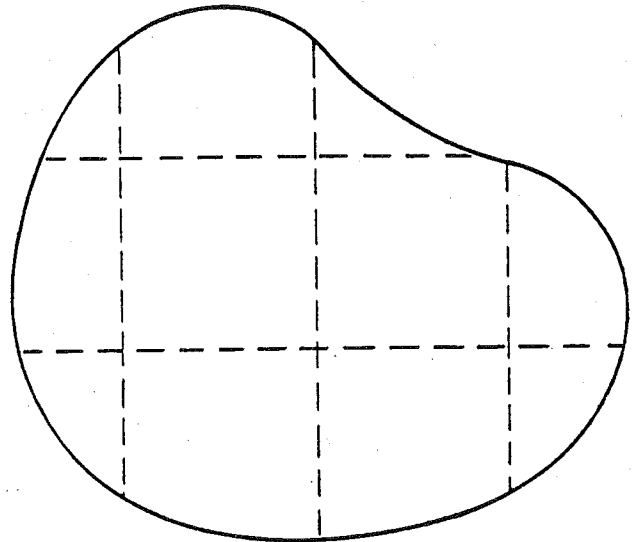
Les conditions initiales du système sont données sous la forme d'une température ou d'un flux de chaleur imposé.

Figure III.2. Description d'un système thermique par la méthode nodale [79].

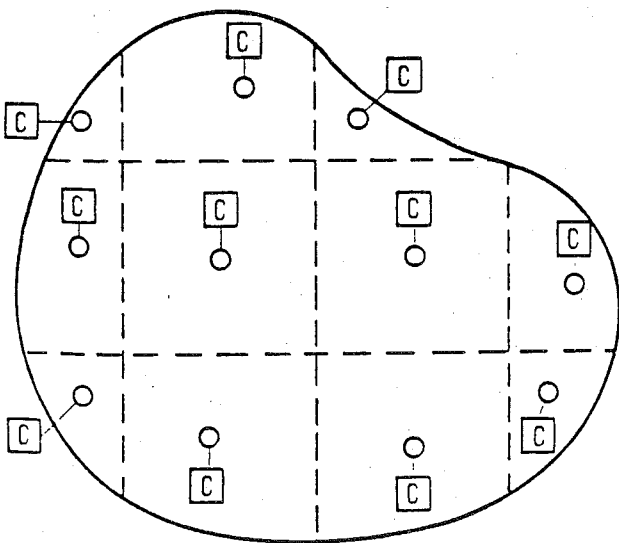
système physique



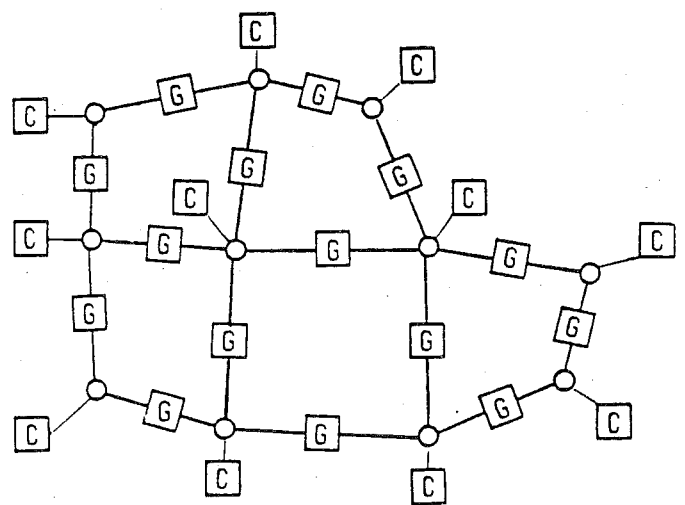
① Discrétisation dans l'espace



② Mise en place des nœuds et des capacités thermiques



③ Mise en place des conductances thermiques



C = capacités thermiques

G = conductances thermiques

• Analogie thermique-électrique

L'analogie thermique-électrique est basée sur la similitude des équations de la loi d'Ohm et du flux de puissance :

$$\Phi = G\Delta T \implies I = G\Delta V \quad (3.2)$$

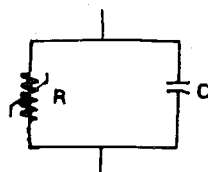
elle est aussi basée sur le bilan thermique et la loi de Kirchoff :

$$C_i T_i = \sum_{j=i} G_{ij} (T_j - T_i) + Q_i \implies C_i U_i = \sum_{j=i} G_{ij} (U_j - U_i) + J_i \quad (3.3)$$

Dans l'équation du bilan thermique, G_{ij} est la conductance thermique entre les noeuds i et j et Q_i est la contribution de chaleur au noeud i . Dans l'équation de la loi de Kirchoff, G_{ij} est la conductance électrique entre les noeuds i et j et, J_i est la source de courant du noeud i .

III.3 MODELISATION ELECTRIQUE

Un élément de ZnO peut être représenté par une résistance non linéaire en parallèle avec une capacité (figure III.3). Cependant en ce qui concerne les températures pour lesquelles la modélisation thermique est intéressante, le courant capacitif (indépendant de la température) est négligeable par rapport au courant résistif [77,59].



R : résistance électrique non linéaire
C : capacité électrique

Figure III.3. Représentation électrique d'un élément à ZnO.

Les pertes électriques et le courant qui traverse le parafoudre seront donnés en fonction de la tension et de la température. La caractéristique $V(P)$ est non-linéaire et liée à la caractéristique $V(I)$.

III.4 CHOIX D'UN LOGICIEL DE CALCUL

Un système thermique peut être représenté, grâce à la méthode nodale, par un système électrique. Il pourra donc être résolu à l'aide d'un logiciel de simulation de réseaux électriques. Nous avons utilisé le logiciel ASTEC3 pour simuler le comportement thermique et électrique des parafoudres, grâce à la modélisation et à la mise en place d'un réseau de conductances thermiques. Les sources de flux de chaleur (pertes) correspondent à la modélisation électrique [77].

ASTEC3 est un logiciel de simulation de circuits électriques, électroniques et de systèmes régis par des équations différentielles ou algébriques. Il permet de simuler un circuit électrique ou un système analogique en régime continu, transitoire ou alternatif. Ce programme a été développé par le CEA/DAM et diffusé par la CISI [79,81,82].

III.5 DEVELOPPEMENT DU MODELE THERMIQUE

Afin d'appliquer la méthode nodale aux parafoudres, nous avons divisé le parafoudre en trois parties : le capot supérieur, la partie centrale et le capot inférieur. Dans chaque partie, chacune des pièces est représentée par un noeud. Les noeuds sont liés entre eux par des conductances thermiques. La capacité thermique de chaque pièce est reliée au noeud de référence (l'air ambiant). Le modèle de la partie centrale est donné pour un bloc ZnO, afin de généraliser son utilisation.

• Répercussion des phénomènes thermiques sur le modèle électrique

Dans l'étude thermoélectrique des parafoudres nous sommes confrontés à deux constantes de temps différentes : la constante de temps thermique est comprise entre 1h et 2h, tandis que la constante de temps des phénomènes électriques est de seulement quelques millisecondes. Pour le calcul des phénomènes thermiques le pas de temps retenu a été de quelque dizaines de secondes. Dans ces conditions, l'étude électrique est assimilée à un régime continu et le modèle électrique ne comporte que des résistances non-linéaires. Cette représentation est justifiée pour des comportements ayant une dominante résistive, c'est-à-dire pour des températures suffisamment élevées [77].

III.6 DETERMINATION DES PARAMETRES THERMIQUES

Les différents mécanismes de transmission de la chaleur jouent un rôle fondamental dans l'étude et fonctionnement des parafoudres. La présence simultanée des trois modes de transfert de la chaleur (conduction, convection et rayonnement) est déterminée par la structure et les dimensions du parafoudre. Il est donc nécessaire non seulement de présenter les lois fondamentales dont dépendent les trois mécanismes, mais encore de développer une méthode sûre pour le calcul du dédit total de chaleur dû à la combinaison de leurs effets. C'est dans ce but que nous déterminerons les conductances et les capacités thermiques présentes à travers tout le parafoudre, données d'une manière générale sous la forme :

$$G = \Phi / \Delta T \quad (3.4)$$

Φ est la quantité de chaleur écoulée et ΔT l'écart de température entre les deux corps.

III.6.1 Conductances thermiques par conduction

Les échanges thermiques par conduction sont régis par l'équation de Fourier [78] :

$$\Phi = \lambda S \cdot dt/dx \tag{3.5}$$

Φ est la quantité de chaleur s'écoulant dans la direction de l'axe x; S la section droite, perpendiculaire à l'axe à travers lequel s'écoule la chaleur; $-dt/dx$ est le gradient thermique le long du trajet parcouru par Φ ; λ est la conductivité thermique.

La conductance thermique par conduction (GD), entre les différentes pièces qui constituent les capots, et entre les blocs de ZnO, est donnée par :

$$GD = \frac{\lambda S}{E} \tag{3.6}$$

où E est le trajet parcouru par Φ .

Dans le calcul de la conductance thermique entre la colonne de ZnO et la porcelaine, la section droite de passage est égale à $2\pi xh$, après intégration entre x_1 et x_2 (figure III.4) :

$$GD = \frac{\lambda 2\pi h}{\ln(x_2/x_1)} \tag{3.7}$$

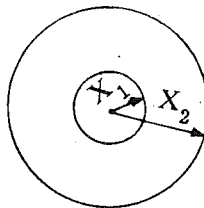


Figure III.4. Deux cylindres coaxiaux

où h est la hauteur de la colonne, x_1 le rayon d'un bloc de ZnO et x_2 le rayon intérieur de la porcelaine.

De même, la conductance de la porcelaine est obtenue à partir de l'équation 3.7, où x_1 est le diamètre intérieur et x_2 le diamètre extérieur moyen des ailettes.

III.6.2 Conductances thermiques par rayonnement

Les échanges thermiques par rayonnement entre deux surfaces (i et j) sont définis d'une manière générale par :

$$\Phi = \epsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_j^4 - T_i^4) \quad (3.8)$$

la conductance thermique correspondante est égale à :

$$GR_{ij} = \epsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) / (T_i - T_j) \quad (3.9)$$

exprimée aussi sous la forme :

$$GR_{ij} = \epsilon_{ij} \sigma S_{ij} F_{ij} (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \quad (3.10)$$

où ϵ_{ij} est l'émissivité équivalente entre les deux surfaces, F_{ij} le coefficient de configuration géométrique entre les deux surfaces [83] et σ la constante de Stefan-Boltzmann $5.729 \cdot 10^{-12}$ (W/cm²·K⁴).

III.6.3 Conductance thermique par convection

Le flux de chaleur échangé par convection est donné par :

$$\Phi = \alpha S (T_s - T_a) \quad (3.11)$$

où T_s est la température de la surface et T_a est la température de l'air ambiant ou la température d'une autre surface. Dans le cas d'une enceinte fermée et remplis d'air, la conductance thermique est donnée par :

$$GV = \alpha S \quad (3.12)$$

où S est la surface des échanges thermiques et α le coefficient superficiel des échanges thermiques.

Le flux de chaleur par convection est un phénomène complexe, cependant le calcul des coefficients α peut être simplifié en effectuant quelques hypothèses [78,84].

• Entre la porcelaine et l'air ambiant

La surface extérieure de la porcelaine est supposée égale à celle d'un cylindre. Le coefficient local α pour un cylindre est obtenu à partir de la relation entre les nombres de Nusselt d'un cylindre et celui d'une plaque [84].

Pour le parafoudre étudié, le produit du nombre de Grashof et de Prandtl est compris entre $10^4 < GrPr < 10^9$. Dans ces conditions, l'équation conseillée par SCHMIT et BECKMANN pour le cas du cylindre est :

$$\alpha = 4,20 [(T_s - T_a)/(T_a \cdot h)]^{1/4} \quad (3.13)$$

Le coefficient moyen (α') pour un bloc compris entre h_2 et h_1 est obtenu par l'intégration de l'équation 3.13 entre h_2 et h_1 (figure III.5) :

$$\alpha' = \frac{5.6 (h_2^{3/4} - h_1^{3/4})}{T_a^{1/4} (h_2 - h_1)} \quad (3.14)$$

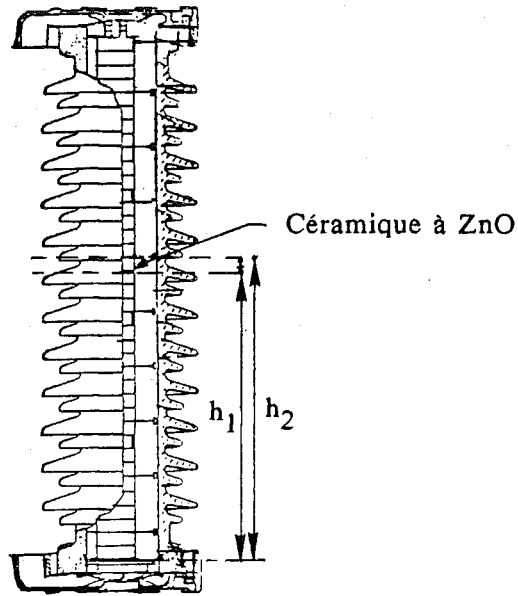


Figure III.5. Céramique placée entre h_1 et h_2 .

• Convection entre la porcelaine et la colonne de ZnO

Pour tenir compte de ce phénomène, nous avons considéré le cas d'une enceinte fermée et remplis d'air.

Dans ce cas, l'équation conseillée par Mc. ADAMS [78] est :

$$\alpha = \frac{\lambda_a}{x} \frac{C}{(h/x)^{1/9}} \left[\frac{x^3 \rho_a^2 g \beta_a \Delta t C_p \mu}{\mu_a^2 \lambda} \right]^n \quad (3.15)$$

où \underline{C} et \underline{n} sont des constantes qui dépendent de la valeur du nombre de Grashof, \underline{x} représente l'espace d'air entre les deux surfaces.

Pour obtenir le coefficient moyen α' pour chaque bloc, l'équation 3.15 est intégrée entre h_1 et h_2 . Dans le cas de l'air, le coefficient superficiel des échanges thermiques par convection est donné par :

$$\alpha' = 0.9186 \Delta T^{1/4} ((h_2^{8/9} - h_1^{8/9}) / (h_2 - h_1)) \quad (3.16)$$

Il est à noter que le phénomène de convection dans une enceinte fermée et remplie d'air se produit ou non en fonction de la valeur du paramètre x [78,84].

• Entre les capots et l'air ambiant

Les capots sont assimilés à des plaques horizontales, de même paramètre géométrique caractéristique, orienté vers le haut pour le capot supérieur et orienté vers le bas pour le capot inférieur. Dans le cas de l'air et pour des plaques carrées dont les cotés sont égaux au diamètre des capots, à partir des données de la référence [78] nous obtenons :

a) pour le capot supérieur

$$\alpha = 6.826 \Delta T^{1/4} \quad (3.17)$$

b) pour le capot inférieur

$$\alpha = 3.42 \Delta T^{1/4} \quad (3.18)$$

III.7 PARAMETRES ELECTRIQUES

La puissance instantanée dissipée par effet joule dans une céramique ZnO est :

$$P = v(t) \cdot i(t) \quad (3.19)$$

Dans l'étude thermo-électrique des parafoudres, l'équation 3.19 ne peut pas être utilisée directement, étant donné la grande différence entre les constantes de temps thermiques et électriques. Pour les phénomènes thermiques, elle est comprise entre 1h et 2h, et de seulement quelques millisecondes pour les phénomènes électriques. Dans ces conditions, le pas de temps utilisé pour le calcul des phénomènes thermiques a été de quelques dizaines de secondes. Par conséquent, le régime électrique est assimilé à un régime permanent.

L'énergie fournie à la pastille pendant le pas de calcul Δt peut être obtenu sans commettre une erreur importante en supposant $\Delta t = n \times T$, où n est un nombre entier et T la période du signal électrique.

La puissance est donc égale à la puissance moyenne sur une période électrique.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (3.20)$$

Cependant, ces valeurs de puissance peuvent dans certaines conditions de fonctionnement, ne pas être très représentatives de la réalité, par exemple :

1) Sous l'influence d'un gradient de température très élevée le long de la colonne de ZnO, la forme de la tension appliquée à chaque pastille n'est pas la même ni de ce fait la puissance dissipée.

2) L'influence des conditions de travail telle que la pollution. En effet, la pollution accumulée sur l'extérieur de la porcelaine peut modifier : a) la répartition de la tension le long de la colonne de ZnO, b) le courant traversant la colonne de ZnO dû au couplage capacitif, ainsi la puissance dissipée varie d'une pastille à une autre.

Dans les cas que nous avons traités expérimentalement les effets précédents sont négligeables et les puissances déterminées expérimentalement peuvent être utilisées sans commettre une erreur importante (<10%, [77]).

Dans le logiciel de calcul, la puissance moyenne dissipée par une pastille et le courant peuvent être donnés sous deux formes :

a) Sous la forme d'un tableau à double entrée, où la puissance et le courant sont fonction de la température et de la tension appliquée aux bornes de la pastille.

b) Par une équation, où la puissance et le courant sont aussi une fonction de la température et de la tension appliquée.

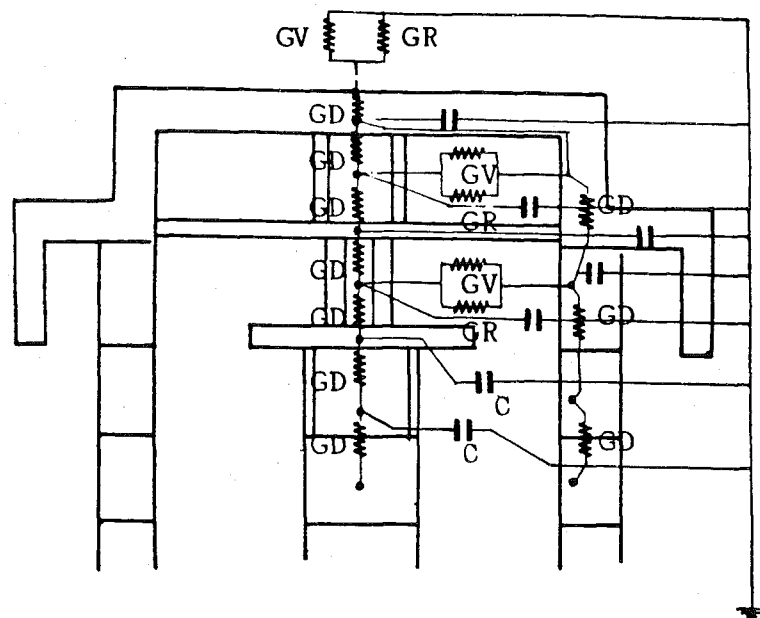
III.8 MODELISATION D'UN PARAFONDRE 77 kV_{eff}

Afin d'appliquer la méthode nodale au parafoudre 77 kV (tension assignée) nous avons divisé le parafoudre en trois parties : le capot supérieur, la portion centrale, le capot inférieur. Chacune des pièces étant représentée par un noeud. Les noeuds sont liés entre eux par des conductances thermiques et la capacité thermique de chaque pièce est reliée au noeud de référence (l'air ambiant). Les modèles ainsi obtenus sont présentés dans la figure III.6. Le modèle de la portion centrale est donné pour un élément de ZnO.

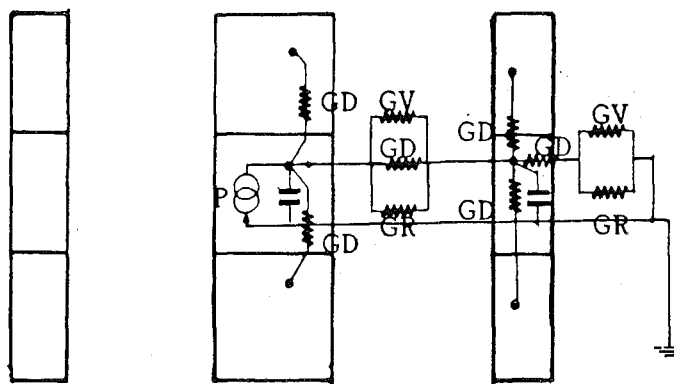
• Modélisation des extrémités

L'extrémité supérieure est constituée de six pièces (voir figure III.7) :

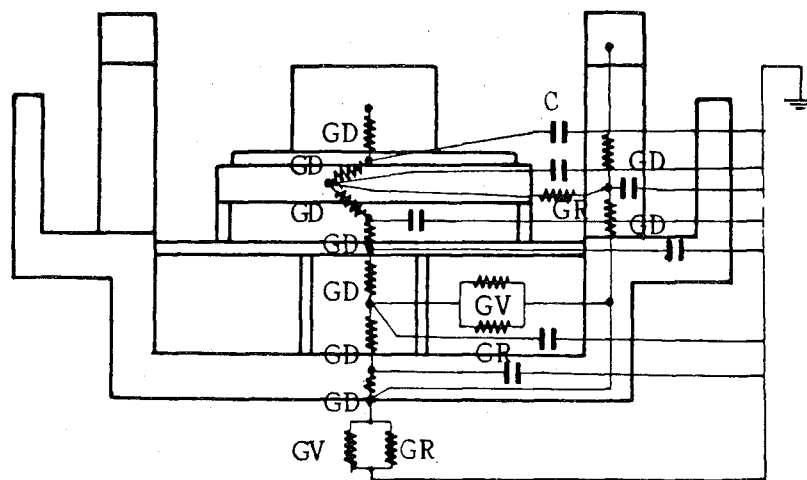
- 1.- le capot supérieur (en aluminium moulé)
- 2.- le cylindre de jonction (prolongation du capot)
- 3.- la membrane de suppression (en acier inoxydable)
- 4.- le ressort à disque (en acier)



a) modèle du capot supérieur



b) modèle de la portion centrale



c) modèle du capot inférieur

- GD : conductance thermique par conduction
- GV : conductance thermique par convection
- GR : conductance thermique par rayonnement
- C : capacité thermique
- P : source de flux de chaleur (pertes)

Figure III.6. Circuit analogique électrique pour l'étude du comportement thermique de parafoudres à ZnO.

5.- une plaque cale (en acier)

6.- un cylindre creux (en aluminium)

Les échanges thermiques entre les différentes pièces de l'extrémité supérieure s'effectuent de la manière suivante :

Entre toutes les pièces contiguës la chaleur se transmet essentiellement par conduction, elles sont donc reliées par une conductance GD . Entre le cylindre de jonction et le capot il pourrait y avoir des échanges par convection et rayonnement, mais ils sont négligeables car ils ont des températures très proches.

Entre le capot et la membrane les échanges par convection et rayonnement sont aussi négligeables car, même s'il existe un écart de température, il est trop faible pour qu'il se produise des échanges thermiques par convection et radiation significatifs.

Entre la porcelaine et l'ensemble des trois pièces (ressort, plaque et espacer) l'écart de température, dans certains cas, pourrait être appréciable, et la convection et le rayonnement pourraient être présents. Nous les représentons donc par une conductance par rayonnement GR en parallèle avec une conductance par convection GV . Enfin, entre la surface extérieure du capot et l'air ambiant, les échanges thermiques se réalisent par convection et par rayonnement. La figure III.6.a donne le modèle thermique complet pour l'extrémité supérieure.

La structure de l'extrémité inférieure est donnée dans la figure III.8. Le modèle thermique de l'extrémité inférieure (figure III.6.c) a été obtenu d'une manière analogue à celui de l'extrémité supérieure.

• Modélisation de la portion centrale

La portion centrale est constituée de la colonne centrale, de la porcelaine en face de la colonne et de l'espace d'air entre la porcelaine et la colonne de ZnO. La portion centrale est discrétisée en tranches de hauteur égale à celle d'un bloc de ZnO. Les échanges de chaleur dans le modèle peuvent s'effectuer dans la direction axiale ou radiale. Le flux de chaleur dans la direction axiale s'effectue par conduction entre les tranches contiguës; bloc-bloc, porcelaine-porcelaine. Dans la direction radiale, les

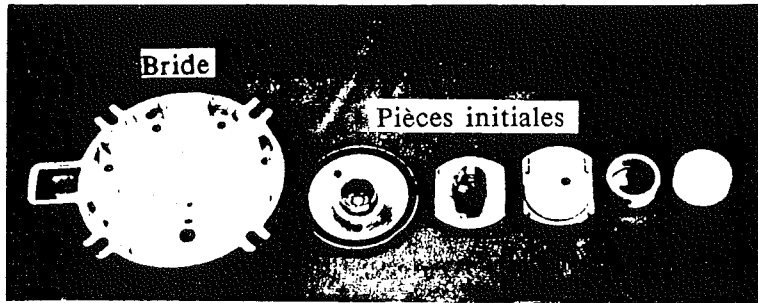


Figure III.7. Constitution du capot supérieur du parafoudre 77 KVeff.

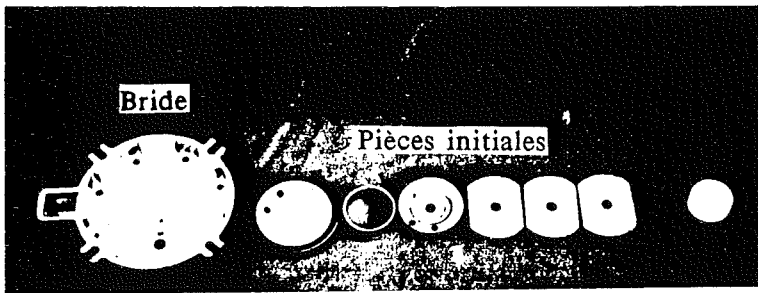


Figure III.8. Constitution du capot inférieur du parafoudre 77 KVeff.

échanges thermiques ont lieu par conduction, convection et rayonnement, dans l'espace entre les blocs et la porcelaine. De plus, la surface extérieure de la porcelaine transmet de la chaleur à l'air ambiant par convection et rayonnement. Le modèle obtenu est donné à la figure III.6.b.

Les échanges thermiques par convection naturelle entre la colonne de ZnO et la porcelaine sont très dépendants de l'écartement entre les deux surfaces, et n'auront pas lieu pour des écarts très faibles, de l'ordre de 1cm.

• Utilisation du logiciel

Le logiciel ASTEC3 a été utilisé pour simuler le comportement thermique et électrique de trois cas :

- Régime permanent ;
- Application d'un choc énergétique suivi d'un refroidissement hors tension ;
- Application d'un choc énergétique suivi d'un refroidissement sous tension.

Le régime permanent a été assimilé à un régime continu (cf. III.5), le logiciel résout le système thermique-électrique pour une température ambiante et un niveau de tension donné. Pour le refroidissement hors tension les conditions initiales sont le résultat d'un échauffement adiabatique ou non adiabatique. Dans les deux cas les conditions initiales (Q) sont donné sous la forme :

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (3.21)$$

où ΔT est l'élevation de température initiale et C la capacité thermique du volume considéré. Le logiciel résout alors la décharge du système.

Le cas du refroidissement sous tension est étudié en séparant le choc énergétique du refroidissement sous tension en deux régimes transitoires. Le premier correspond à la charge des capacités thermiques des pièces du parafoudre (céramiques, porcelaine, capots) par une source de courant. Le seconde correspond à la décharge du système, le parafoudre étant soumis à une température ambiante et une tension donnée.

Dans le logiciel l'élévation de température (ΔT) créée par un choc de courant (SE) est donné sous la forme :

$$\Delta T = SE \cdot t/C \quad (3.22)$$

où t est le temps d'application du choc et C la capacité thermique des céramiques ZnO.

Un exemple de résultats de calcul est donné à la figure III.9. On observe qu'en régime permanent le parafoudre 77 kVeff présente des températures supérieures sur l'extrémité supérieur par rapport à celles de l'extrémité inférieure, ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

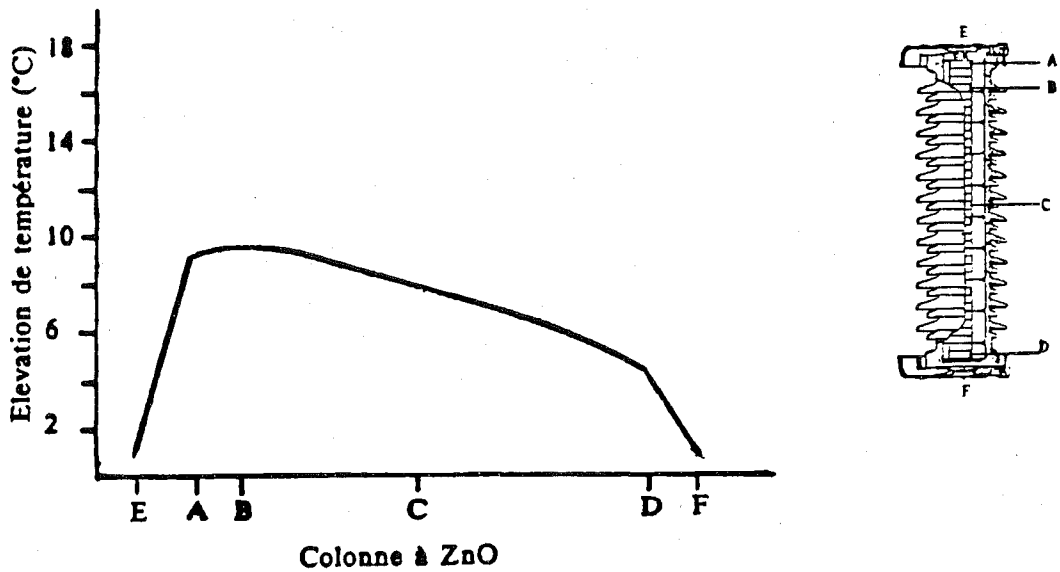


Figure III.9 Exemple de la répartition de température calculée par le logiciel ASTEC 3 sur un parafoudre de 77 kVeff en régime permanent. V = 92 kVeff.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle thermique-électrique développé pour étudier le comportement des parafoudres. Le développement de ce modèle est relativement complexe, car il tient compte de la non-linéarité de la caractéristique électrique des céramiques et de la non-linéarité des phénomènes thermiques, ainsi que du couplage des phénomènes électriques et thermiques lors du fonctionnement des parafoudres.

Le problème thermique a été résolu en développant un circuit électrique équivalent qui prend en compte toutes les non-linéarités y compris la convection et le rayonnement.

Le modèle permet d'étudier le comportement des parafoudres aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire (foudre...).

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE ET VALIDATION DU MODELE

Introduction

Afin de valider le modèle électrique et le modèle thermique développés dans le CHAPITRE III, nous avons effectué un grand nombre d'essais sur le parafoudre 77 kVeff. L'étude expérimentale consiste à mesurer la répartition de température dans tout l'ensemble du parafoudre, sous différentes conditions d'essai; régime transitoire et régime permanent. La température est mesurée sur des points représentatifs de pièces qui constituent le parafoudre; porcelaine, colonne de ZnO et capots.

Pour mesurer l'évolution de la température des blocs dans le temps , on est confronté à trois problèmes principaux :

- 1.- Le choix de la méthode de mesure de température
- 2.- La précision de l'équipement utilisé
- 3.- Les limitations des installations du laboratoire.

Dans les paragraphes qui suivent nous développerons ces points, nous donnerons aussi les caractéristiques du matériel utilisé ainsi que la procédure de mesure. Ensuite nous analyserons les résultats expérimentaux pour connaître les paramètres qui déterminent le comportement thermique. Enfin, nous ferons une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux calculés.

IV.1 MATERIEL UTILISE

IV.1.1 Choix de la méthode de mesure de température

Pour mesurer la température sur des pièces qui ne sont pas sous tension, l'utilisation de thermocouples est satisfaisante. Mais lorsqu'on doit mesurer la température sur des pièces sous tension, les thermocouples ne peuvent plus être utilisés car ils présentent une liaison galvanique. Sur le marché, on trouve d'autres dispositifs qui ne présentent pas cet inconvénient, par exemple la caméra infrarouge et les fibres optiques. Dans notre cas, l'utilisation des fibres optiques est la méthode la mieux adaptée. En effet, les fibres optiques nous permettent d'avoir accès, sous tension, à n'importe quel point du parafoudre ; il suffit de disposer du nombre de fibres optiques nécessaires.

IV.1.2 Précision de l'équipement de mesure de température

En régime permanent, quand le parafoudre est soumis à sa tension de service, les écarts de température entre les blocs de ZnO et l'atmosphère sont très faibles ($\leq 4^{\circ}\text{C}$) et, encore plus faibles entre les blocs eux mêmes [85].

En régime transitoire, après l'application d'un choc énergétique, la température des blocs varie rapidement.

On a donc besoin d'un appareil de mesure et de capteurs de mesure qui, d'une part, aient un temps de réponse très court pour suivre l'évolution de la température en régime transitoire, et d'autre part une très bonne précision, pour pouvoir déterminer les écarts de température entre blocs adjacents. Nous pourrions ainsi déterminer à tout instant la température réelle des blocs.

Pour mesurer de la température nous avons utilisé le thermomètre optique 1100 ASEA ; ses caractéristiques ainsi que celles des fibres optiques sont données plus loin.

IV.1.3 Caractéristiques du matériel utilisé

L'ensemble du matériel utilisé est présenté dans la figure IV.1. Les caractéristiques du matériel sont données ci-dessous :

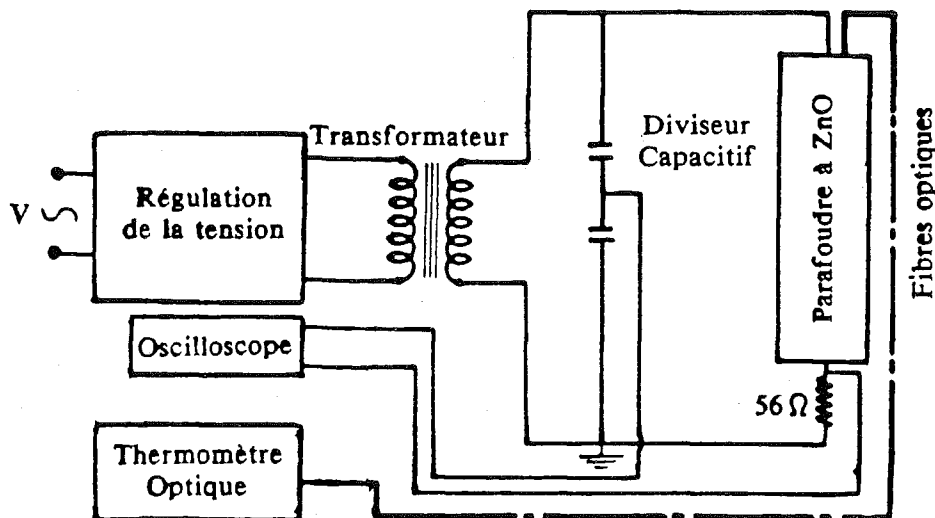


Figure IV.1 Schéma expérimental utilisé pour mesurer la répartition de température dans les parafoudres à ZnO.

Transformateur

Tension du primaire 220 V

Tension du secondaire 100 kV

Puissance 15 kVA

Monophasé

50 Hz

Autotransformateur

Autotransformateur curseur

Monophasé

Utilisation 0 - 260 V

Courant 40 A

50 Hz

Diviseur de tension capacitif

Rapport 1000 / 1

500 pf \pm 5 %, Essai 400 kV 50 Hz, Service 135 kV 50 Hz, Temp. -40°C -> +70°C.

500 nf, 425 V

Thermomètre optique

Gamme 0-200°C

Résolution 0,1°C

Précision entre \pm 1°C et \pm 3°C

Lecture de température 1 sec, indépendante du nombre de voies.

Sortie digitale et analogique

Fibres optiques

Diamètre 100 μ m

Longueur maximale par voie 500 m

Oscilloscope

Bande passante 20 MHz

Temps/div 0,5 -> 200 ms

2 voies

IV.1.4 Limitations des installations du laboratoire

Le parafoudre étudié est en réalité une unité d'un parafoudre 192 kV, composé lui-même de deux unités. L'élément de parafoudre utilisé est constitué de 35 pastilles, dont la tension nominale de 3,1 kV par pastille. Le parafoudre a donc une tension nominale de 77 kV.

Les essais en régime permanent sont assurés par un transformateur élévateur de tension de 220 V/ 100 kV dont la puissance nominale est de 15 kVA. On peut noter que pour simuler un choc énergétique de courte durée (qq msec) la puissance fournie par le transformateur n'est pas suffisante pour élever brutalement la température des céramiques. Cependant, si on diminue la tension nominale du parafoudre, en diminuant

le nombre de pastilles, il est possible d'élever la température des pastilles d'une centaine de degrés en 3 ou 4 minutes (parafoudre avec 32 pastilles).

IV.2 MONTAGE EXPERIMENTAL

Le montage expérimental utilisé pour les essais en laboratoire sur le parafoudre est présenté par le schéma de la figure IV.1. La mesure de la température est assurée par un thermomètre optique multivoie, d'une précision comprise entre $\pm 1^{\circ}\text{C}$ et $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [86]. La mise sous tension s'effectue à travers un transformateur élévateur de tension de 220 V/ 100 kV et d'une puissance de 15 kVA.

La répartition de température en régime permanent et transitoire a été observée sur la colonne de ZnO, les capots et la porcelaine. Parallèlement la température ambiante a été relevée.

IV.2.1 Points de mesure de température

La figure IV.2 montre l'installation de fibres optiques dans le parafoudre 77 kVeff. Les points de mesure choisis sont les plus représentatifs de la répartition de température [85]. En effet, les points de mesure A et D permettent de connaître l'influence des capots sur la température des céramiques proches des capots. Les points B et C permettent de

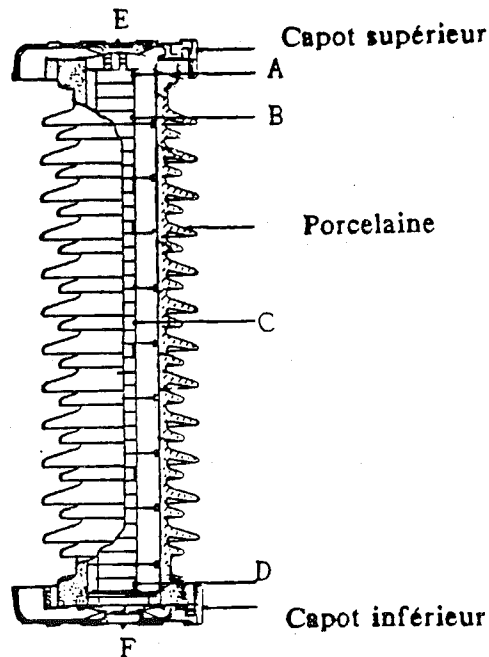


Figure IV.2 Points de mesure sur le parafoudre de 77 K Veff.

déterminer si la répartition est asymétrique ou symétrique, ainsi que les températures maximales dans les deux cas. Les points sur les capots, E et F, déterminent la grandeur des gradients thermiques entre les extrémités de la colonne de ZnO et les capots. Enfin le point G nous donne l'évolution de la température à l'extérieur de la porcelaine.

IV.2.2 Procédure des essais réalisés

En régime permanent : après les avoir étalonné, chaque fibre optique a été placée aux différents points de mesure. Nous avons appliqué la tension nominale du parafoudre ou une tension supérieure, et nous avons observé l'évolution de la température de tous les points de mesure sur la colonne de ZnO pendant au moins une durée de 5 heures, temps suffisant pour atteindre la stabilité thermique dans le parafoudre.

En régime transitoire : pour simuler un choc énergétique nous avons appliqué une tension très élevée au parafoudre, afin d'élever rapidement la température des pastilles. Après avoir atteint une élévation de température d'environ 100°C sur les blocs les plus chauds, nous avons coupé ou diminué la tension, selon le type de refroidissement étudié : refroidissement naturel ou refroidissement sous la tension de service. Le temps d'échauffement a été de 3 ou 4 minutes; la décroissance de la température a été observée pendant au moins 4 heures.

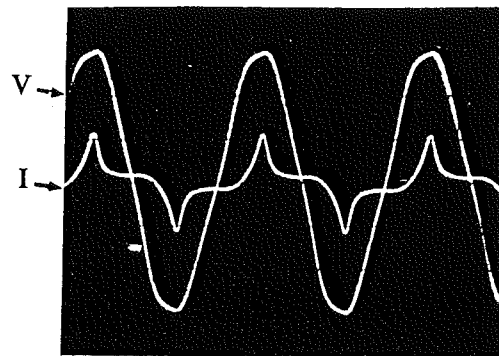
La figure IV.3 donne un exemple de la tension et le courant aux bornes du parafoudre pour les essais en régime permanent et transitoire.

IV.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CALCULES

Les séries d'essais réalisés sur le parafoudre 77 kV_{eff} se décomposent en deux groupes :

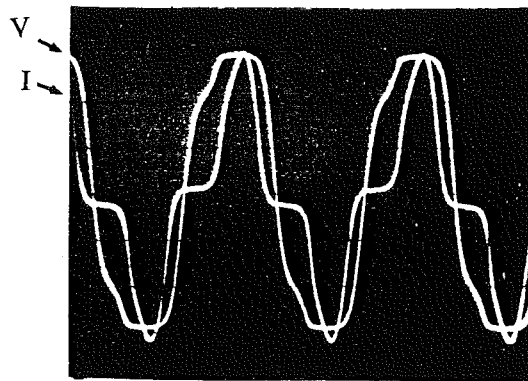
- Essais en régime permanent
- Essais en régime transitoire

Les essais en régime permanent permettent de vérifier les conductances thermiques de la modélisation du parafoudre, données dans la figure III.7.



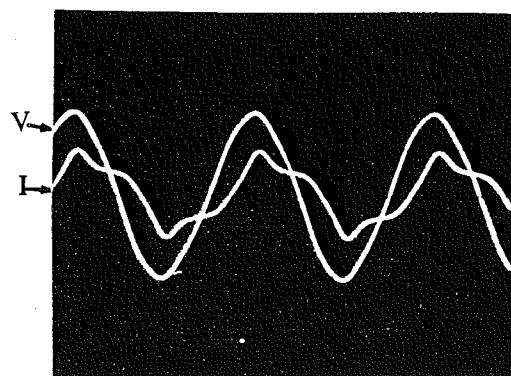
Tension 50 KV/div
Courant totale 9 mA/div

a) avant l'écrêtage de la tension



Tension 50 KV/div
Courant totale 18 mA/div

b) pendant l'écrêtage de la tension



Tension 50 KV/div
Courant totale 0.9 mA/div

c) pendant le refroidissement

Figure IV.3 Exemple des formes d'ondes de courant et tension au bornes du parafoudre de 77 K_Veff

Les essais en régime transitoire permettent de vérifier les capacités thermiques des pièces modélisées et l'influence de la tension de service sur la répartition de la température, grâce à la comparaison des essais de refroidissement hors tension et sous tension. En outre, les résultats du refroidissement hors tension permettent de séparer les paramètres thermiques et électriques. Ainsi, il est possible d'étudier séparément le comportement thermique du comportement électrique.

IV.3.1 En Régime Permanent

Pour montrer l'évolution de la répartition de température en fonction de la tension appliquée, nous avons choisi trois cas :

Cas 1 : à la tension de service du parafoudre,

Cas 2 : à une tension supérieure à sa tension de service,

Cas 3 : à une tension proche de sa tension de coude.

A la tension de service du parafoudre, les écarts de température mesurés entre la colonne de ZnO et l'air ambiant ne sont pas importants (figure IV.4), l'écart maximum mesuré à été de 4°C sur l'extrémité supérieure. Cependant, nous pouvons observer une répartition de température asymétrique; en effet, les blocs sur l'extrémité supérieure ont une température légèrement supérieure à celle des éléments sur l'extrémité inférieure. Nous pouvons aussi observer des gradients de température importants entre la surface extérieure de capots et les blocs les plus proches. les gradients peuvent être mieux appréciés à des tensions supérieures.

Pour des tensions plus élevées que la tension de service, cas 2 et cas 3 (figure IV.5 et figure IV.6), l'asymétrie de la répartition de température sur la colonne de ZnO, et les gradients de température présents sont appréciés plus facilement. Les résultats obtenus sont dus fondamentalement à l'influence de trois paramètres :

a) Les caractéristiques thermiques des pièces utilisées dans la construction du parafoudre, en particulier celles des pièces qui font partie des capots, jouent un rôle important dans la répartition de température sur la colonne de ZnO. En effet, les pièces qui constituent les capots présentent une résistance thermique très élevée, due en grade

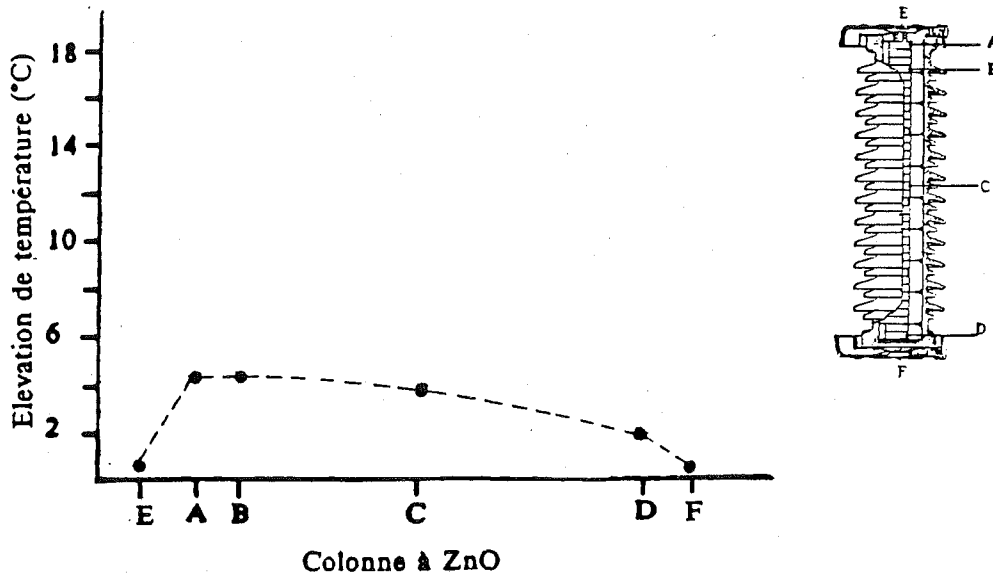


Figure IV.4 Répartition de température mesurée en régime permanent sur la colonne à ZnO à la tension de service (V_1) du parafoudre. Température ambiante : 21°C

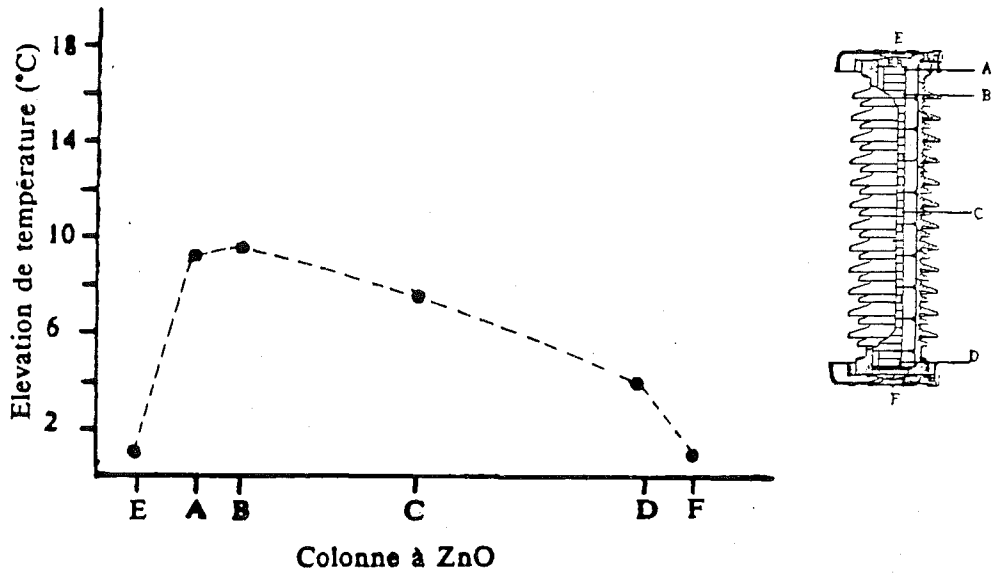


Figure IV.5 Répartition de température mesurée en régime permanent sur la colonne à ZnO à une tension $V_2 > V_1$. Température ambiante : 23°C

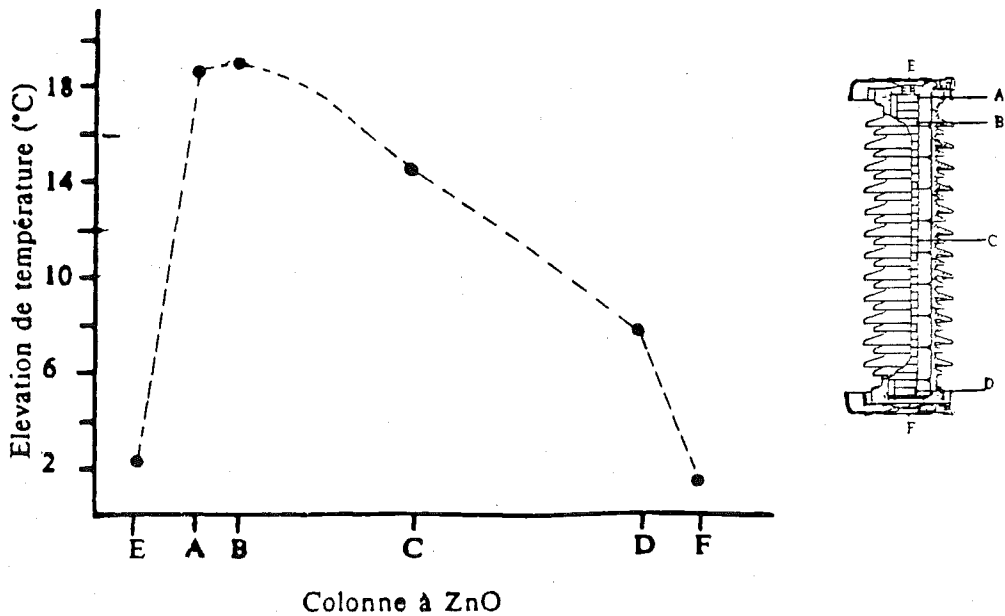


Figure IV.6 Répartition de température mesurée en régime permanent sur la colonne à ZnO à une tension $V_3 > V_2$. Température ambiante : 22°C

partie aux faibles surfaces de contact entre les pièces, empêchant l'évacuation de la chaleur dans la direction axiale entre les pastilles et les capots. Cet effet est plus prononcé sur l'extrémité supérieure, dû principalement à la mauvaise conductivité thermique du ressort.

b) Un deuxième facteur, d'influence plus faible, est l'effet de la convection naturelle entre la colonne de ZnO et la porcelaine. Elle peut être la cause d'une élévation de la température des blocs sur l'extrémité supérieure par rapport à celle des blocs situés sur l'extrémité inférieure, créant une répartition de température asymétrique sur la colonne de ZnO.

c) Prise en compte de la répartition de tension capacitive en régime permanent et des conditions des essais en laboratoire, pour des températures faibles.

De la combinaison des trois points précédents, il résulte une température plus élevée sur l'extrémité supérieure de la colonne par rapport à l'extrémité inférieure. Cet effet s'accroît avec l'augmentation des écarts de température, comme il est indiqué aux figures IV.4 - IV.6.

Il est important pour la détermination de la stabilité thermique du parafoudre de connaître les régions où les blocs de ZnO sont soumis aux contraintes thermiques les plus sévères. En effet, dans l'étude de la stabilité thermique du parafoudre, la température de toutes les pastilles peut être représentée par une seule température; soit par la température moyenne, soit par la température du bloc le plus chaud [48,87].

IV.3.2 En Régime Transitoire

Deux types d'essais ont été étudiés :

Cas 1 : application d'un choc énergétique suivi d'un refroidissement hors tension, appelé dans la suite du texte refroidissement naturel.

Cas 2 : application d'un choc énergétique suivi d'un refroidissement sous tension.

La procédure des essais des deux cas a été décrite précédemment.

• Refroidissement naturel

La figure IV.7 donne la répartition de la température mesurée pour le refroidissement hors tension des points A,B,C,D. Nous constatons que la température des éléments sur toute la partie centrale et celle des éléments sur l'extrémité supérieure ont des caractéristiques de refroidissement similaires; seule l'extrémité inférieure a une caractéristique différente.

L'extrémité supérieure et la partie centrale du parafoudre ont des températures très proches du fait de la très faible quantité de chaleur évacuée par conduction dans la direction axiale vers le capot supérieur. De ce fait, la plupart de la chaleur est dissipée dans la direction radiale, entre les blocs et la porcelaine.

Sur l'extrémité inférieure, la chaleur des pastilles est dissipée dans la direction axiale et radiale. Dans la direction radiale, la chaleur est évacuée de la même manière que dans la partie centrale, et dans la direction axiale par conduction vers le capot.

Avec le refroidissement hors tension il est possible de déterminer la constante de dissipation de chaleur du parafoudre (W/°C-bloc) à partir de l'équation :

$$K = C / \tau \quad (4.1)$$

où C est la capacité thermique du bloc de ZnO (J/deg) et τ la constante de temps du parafoudre (s).

La quantité de chaleur évacuée par le parafoudre est obtenue à partir de :

$$\Phi = K (T_{ZnO} - T_a) \quad (4.2)$$

où T_{ZnO} est la température moyenne des éléments de ZnO (°C), et T_a est la température de l'air ambiant (°C).

La constante de temps de refroidissement du parafoudre (τ) peut être obtenue à partir de la figure IV.8, où τ varie entre 2640 sec et 3840 sec. Si nous prenons $\tau = 3240$ sec, K sera égale à 0,054 W/°C-bloc. Pour un parafoudre de 35 pastilles

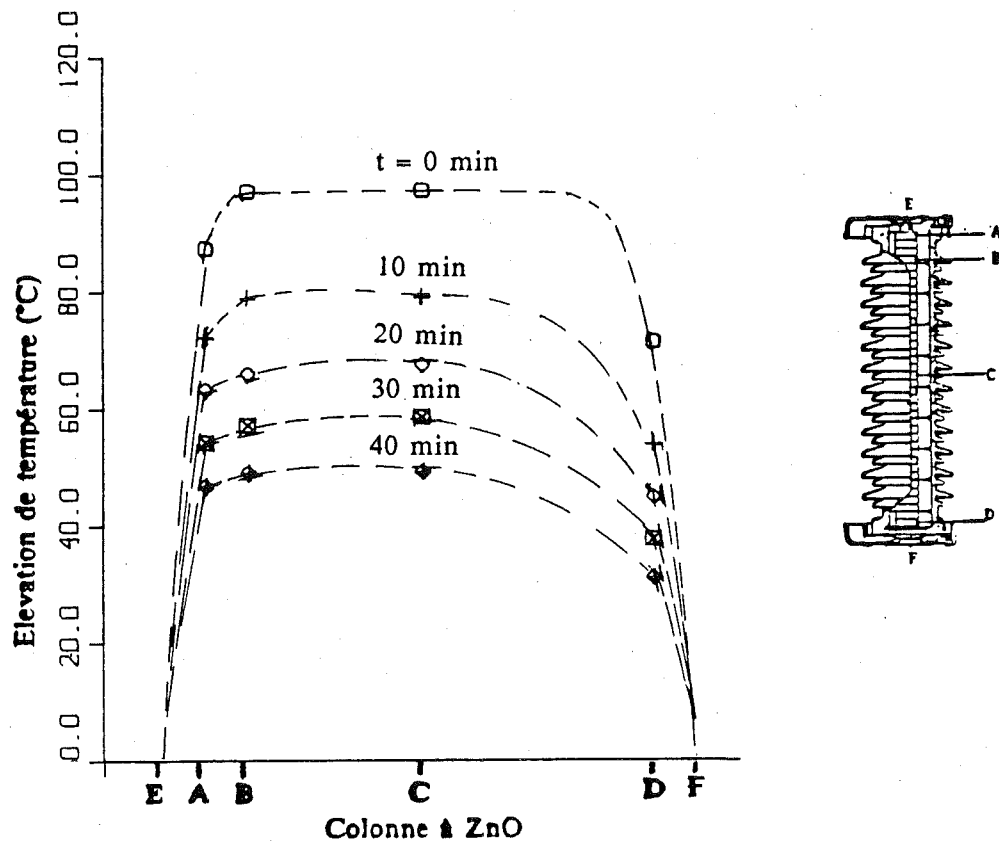


Figure IV.7 Répartition de température mesurée pour le refroidissement hors tension sur la colonne à ZnO. Température ambiante : 18°C

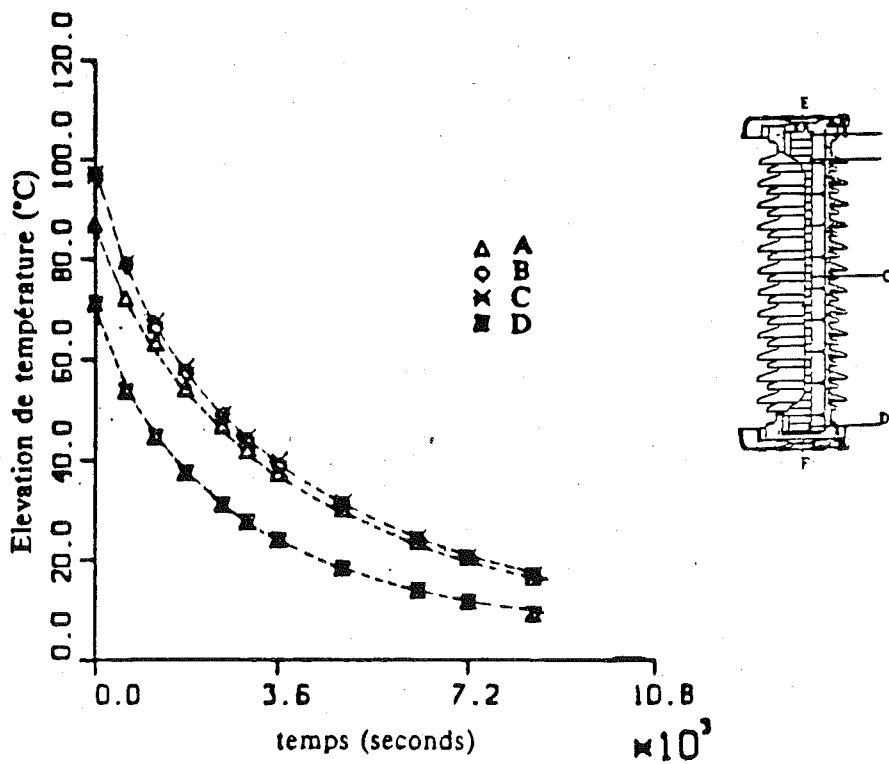


Figure IV.8 Caractéristique T .vs. t de refroidissement hors tension mesurée sur la colonne à ZnO. Température ambiante : 20°C

$K = 1,90 \text{ W/}^\circ\text{C}$, cela veut dire que du point de vue thermique, le parafoudre peut dissiper 1,90 watts par degré d'élévation de température de la colonne de ZnO. Pour des valeurs supérieures, l'emballement thermique peut se produire. Par exemple, si le parafoudre reçoit un choc d'énergie qui élève de 150°C la température de la colonne de ZnO par rapport à la température ambiante, le parafoudre sera capable d'évacuer 285 watts. Si à ce niveau de température la puissance dissipée par la colonne de ZnO par effet joule est supérieure à 285 watts, il est très possible que l'emballement thermique ait lieu.

Il faut remarquer que du fait que la plupart de la chaleur est dissipée dans la direction radiale entre la colonne de ZnO et la porcelaine, K est très dépendante de la distance entre la colonne de ZnO et la surface intérieure de la porcelaine, ainsi que des caractéristiques thermiques de la porcelaine.

• Refroidissement sous tension

Dans le refroidissement sous tension, la répartition de température obtenue est très similaire à celle du refroidissement naturel (figure IV.9). Par conséquent, l'évacuation de la chaleur dans tout le parafoudre se réalise comme il a été indiqué pour le refroidissement naturel. L'application de la tension de service apporte un léger échauffement des blocs provoquant une augmentation de la constante du temps de refroidissement du parafoudre (figure IV.10).

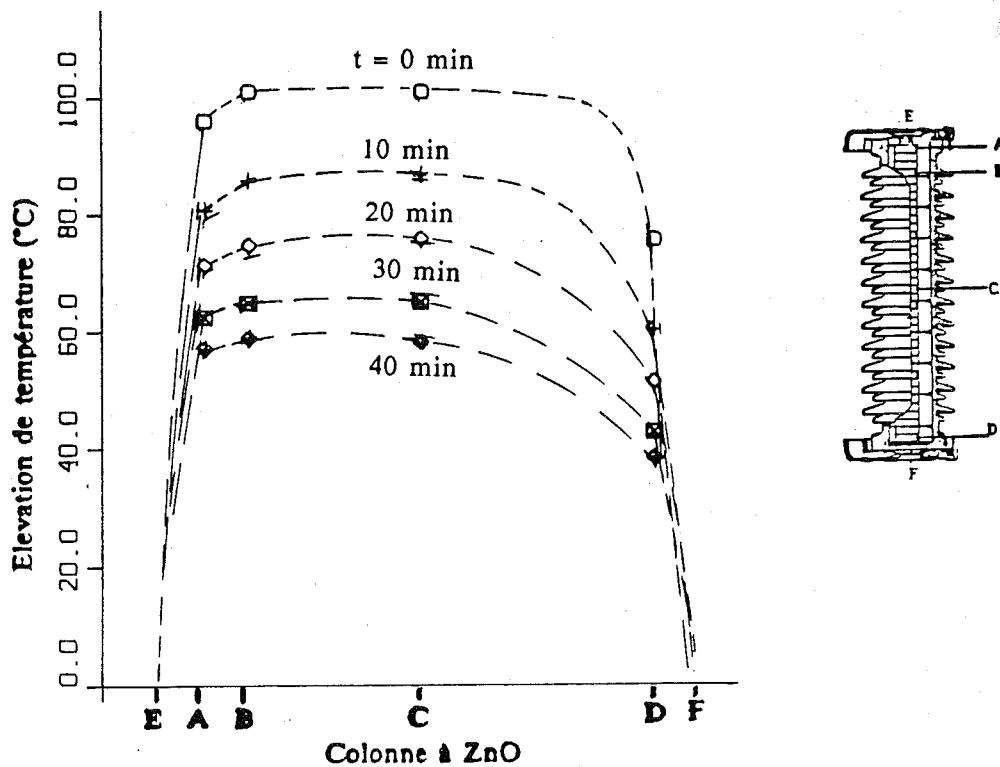


Figure IV.9 Répartition de température mesurée pour le refroidissement sous tension sur la colonne à ZnO. Température ambiante : 18°C

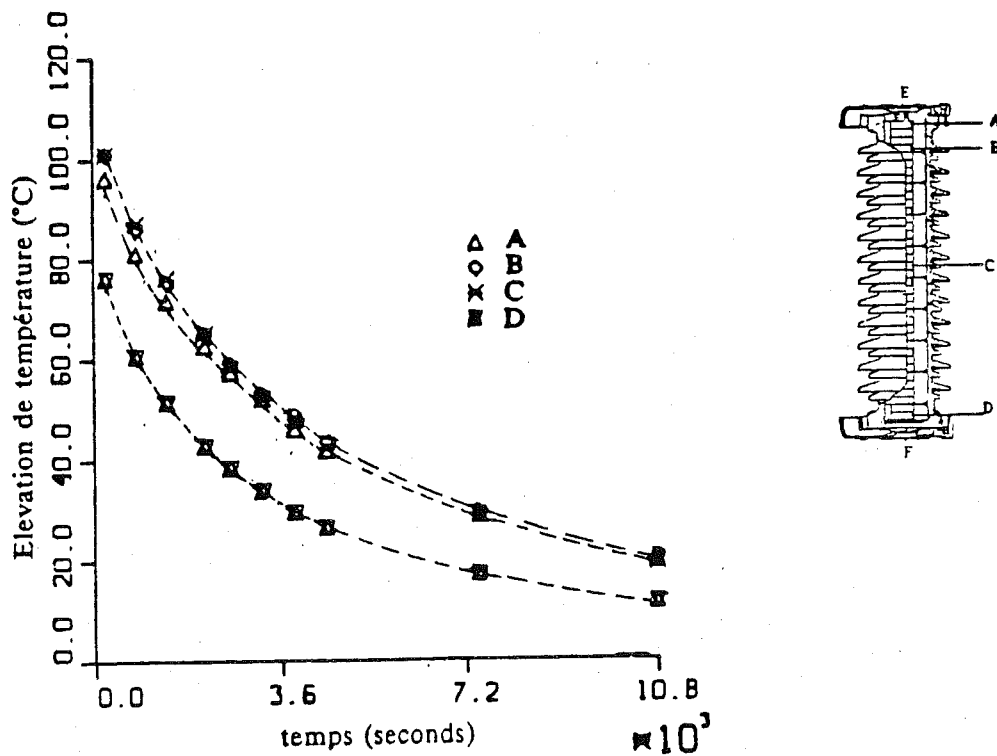
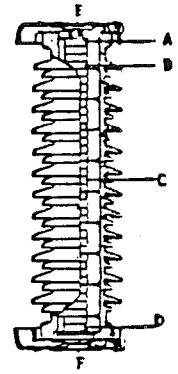
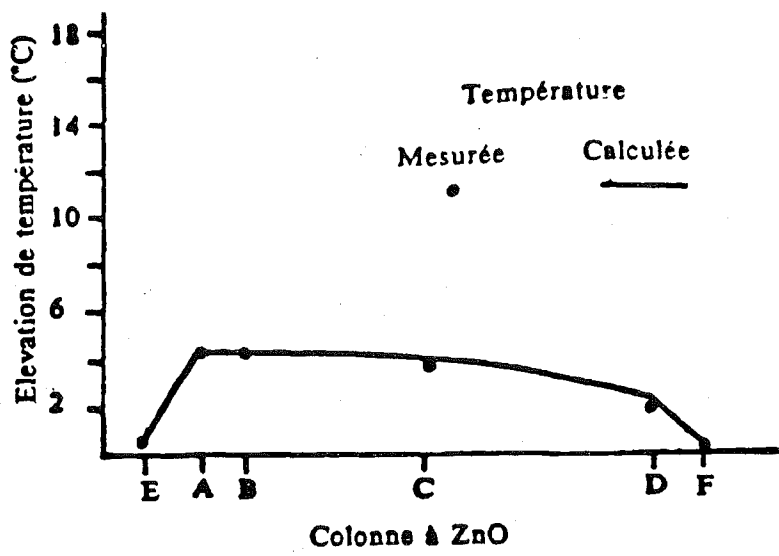


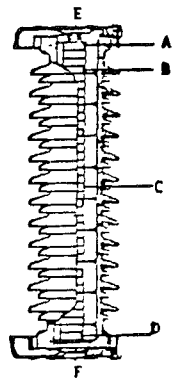
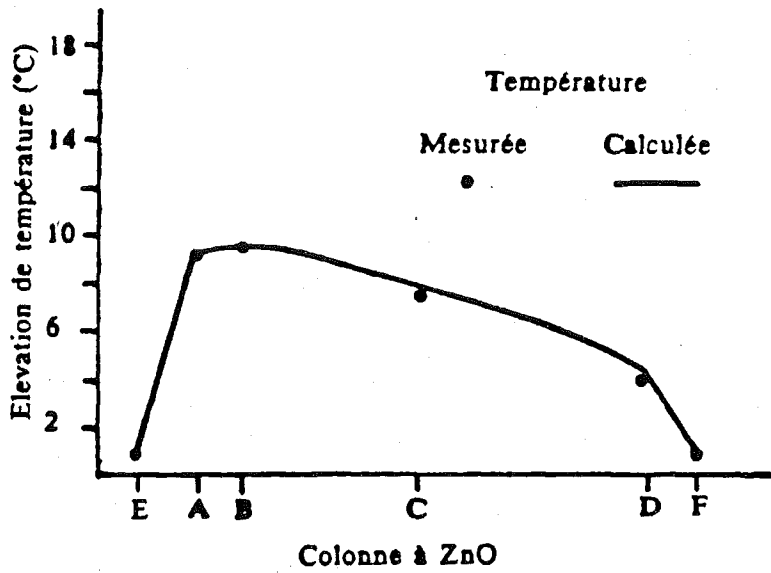
Figure IV.10 Caractéristique T vs. t de refroidissement sous tension mesurée sur la colonne à ZnO. Température ambiante : 18°C

IV.3.3 Comparaison des résultats mesurés et calculés

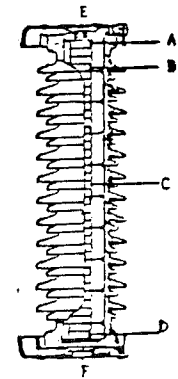
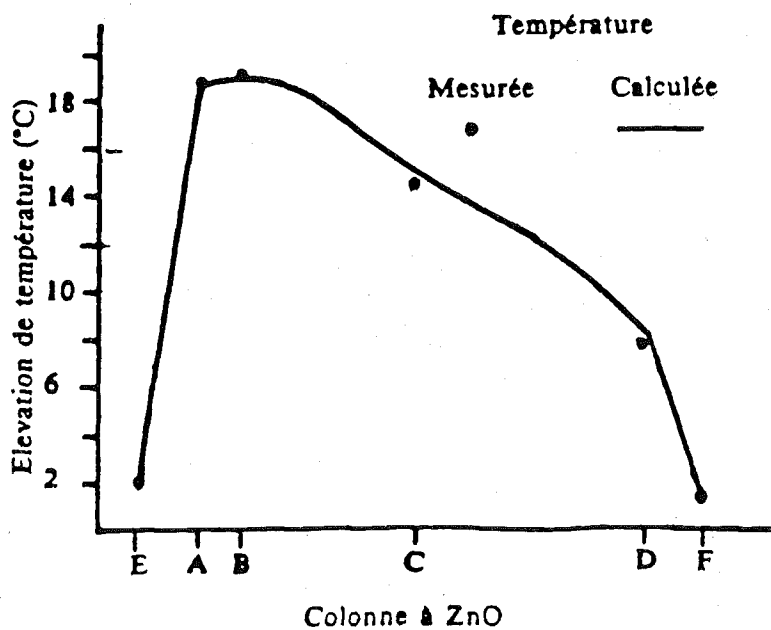
La comparaison de la répartition de température calculée et mesurée pour le régime permanent (figure IV.11) et transitoire hors tension (figure IV.12) et sous tension (figure IV.13) montre bien la bonne relation entre le calcul et l'expérimentation. Cela est dû, en grande partie, à la modélisation détaillée de chacune des pièces qui constituent les capots, ainsi qu'aux conditions initiales considérées. En effet, pour représenter un choc énergétique une tension élevée avait été appliquée pendant une durée d'au moins 3 minutes, temps pendant lequel la température des pièces des capots augmentait, surtout celle des pièces qui était en contact direct avec les pastilles situées aux extrémités. Par conséquent, sur les extrémités de la colonne de ZnO la température des pastilles est très dépendante de la surface de contact entre les pastilles et les pièces des capots, du volume, de la résistance thermique et de la capacité thermique des pièces qui constituent les capots.



a) A la tension de service du parafoudre (V_1). Température ambiante 21°C

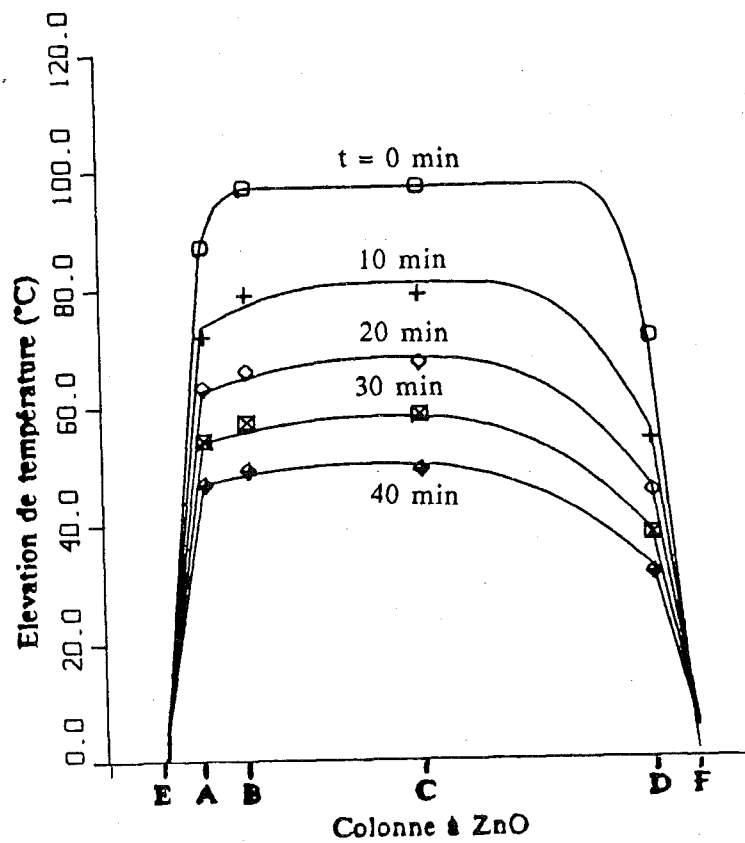


b) A une tension V_2 supérieure à sa tension de service. Température ambiante 23°C



c) A une tension $V_3 > V_2$. Température ambiante 22°C

Figure IV.11 Comparaison des températures calculées et mesurées en régime permanent pour le parafoudre de 77 KVe_{eff}.



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

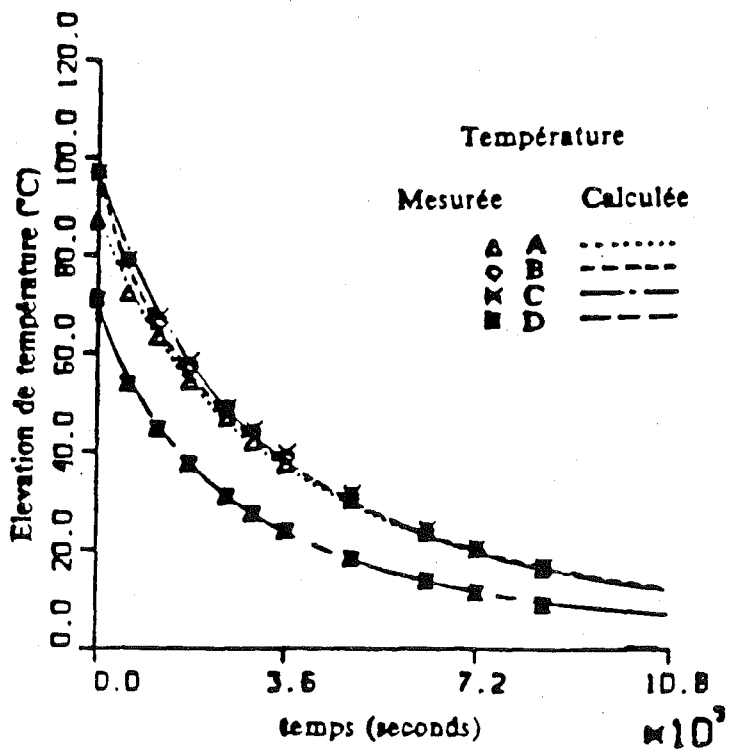
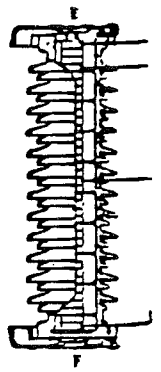
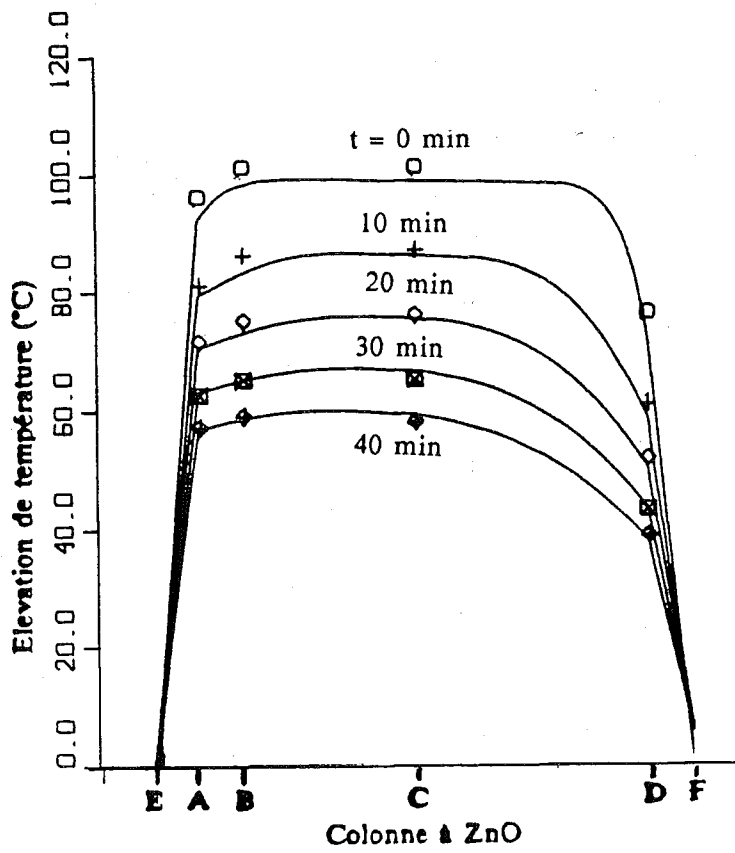


Figure IV.12. Comparaison des températures calculées et mesurées pour le refroidissement hors tension du parafoudre 77 kVeff. Température ambiante 18°C.



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

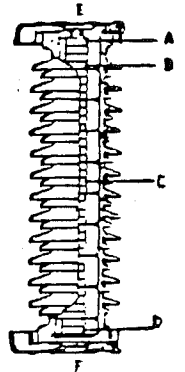
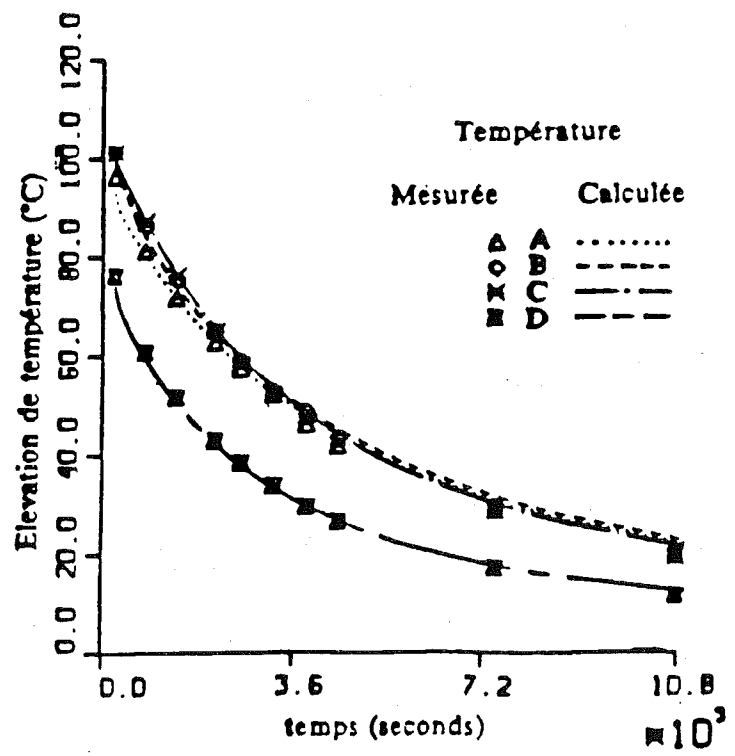


Figure IV.13. Comparaison des températures calculées et mesurées pour le refroidissement sous tension du parafoudre 77 kVeff. Température ambiante 20°C.

CONCLUSION

Afin de vérifier la validité du modèle nous avons effectué de nombreuses expérimentations sur un parafoudre 77 kVeff. Il a été équipé d'un système de mesure de température par fibre optique sur les points d'intérêt (capots, céramiques, porcelaine) pour déterminer la répartition de température dans le parafoudre.

La comparaison des résultats mesurés et ceux donnés par le modèle sont satisfaisants et a permis de valider le modèle développé.

CHAPITRE V

APPLICATION DU MODELE

Introduction

Etant donné que le modèle de la partie centrale du parafoudre est donné pour un élément de ZnO, ce modèle peut être utilisé, sans grande difficulté, pour n'importe quel nombre d'éléments.

A titre d'exemple, nous avons appliqué le modèle à un parafoudre moyenne tension 24 kVeff. D'autre part, nous avons modifié la structure des parafoudres étudiés afin d'augmenter leurs capacités de dissipation de la chaleur. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

V.1 ETUDE D'UN PARAFOUDRE MOYENNE TENSION

L'application du modèle à un parafoudre moyenne tension peut s'effectuer avec une relative simplicité : un petit nombre de céramiques et l'élimination de la convection naturelle à l'intérieur de la porcelaine (dû au faible espace d'air entre la colonne et la porcelaine) rendent le modèle plus simple, et de ce fait, la convergence du modèle a lieu plus rapidement.

V.1.1 Constitution du parafoudre à 24 kVeff

Ce parafoudre est destiné aux réseaux de distribution. Il est constitué de six éléments de ZnO, chacun de 4.1 cm de diamètre total et de 3.1 cm de hauteur. Le

parafoudre 24 kVeff est de plus faible dimension que le parafoudre 77. kVeff (voir figure V.1).

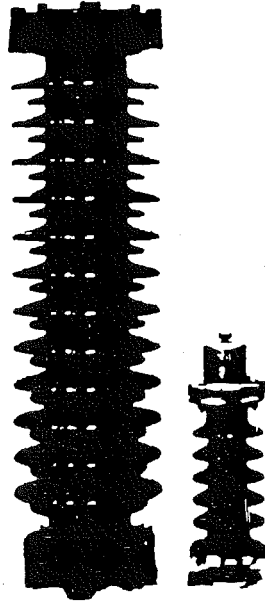


Figure V.1 Parafoudre de 77 KVeff et de 24 KVeff

V.1.2 Modélisation du parafoudre

Les modèles thermiques et électriques pour le parafoudre 24 kVeff sont, de manière générale, les mêmes que ceux obtenus pour le parafoudre 77 kVeff. Néanmoins, étant donné la structure différente de ce parafoudre, il faut réaliser quelques modifications dans le calcul de conductances thermiques.

V.1.3 Calcul de paramètres thermiques

Les paramètres thermiques, tels que les conductances thermiques, sont fonction des dimensions et des caractéristiques thermiques des pièces qui constituent le parafoudre (porcelaine, blocs de ZnO, brides et autres pièces métalliques). En général, dans tout l'ensemble du parafoudre on a les mêmes types d'échanges thermiques que dans le parafoudre 77 kVeff, à l'exception de la convection naturelle entre la colonne de ZnO et la porcelaine. Elle n'a pas lieu, de par les faibles dimensions de l'espace d'air entre

les deux surfaces [78]. La conductance thermique par convection (GV) dans le modèle de la partie centrale (figure III.7) est donc supprimée.

V.1.4 Caractéristiques électriques

Les dimensions d'un bloc déterminent ses caractéristiques électriques : la tension est fonction de la hauteur; le courant admissible est fonction de surface transversale; l'énergie qu'il est capable d'absorber est fonction de son volume.

Les blocs du parafoudre 24 kVeff ont une surface et un volume inférieur à ceux des blocs du parafoudre 77 kVeff, il absorbera donc des énergies et des courants plus faibles, mais en revanche sa tension d'écrêtement est plus élevée. La caractéristique électrique des céramiques utilisées a été déterminée en tenant compte de leurs dimensions et des mesures effectuées au laboratoire.

V.1.5 Essais

Pour valider les résultats obtenus du logiciel avec les paramètres électriques et thermiques correspondants au parafoudre 24 kVeff, nous avons effectué les mêmes types d'essais que ceux réalisés sur le parafoudre 77 kVeff, en régime permanent et en régime transitoire.

V.1.6 Points de mesure

Etant donné la structure et le nombre de blocs dans le parafoudre 24 kVeff, pour obtenir une bonne connaissance de la répartition de température à travers tout le parafoudre, il suffit de mesurer la température sur les blocs aux extrémités (bloc 1 et bloc 6) et sur un bloc central (bloc 3), voir figure V.2.

V.1.7 En régime permanent

La répartition de température en régime permanent a été déterminée pour une tension supérieure à sa tension de service, afin de mieux apprécier son comportement thermique. Les résultats des mesures montrent une répartition de température

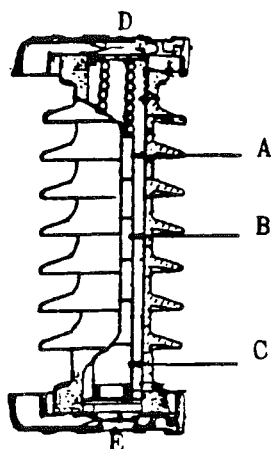
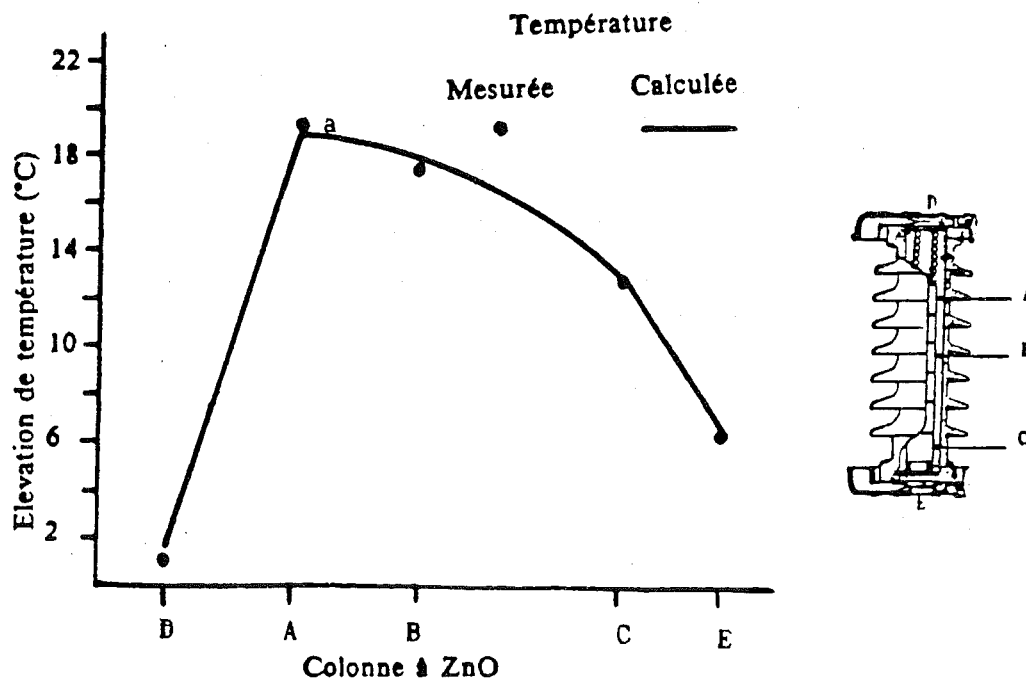


Figure V.2 Points de mesure de température sur le parafoudre de 24 KVe_{eff}

asymétrique, avec un maximum sur l'extrémité supérieure et un minimum sur l'extrémité inférieure (figure V.3). Sur l'extrémité supérieure, le flux de chaleur dans la direction axiale vers le capot est négligeable; de ce fait, la température du capot n'augmente pas. L'extrémité inférieure présente une faible résistance thermique et assure un bon refroidissement des pastilles par conduction thermique. De ce fait, le



Répartition de température mesurée et calculée en régime permanent sur la colonne à ZnO du parafoudre de 24 KVe_{eff} à une tension d'environ 37 KVcrête. Température ambiante : 20°C

gradient de température entre la surface extérieure du capot et le bloc le plus proche est faible.

L'évacuation de la chaleur des blocs s'effectue dans la direction axiale et radiale. Dans la direction axiale, par conduction vers le capot inférieur ; dans la direction radiale, par conduction et rayonnement vers la porcelaine.

V.1.8 En régime transitoire

Pour simuler le choc énergétique, il a suffi cette fois, d'appliquer une tension élevée pendant 50 sec environ. La chute de température dans le parafoudre a été observée pendant 2 h, temps suffisant pour que la colonne de ZnO se refroidisse.

Les résultats expérimentaux et calculés sont analysés ci-dessous :

• Refroidissement naturel

La relation entre les températures mesurées et calculées pour le refroidissement hors tension, est tout a fait satisfaisante (figure V.4). La répartition de la température pendant les premières minutes du refroidissement présente des températures plus élevées sur les pastilles de l'extrémité supérieure par rapport à celles de l'extrémité inférieure. Le gradient de température sur la colonne diminue au fur et à mesure que la colonne se refroidit, jusqu'à l'obtention d'une température uniforme. Les blocs supérieurs ne dissipent pas de chaleur vers le capot, ils transmettent de la chaleur vers les pastilles de l'extrémité inférieure et vers la porcelaine. L'extrémité inférieure se refroidit plus rapidement pendant les 10 premières minutes, grâce à la bonne conductivité et capacité thermique des pièces du capot inférieur.

Le refroidissement du parafoudre 24 kVeff se réalise beaucoup plus rapidement que celui du parafoudre 77 kVeff, de par sa plus faible taille et la meilleure conductivité thermique du capot inférieur. En effet, sa constante de refroidissement est d'environ 1920 sec (figure V.5) contre 2340 sec pour le parafoudre 77 kVeff. La constante de dissipation de la chaleur du parafoudre 24 kVeff est légèrement plus élevée $K_2 = 0,059 \text{ W} / (^\circ\text{C-bloc})$.

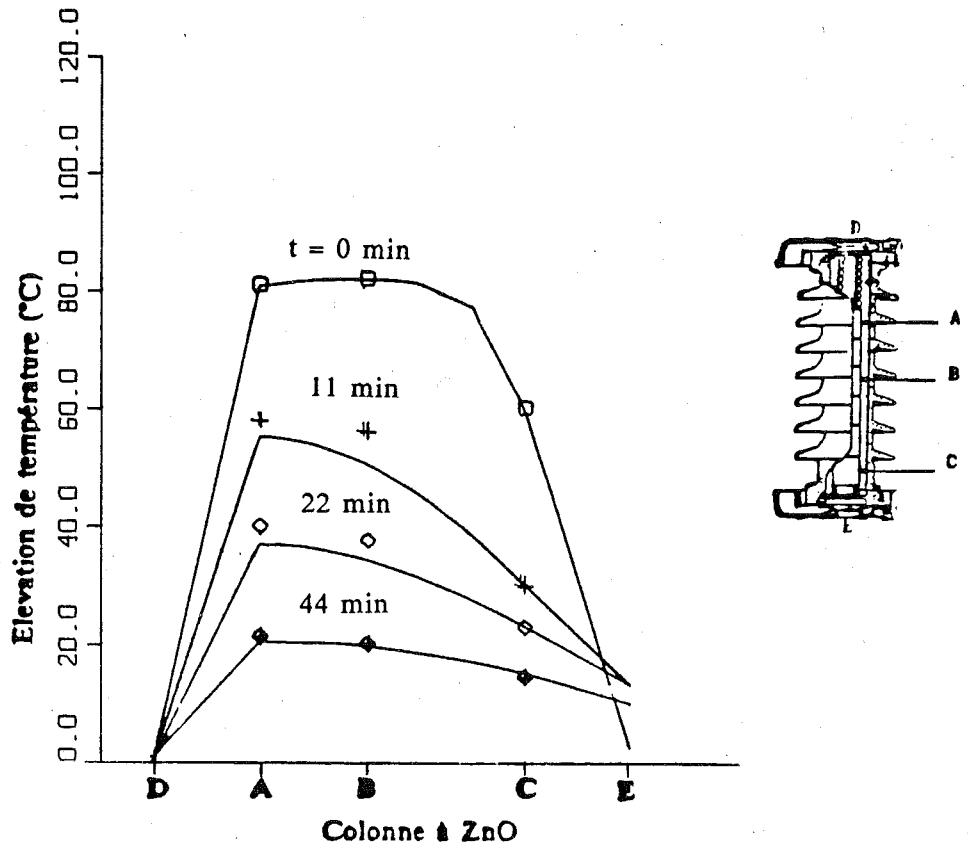


Figure V.4 Répartition de température mesurée et calculée pour le refroidissement hors tension sur la colonne à ZnO du parafoudre 24 K Veff. Température ambiante : 18°C

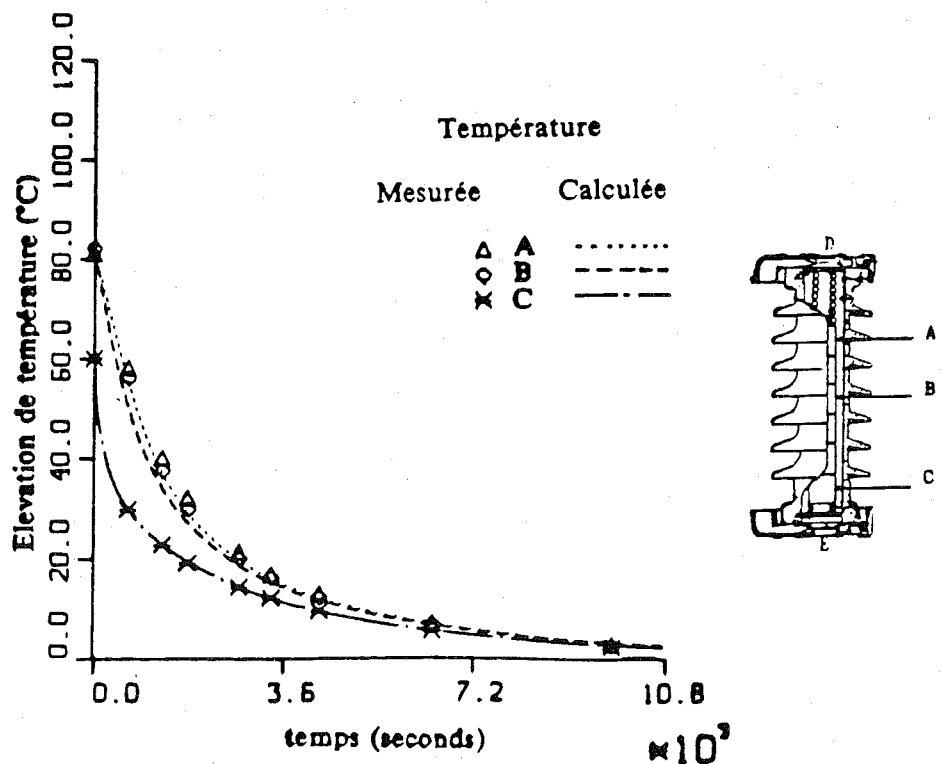


Figure V.5 Caractéristique T vs. t mesurée et calculée du refroidissement hors tension sur la colonne à ZnO du parafoudre 24 K Veff. Température ambiante : 19°C

V.1.9 Comparaison entre les mesures et les calculs

Une fois encore la bonne relation entre le calcul et l'expérimentation est prouvée. Les échanges thermiques dans le refroidissement naturel s'effectuent de la même manière que dans le refroidissement hors tension. Nous constatons que pour ce type de parafoudre, l'application de sa tension de service pendant le refroidissement n'affecte pas son comportement thermique; la constante de refroidissement est très similaire à celle du refroidissement hors tension. Ceci est dû à la négligeable puissance dissipée par le parafoudre 24kVeff, à sa tension de service, mais aussi au petit nombre de pastilles et aux meilleures conditions d'évacuation de la chaleur dans le parafoudre 24 kVeff.

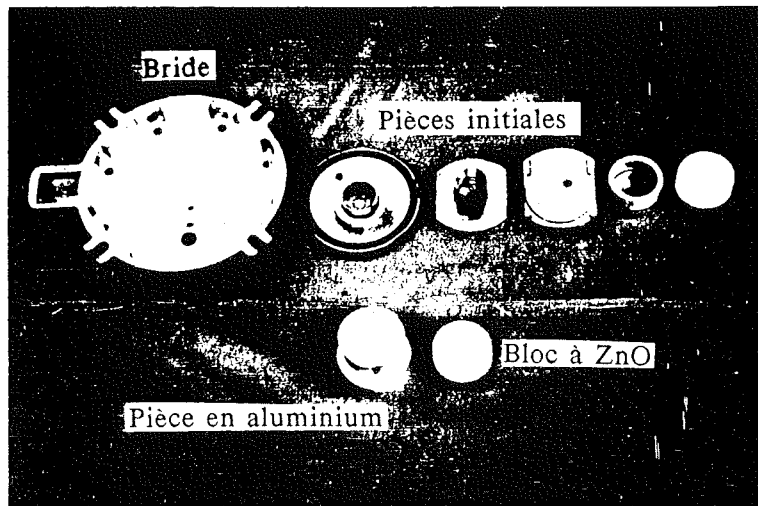
V.2 RECHERCHE DE NOUVELLES STRUCTURES DE PARAFOUDRES

La répartition de température des parafoudres étudiés est très dépendante de leur architecture : si l'architecture des parafoudres est modifiée, leur comportement thermique sera modifié. Nous avons modifié la construction des capots des parafoudres de 77 kVeff et 24 kVeff, pour déterminer l'influence des capots sur la répartition de température sur la colonne de ZnO et sur sa caractéristique de refroidissement.

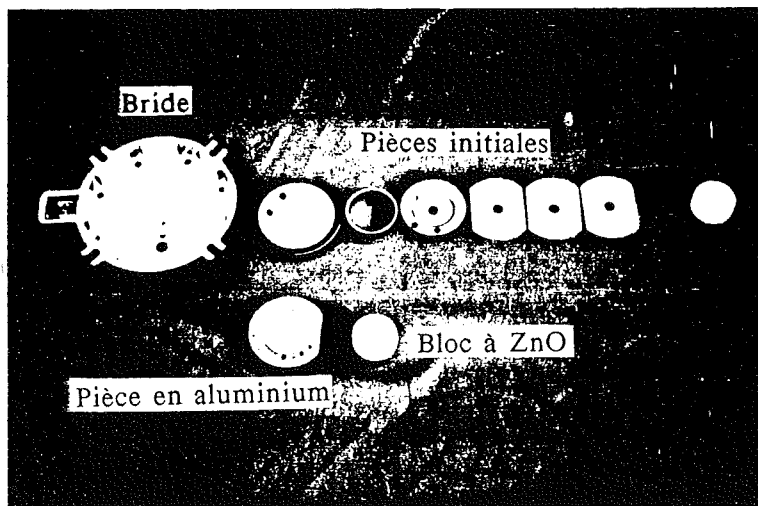
Nous donnerons, premièrement, les résultats obtenus sur le parafoudre 77 kVeff, et ensuite ceux obtenus sur le parafoudre 24 kVeff.

V.2.1 Parafoudre 77 kVeff

Pour augmenter le flux de chaleur transmise par la colonne de ZnO vers les capots, nous avons remplacé toutes les pièces entre la colonne de ZnO et les brides par une seule pièce massive en aluminium (figure V.6). Cette nouvelle structure présente une très bonne conductivité thermique qui facilitera le refroidissement de pastilles sur les extrémités de la colonne de ZnO. La diminution de température de ces pastilles introduit une modification de la répartition de température sur toute la colonne de ZnO.



a) Capot supérieur



b) Capot inférieur

Figure V.6 Constitution des capots du parafoudre 77 kVeff.
 La pièce en aluminium remplace toutes les pièces entre le bloc ZnO et la bride.

Nous avons analysé le comportement de la nouvelle structure du parafoudre sous régime permanent et en régime transitoire.

• Régime permanent

Pour établir une comparaison entre les deux structures des parafoudres nous avons réalisé les mêmes essais que sur le parafoudre initial. Dans la figure V.7, nous avons tracé les températures calculées et mesurées du parafoudre initial (courbe a) et celles du parafoudre modifié (courbe b) à sa tension de service 77 kVeff.

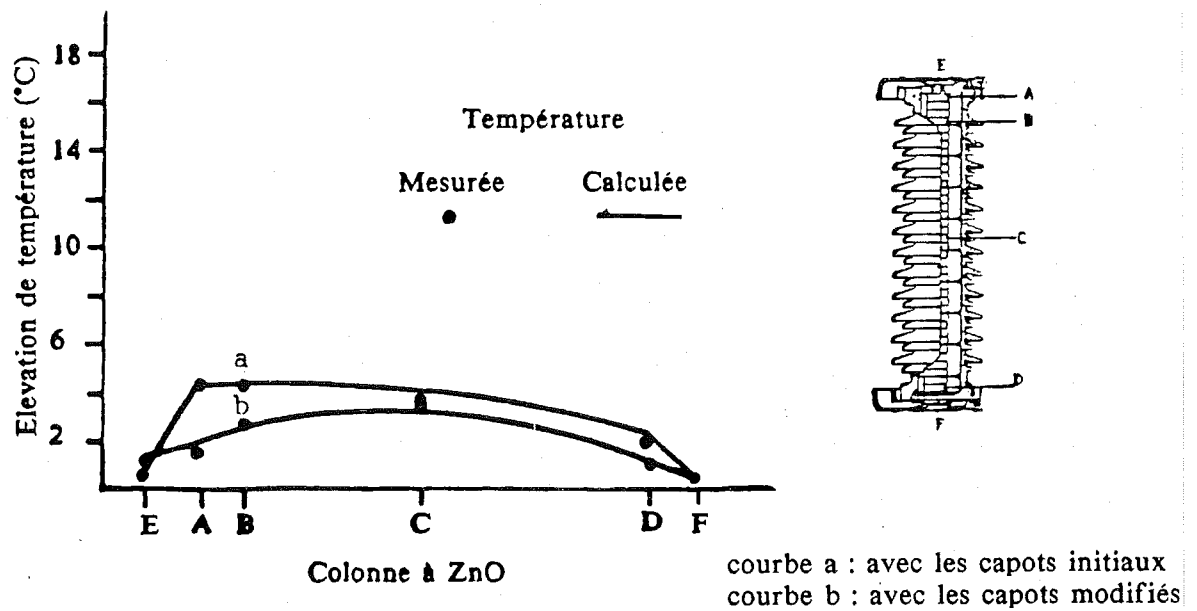


Figure V.7 Répartitions de température mesurées et calculées en régime permanent pour le parafoudre 77 KVeFF à sa tension de service, avec des architectures différentes de capots. Température ambiante : 20°C

La température des blocs centraux est presque la même pour le parafoudre avec différents capots. Mais plus on s'approche des extrémités, plus l'écart entre les deux courbes augmente. Ceci est dû à la plus grande quantité de chaleur évacuée par conduction entre les blocs de ZnO dans le cas du parafoudre modifié.

Dans la figure V.8 et la figure V.9 l'influence des capots est mieux appréciée. La température de la partie centrale n'est plus la même pour les deux courbes; elle est inférieure pour le parafoudre modifié. Un autre point important est la diminution des

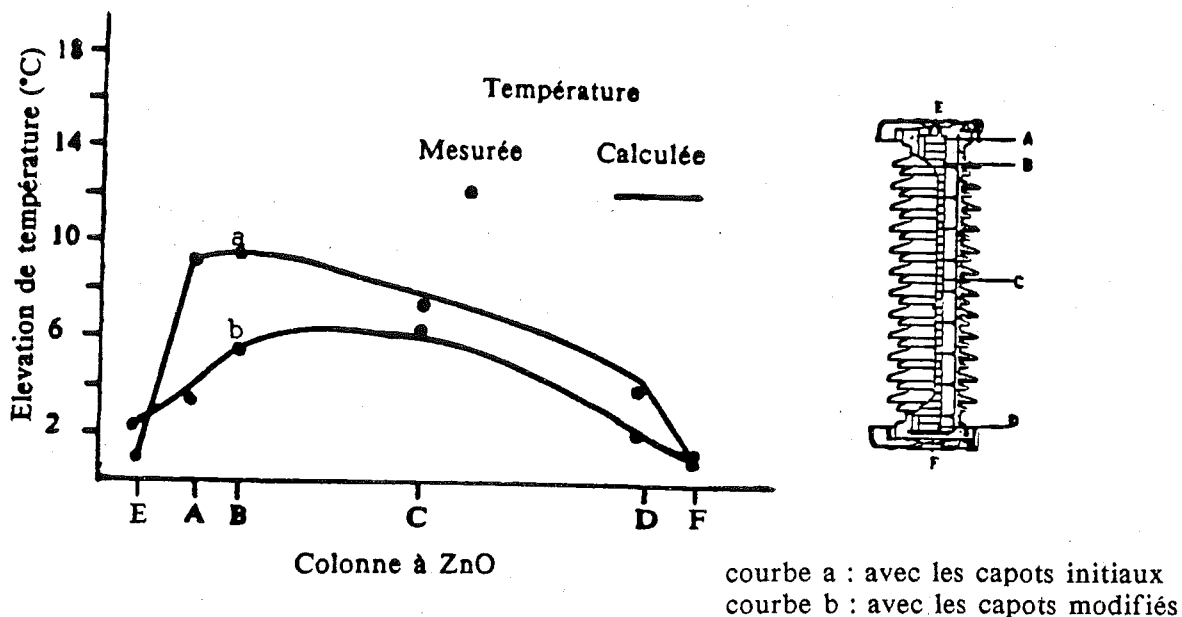


Figure V.8 Répartitions de température mesurées et calculées en régime permanent pour le parafoudre de 77 K_{Ve}ff à une tension de 130 KV_{crête}, avec des architectures différentes de capots. Température ambiante : 22°C

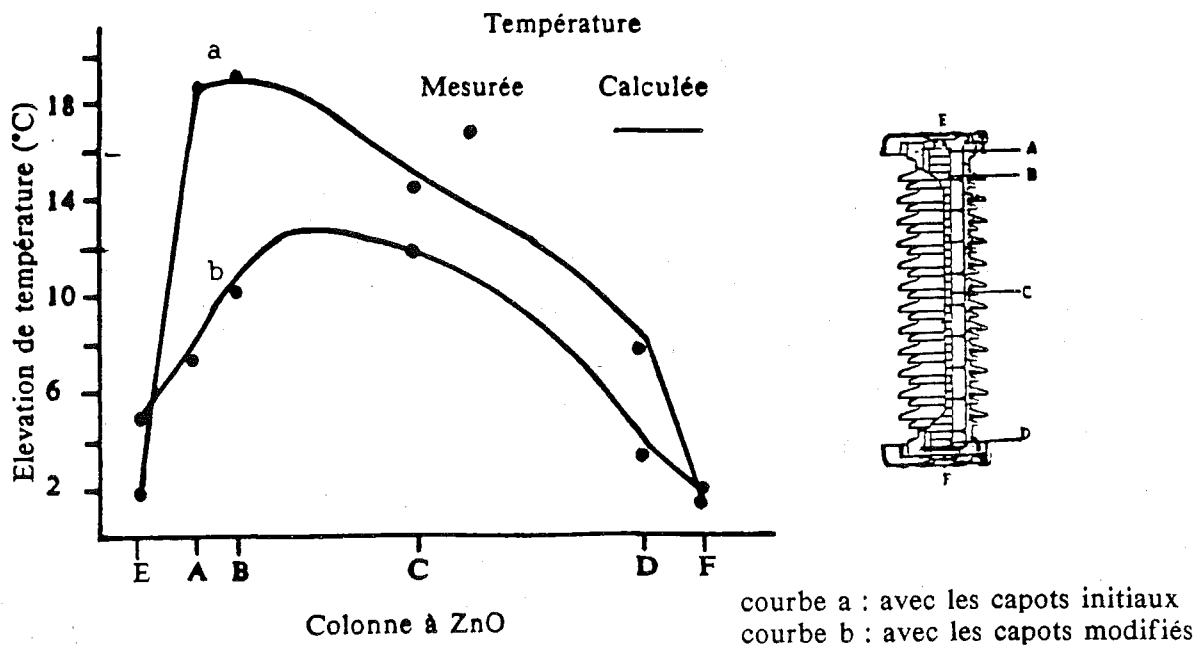


Figure V.9 Répartitions de température mesurées et calculées en régime permanent pour le parafoudre 77 K_{Ve}ff à une tension de 140 KV_{crête}, avec des architectures différentes de capots. Température ambiante : 22°C

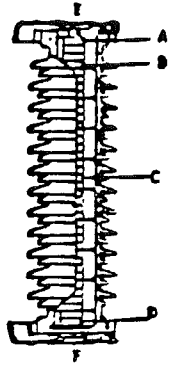
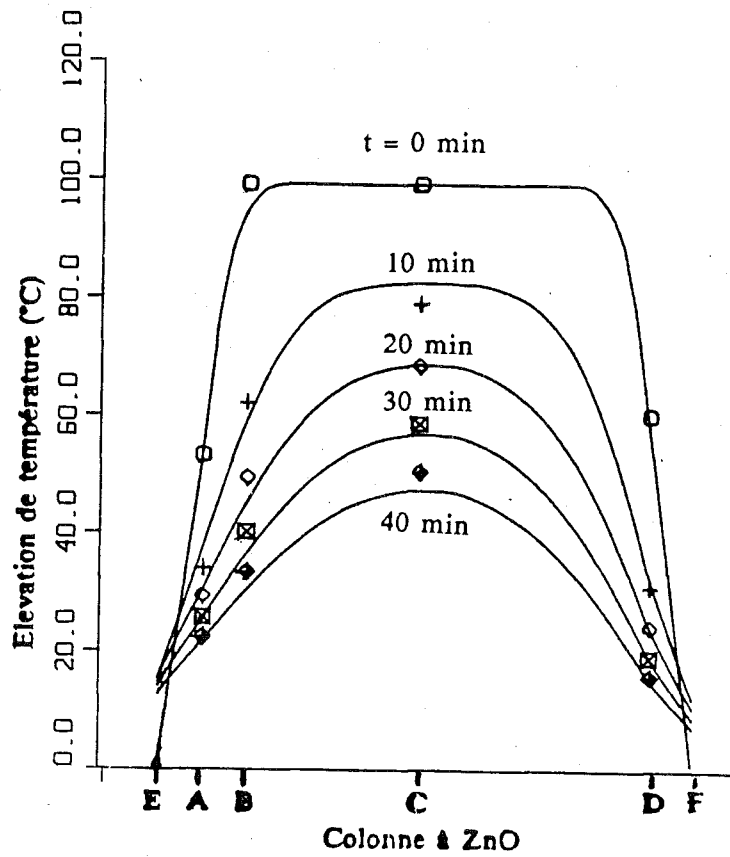
gradients de température entre la surface extérieure des capots et les pastilles les plus proches (entre les points E et A, et, entre F et D) obtenues avec le parafoudre modifié.

• Régime transitoire

Après avoir subi un choc d'énergie, le refroidissement de la colonne de ZnO du parafoudre modifié se réalise d'une manière symétrique, tant pour le refroidissement hors tension que pour le refroidissement sous tension (figure V.10 et figure V.11). Pendant les premières minutes du refroidissement la température des pastilles extrêmes diminue très rapidement, point A, B et D. De ce fait, la température des capots augmente rapidement jusqu'à un maximum, environ 15 minutes après le début du refroidissement.

Ces phénomènes sont dus principalement à l'évacuation de la chaleur par conduction vers les capots et à l'importante capacité thermique des capots. Après les 15 premières minutes, la température des pastilles extrêmes diminue plus lentement, dû à la présence de gradients de température moins importants entre les capots et les pastilles. La partie centrale se refroidit d'une manière plus ou moins uniforme, car l'influence des capots est minimale, pour l'ordre de grandeur de l'échauffement initial. Dans ce cas, la plupart de la chaleur de la partie centrale est évacuée par rayonnement, convection et conduction entre la colonne de ZnO et la porcelaine.

L'utilisation des nouvelles structures des capots fait diminuer considérablement la constante de temps de refroidissement des pastilles extrêmes. En effet, pour le refroidissement naturel la constante de temps de refroidissement des pastilles aux extrémités est d'environ 1320 sec. et de 3300 sec. pour les pastilles centrales (figure V.10.b); c'est-à-dire que les pastilles des extrémités de la colonne de ZnO se refroidissent presque 3 fois plus vite que celles de la partie centrale. Si nous prenons une valeur de 2340 de sec. la constante de dissipation de chaleur du parafoudre modifié est de $K = 0,075 \text{ W} / \text{°C-bloc}$. Cette valeur est plus élevée que celle du parafoudre initial ($K = 0,054 \text{ W} / \text{°C-bloc}$). Le parafoudre modifié est donc capable de dissiper plus de chaleur et il peut se refroidir plus rapidement, améliorant ainsi ses



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

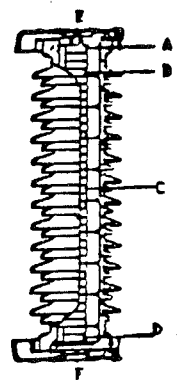
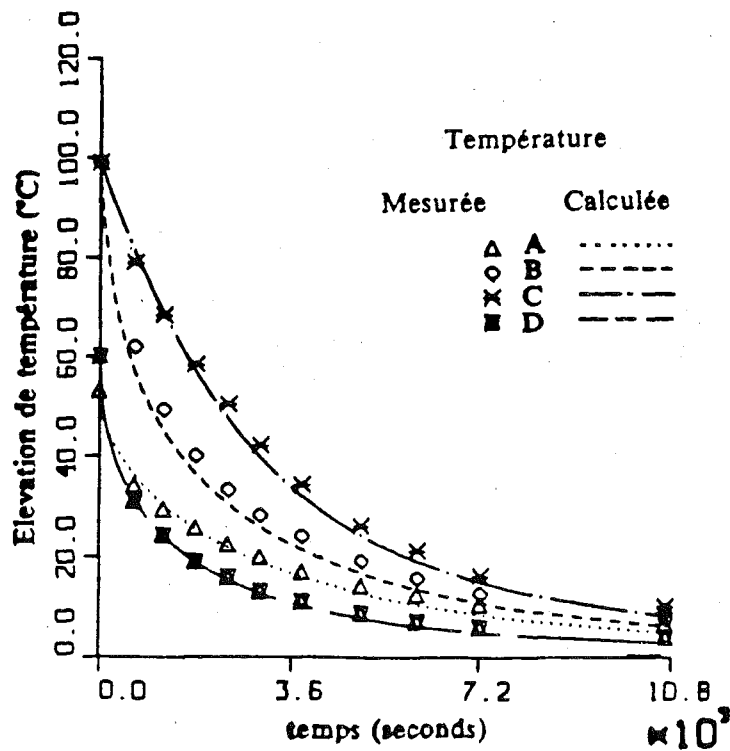
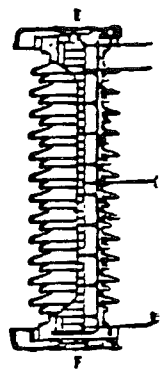
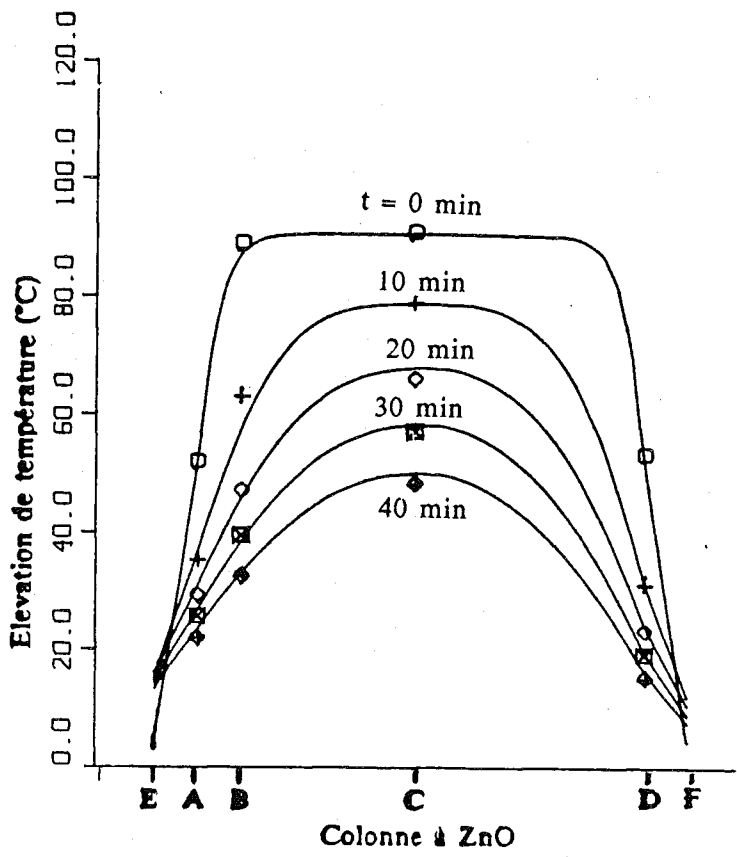


Figure V.10 Caractéristique de refroidissement hors tension du parafoudre 77 K Veff avec les capots modifiés
Température ambiante 18°C



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

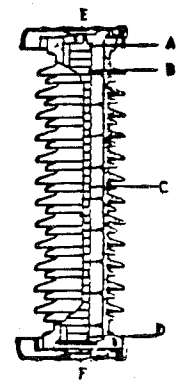
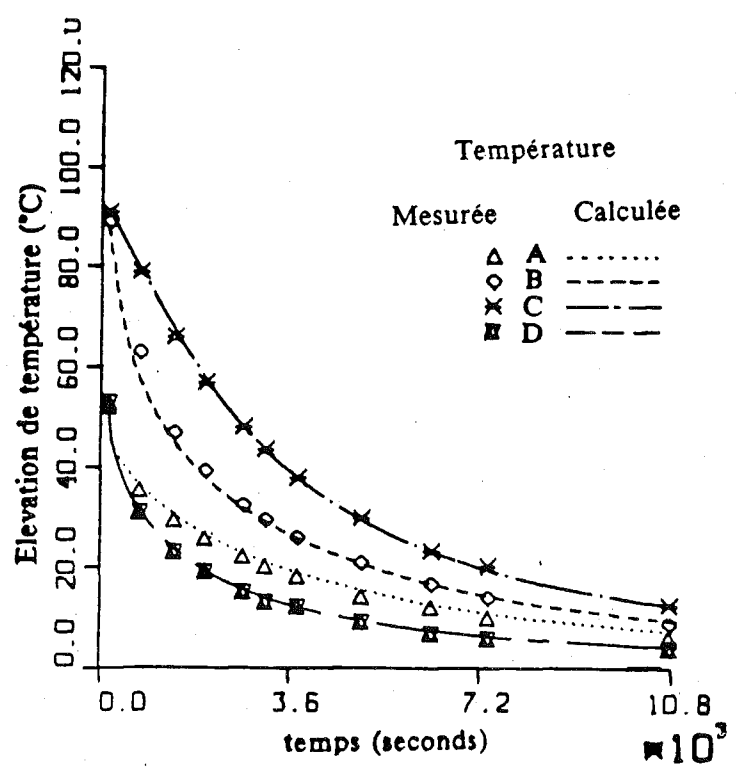


Figure V.11 Caractéristique de refroidissement sous tension du parafoudre 77 K Veff avec les capots modifiés
Température ambiante 18°C

performances thermiques. De ce fait, le parafoudre modifié pourra absorber une plus grande quantité d'énergie pour des chocs d'énergie répétitifs. Cette démarche devrait donc permettre une aide à la construction pour mieux dimensionner les parafoudres ; du point de vue économique, une analyse des coûts devrait être réalisée pour déterminer la faisabilité de telles modifications.

V.2.2 Parafoudre 24 kV_{eff}

Dans les essais en régime permanent nous nous sommes aperçu que le capot supérieur présentait une faible conductivité thermique. Pour augmenter sa valeur, nous avons remplacé le ressort par une pièce massive en aluminium, et mis en contact direct la cale et la bride.

Après ces modifications, nous avons réalisé les mêmes essais qu'avec le parafoudre dans son état initial (sans modifier le capot supérieur).

Les résultats obtenus sont décrits ci-dessous.

- En régime permanent

La figure V.12 présente la répartition de température calculée et mesurée pour le parafoudre initial (courbe a) et pour le parafoudre modifié (courbe b). On observe un gain thermique important : la colonne fonctionne à une température nettement inférieure ; le gradient thermique sur le capot supérieur est nettement diminué ; la répartition de température sur la colonne est symétrique avec de faibles écarts de température entre les pastilles centrales et celles situées aux extrémités.

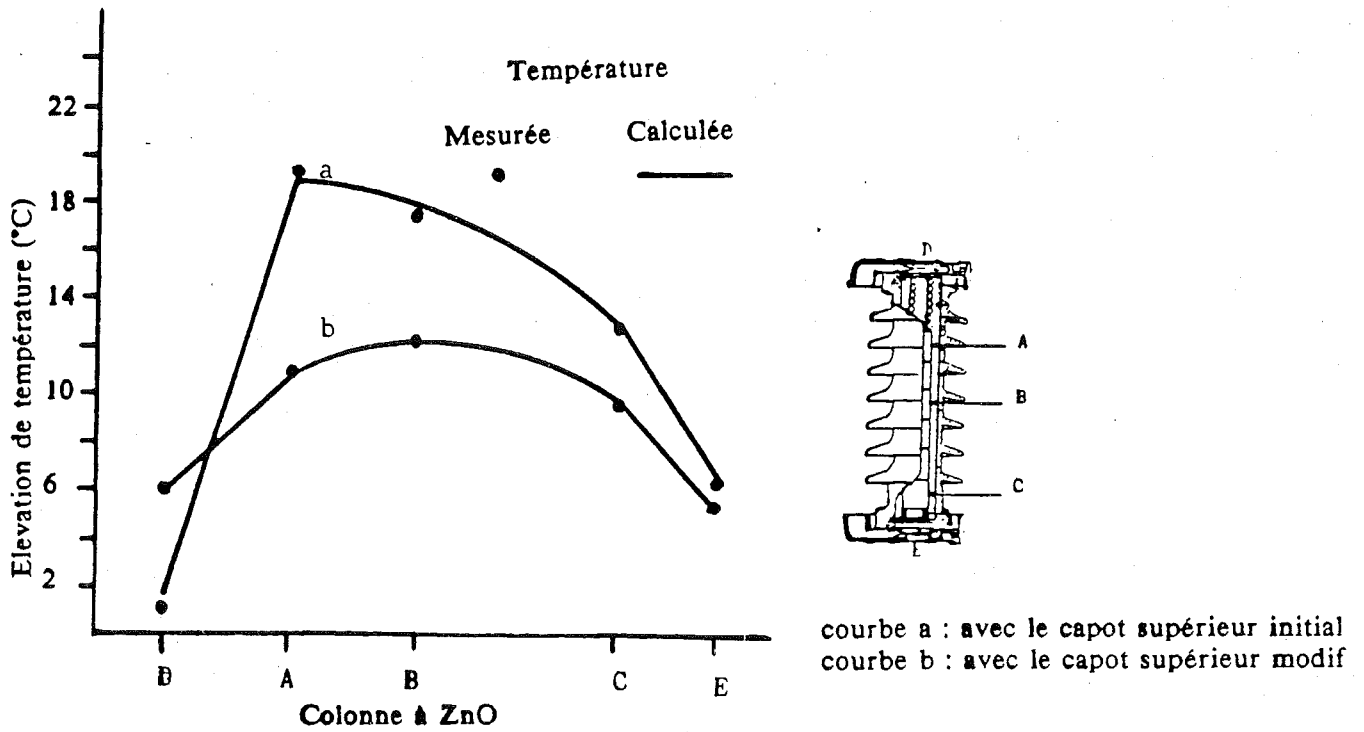
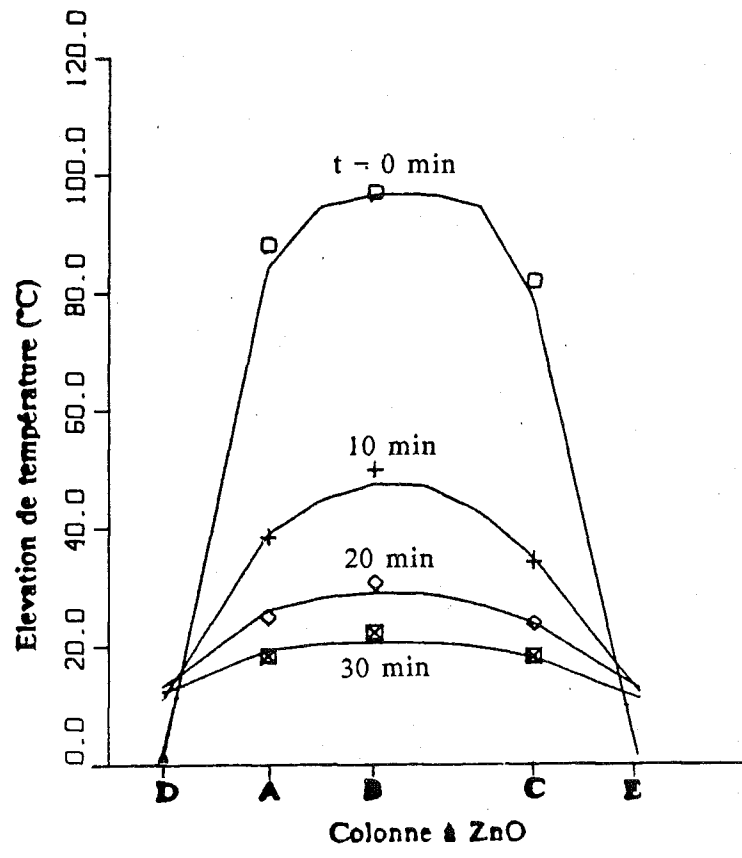


Figure V.12 Répartitions de température mesurées et calculées en régime permanent pour le parafoudre de 24 K_{Ve}ff à une tension d'environ 37 KV_{crête}, avec des architectures différentes du capot supérieur. Température ambiante : 20°C

• En régime transitoire

Les répartitions de température hors tension et sous tension (figure V.13 et figure V.14) sont très similaires. Elles sont symétriques et le refroidissement s'effectue plus rapidement. En effet, les capots absorbent une grande partie de la chaleur dégagée par la colonne.

Les résultats obtenus en régime permanent montrent les meilleures performances thermiques du parafoudre 24 k_{Ve}ff avec les modifications réalisées.



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

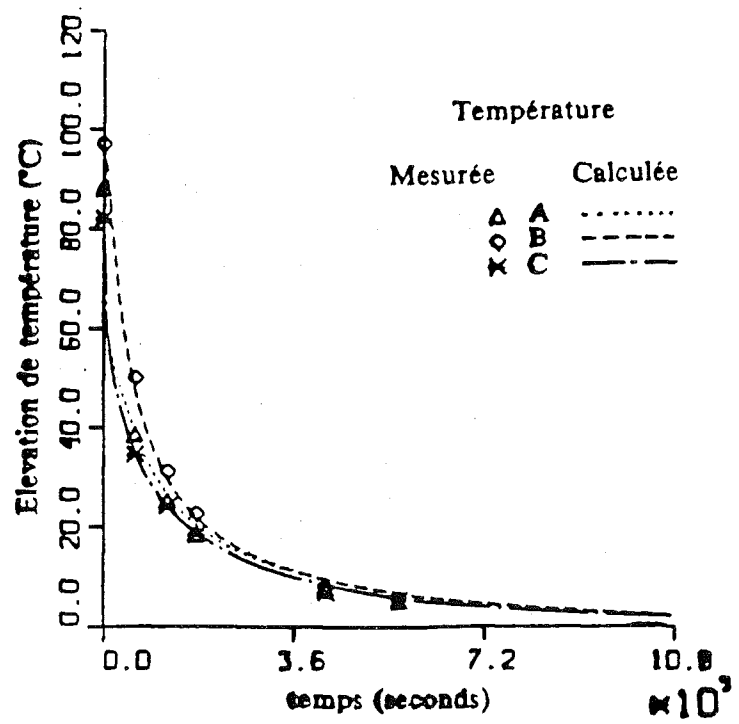
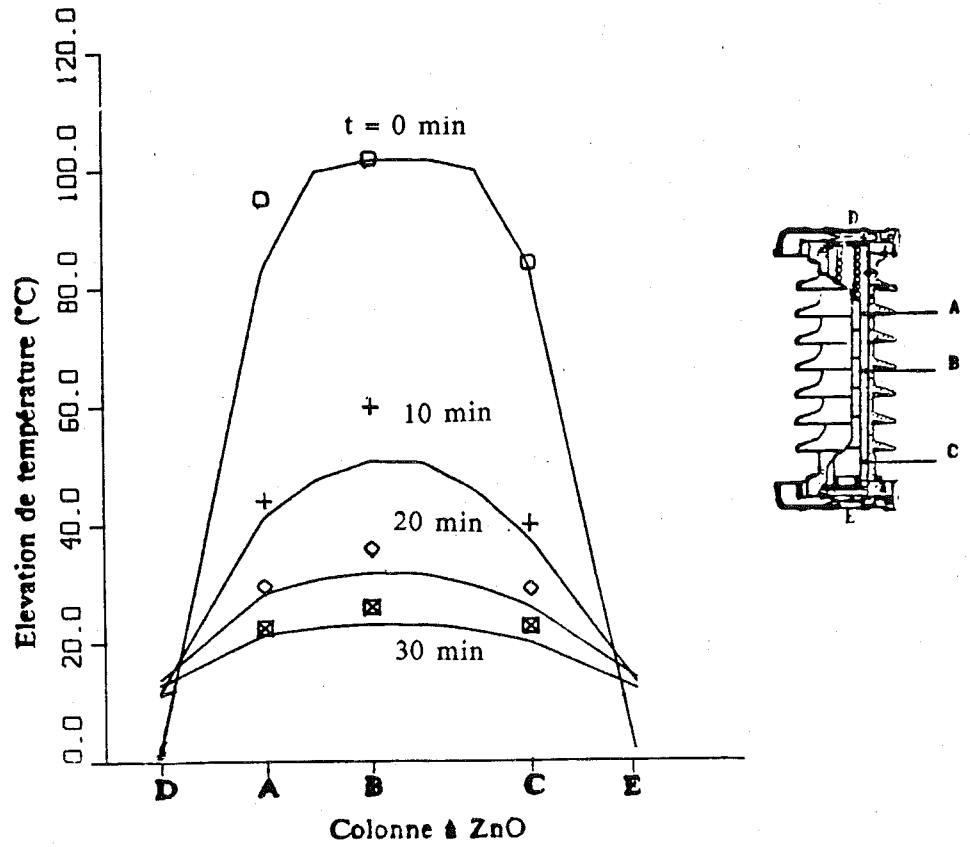


Figure V.13 Caractéristique de refroidissement hors tension du parafoudre 24 kVeff avec les capots modifiés température ambiante 18°C.



a) Température .vs. Colonne à ZnO

b) Température .vs. temps

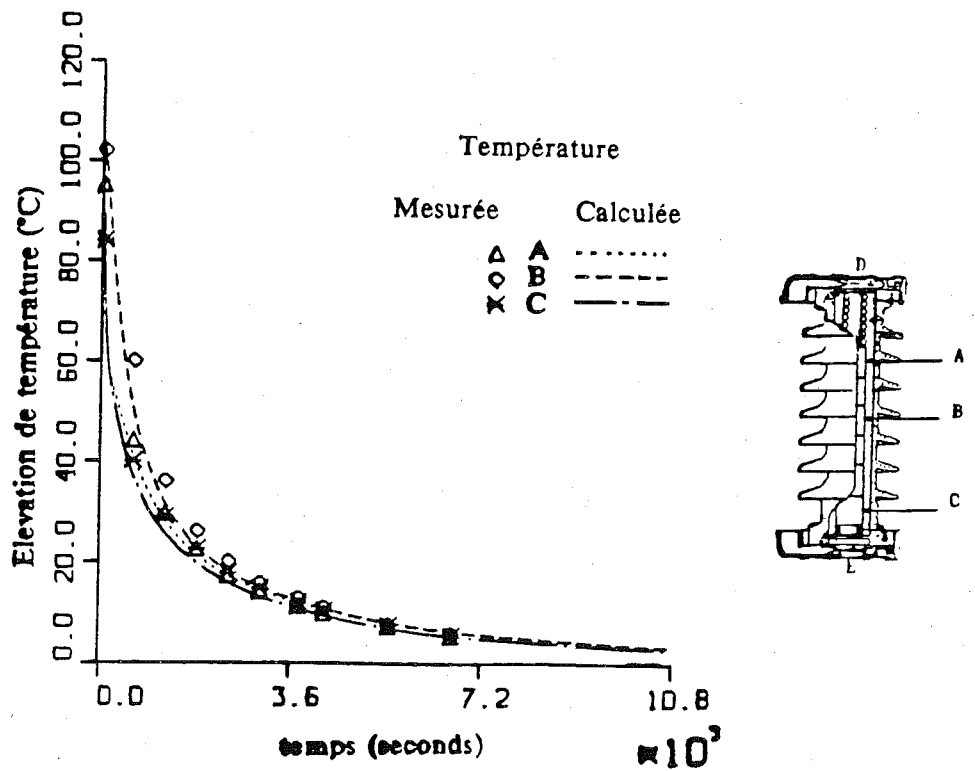


Figure V.14 Caractéristique de refroidissement sous tension du parafoudre 24 kVeff avec les capots modifiés température ambiante 18°C.

CONCLUSION

Pour vérifier la validité et l'adaptation du modèle à d'autres parafoudres, nous l'avons appliqué à un parafoudre moyenne tension (24 kVeff). D'autre part, l'expérience que nous avons acquise lors des essais nous a montré l'importance de l'écoulement de la chaleur dans la direction axiale et notamment entre les capots et la colonne de ZnO. De ce fait, les capots ont été modifiés dans les deux parafoudres étudiés (parafoudre 77 kVeff et 24 kVeff). Dans ce cas, la constante de dissipation de la chaleur obtenue est plus élevée que celle des parafoudres avec leur architecture initiale.

La validité et l'adaptation du modèle à ces types de parafoudres est prouvée par la bonne relation entre les températures calculées et mesurées lors des essais réalisés.

CONCLUSION

Dans le travail que nous avons effectué, nous avons mis au point un modèle thermique pour représenter le comportement des parafoudres à ZnO. Ce modèle est relativement complexe puisque, les caractéristiques électriques et thermiques sont non-linéaires et couplées. Le problème a été résolu en développant un modèle électrique équivalent des phénomènes thermiques, qui prend en compte toutes les non-linéarités y compris celles dues à la convection et au rayonnement. La simulation effectuée au moyen du logiciel ASTEC 3 donne la répartition de la température en tout point du parafoudre et permet de traiter l'ensemble des contraintes électriques (chocs de foudre, régime permanent...), auxquelles sont soumis les parafoudres.

De nombreuses expérimentations ont été réalisées en laboratoire et ont permis de vérifier la validité du modèle. Enfin ce modèle a été appliqué à d'autres types de parafoudres. Ces modélisations ont permis d'appréhender l'influence des écoulements thermiques axiaux et radiaux et notamment de démontrer l'influence des capots.

Ce modèle a déjà permis de mettre en évidence les points faibles des parafoudres sur lesquels nous avons travaillé. Nous pensons qu'il peut être utilisé pour optimiser la structure des parafoudres à ZnO utilisés dans le futur.

Ce modèle que l'on pourra encore simplifier permettra de prédéterminer les paramètres et la structure de nouveaux parafoudres (parafoudres synthétiques) et d'envisager de nouvelles utilisations de ce matériel (parafoudres dans les transformateurs, conditions de pollution élevée...).

REFERENCES

- [1] M. KOBAYASHI et al, "Development of Zinc-Oxide Non-linear Resistors and their applications to Gapless Surge Arresters", IEEE PES Summer Meeting, Mexico City, F77 682-8, 1977.
- [2] E.C. SAKSHAUG et al, " A New Concept in Station Arrester Design", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2 March/April 1977.
- [3] S. TOMINAGA et al, "Electrical Properties of Zinc-Oxide Valve Element for a Surge Arrester", IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA, A 78 595-1, 1978.
- [4] K. NAKANO, J. OZAWA " Recent Aspects of Zinc Oxide Lightning Arresters ", Hitachi Review. Vol 33, N° 4, 1984
- [5] C. GARY "Coordination des Isolements des Réseaux 225 KV - 90 KV - 63 KV Basée sur l'Emploi des Parafoudres à Oxyde de Zinc", note technique, HM 00-1070 CG/YME.D.F/D.E.R, Note Technique HM 00-1070 CG/YME 29/ 12/ 1982.
- [6] K. H. WECK " Principles and Procedures of Insulation Coordination", IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, No. 2, March 1987.
- [7] P. BORNARD, C.J. LECONTE et al " Amélioration de la Qualité de Service des Réseaux Ruraux : Réduction des Coupures Brèves "
- [8] P. DELEPLACE, E. GAIN, L. J. LECONTE " La nouvelle Politique de mise en oeuvre des Parafoudres MT sur les Réseaux de Distribution EDF", SEE, Journée d'études, 1988.
- [9] Groupe animé par G. SOLIGNAC " Guide de l'Ingénierie Electrique des réseaux internes d'usines", Technique et Documentation LAVOISIER, 1985.
- [10] C. GARY et al, " Lignes et Postes Choix et Coordination des isolements", Technique de l'Ingénieur, Electricité-Electrotechnique.
- [11] M. AGUET, J. J. MORF "Energie Electrique", Traité d'Electricité, Editions GEORGI, Vol. XII, 1981.
- [12] GERT "Temporary Overvoltages, their Classification, Magnitude, Duration, Shape and Frequency of Occurrence", CIGRE, Report 33-12, 1972
- [13] J. P. BICKFORD "Transient Overvoltages on Power Systems", IEE Proceedings, Vol 133, Pt. C, N°4, May 1986.
- [14] A. VICAUD, A. ROUSSEAU, I. HENNEBIQUE "Knowledge and Application of Zinc Oxide Surge Arresters Effect on Insulation Coordination", CIGRE, Report 33-10, 1986.
- [15] International Electrotechnical Commission, Technical Committee N°37 "Surge Arresters", January 1987
- [16] ZABORSKY et al, "Some Fundamental Aspects of Recovery Voltages", IEEE Trans., 1963, PAS-82, pp. 815-821.
- [17] ZABORSKY et al, "Fundamental Aspects of Some Switching Overvoltages", IEEE Trans., 1963, PAS-82, pp. 821-830.

- [18] I. HENNEBIQUE, G. Le ROY, A. VICAUD " Parafoudres et Céramiques à Oxyde de Zinc", EPURE, EDF/DER - Juillet 1984 - 3.
- [19] R. B. ANDERSON "Lightning Performance Criteria for Electric Power Systems", IEE PROCEEDINGS, Vol. 132, Pt. C. N°6, November 1985.
- [20] J. ROGUIN, A. SABOT "Les Moyens d'Etude des Phénomènes Transitoires Electriques", EPURE, EDF/DER - Juillet 1984 - 3.
- [21] R. GORDON BLACK " Protecting against lightning with surge Arresters ", EC & M decembre 1983.
- [22] y. HARUMOTO et al, "Evaluation for Application of Built-in Type Zinc Oxide Gapless Arresters for Power System Equipments", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3 July 1987.
- [23] G. ST-JEAN, Y. LATOUR " Comparison of the Capabilities of Metal Oxide and Conventional High Voltage Surge Arresters", Electric Power Systems Research, 7 (1984)45-52
- [24] A. MAYER, R. Rudolph "Des parafoudres sans Eclateurs Rendent Possible une Protection Optimale Contre les Surtensions", Revue Brown Boveri 12 - 85.
- [25] J. J. BURKE et al, "The Application of Gapless Arresters on Underground Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PASS-100, No. 3 March 1981.
- [26] W.D. NIEBUHT "Application of Metal-Oxide-Varistors Surge Arresters on Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.
- [27] E. C. SAKSHAUG "Contamination & Hot Wash Performance of Oxide Station Arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 5 May 1982.
- [28] M. MATSUOKA, et al, Jap. J. Appl. Phys., 8, 1275 (1969)
- [29] A. LAGRANGE "Une nouvelle génération d'éléments de protection à l'état solide : les varistances à base d'oxyde de Zinc", Journée d'Etudes SEE - Application des Parafoudres Moyenne Tension", Gif sur-Yvette, 27 Mai 1988.
- [30] R. SALMON " Elaboration, structures et propriétés non linéaires des varistances à ZnO", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [31] A. LAGRANGE "Elaboration de varistances par imprégnation d'un oxyde de zinc commercial", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [32] P.E.C. FRANKEN, J. RAPAILLE "Le rôle des additions dans les varistances à base d'oxyde de zinc", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [33] LIONEL M. LEVINSON, H. R. PHILIPPE "The Physics of Metal Oxide Varistors", Journal of applied Physics. Vol. 46 N° 3 March 1975.
- [34] MM. ROSSILELLI, et al "Propriétés Electroniques des Joints de Grains dans les Céramiques à Base d'Oxyde de Zinc", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.

- [35] R. J. LAUF et W. D. BOND, *Ceramic Bull.*, 63, 278 (1984)
- [36] G. S. SNOW et R. A. COOPER *Ceramic Bull.*, 59, 550 (1980).
- [37] G. S. SNOW et al, *Ceramic Bull.*, 59, 617 (1980).
- [38] P. GAUCHER, et al "Réalisation des Varistances à très basse tension de seuil", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [39] K. EDA et al, *J. Appl. Phys.*, 54, 1095 (1983)
- [40] B. BHUSHAN et al, *J. Appl. Phys. Lett.*, 38, 160 (1981)
- [41] L. G. BOWEN et al, *J. Appl. Phys.*, 54, 2765 (1983)
- [42] M. TRONTELJ, *Advances in Ceramics V7*, p. 107.
- [43] F. A. SELIM et al, *J. Appl. Phys.*, 51, 765 (1980)
- [44] K. EDA et al, *J. Appl. Phys.*, 22, 202 (1983)
- [45] B. HOFFMANN et U. SCHWING, *Advances in Ceramics V1*, p. 343.
- [46] N. SHOHATA et al, *Advances in Ceramics V1*, p. 349.
- [47] S. TOMINAGA et al, "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 4 July/Aug 1980.
- [48] M. KAN et al, "Surge Discharge Capability and Thermal Stability of a Metal Oxide Surge Arrester", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 2 February 1983.
- [49] M. V. LAT, "Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arrester", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 7 July 1983.
- [50] M. MIZUMO et al, "Thermal Stability and Life of Gapless Surge Arrester", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 5 May 1981.
- [51] M. V. LAT, "Analytical Methode for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985.
- [52] S. TOMINAGA et al, "Reliability and Application of Metal Oxide Surge Arrester for Power Systems", *IEEE PES Meeting, Los Angeles*, F78 703-1, 1978.
- [53] A. VICAUD "A.C. Voltage Ageing of Zinc-Oxide Ceramics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRD-1 N°2, April 1986.
- [54] T. K. GUPTA et COLL, "Current Instability phenomena in ZnO varistors under a Continuous AC Stress" *J. Appl. Phys.*, 52(6), June 1981.
- [55] S. NISHIWAKI, "Study of Thermal Runaway/Equivalent Prorated model of a ZnO Surge Arrester", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 2 February 1984.
- [56] M. OYAMA et al, "Life performance of Zinc-Oxide Elements under DC Voltage", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.

- [57] R. J. BRONIKOWSKI, J. P. DUPONT, "Development and Testing of MOVE Arrester Elements", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.
- [58] PAUL J. MALINARIC "Transient Suppressor Design with Varistor Composite Materials", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-27, No. 4 November 1985.
- [59] E. G. MAIER et al, "Répartition de Tension et Comportement en Atmosphère Polluée des Parafoudres à Oxydes Métalliques", Revue Brown Boveri 12 - 85.
- [60] A. BARGIGIA, A. ROUSSEAU et al, "Behaviour of Metal-Oxide Surge Arrester under Different Environmental Conditions", CIGRE, 33-14, Session 28th August - 3rd September, 1988.
- [61] D. RODNEY "Distributions Class Surge Arresters", Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [62] B. RICHTER et al, "Parafoudres MT à Oxydes Metalliques à Enveloppe Synthetique" Journée d'Etudes SEE - Varistances à Base d'Oxyde de Zinc - Gif sur-Yvette, 6 Mars 1986.
- [63] E. M. SHERIF, A. E. VLASTOS "Influence of Ageing on the Electrical Properties of Composite Insulators", 5th ISH-Braunschweig 1987, paper 51.01
- [64] J.E. Harder "Metal Oxyde Arrester for Rotating Machine Protection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 9 September 1985.
- [65] R.E. KOCH et al, "Design of Zinc Oxide Transmission Line Arresters for Application on 138 KV Towers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10 October 1985.
- [66] A. SWEETANA et al, "Design, Development and Testing of 1200 KV and 550 KV Gapless Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7 July 1982.
- [67] J. P. CINQUIN, C. GAZZOLA, "Dispositifs Associés aux Parafoudres MT pour Répondre aux Nouvelles Exigences de l'EDF lors d'une Défaillance des Céramiques à ZnO", Journée d'Etudes SEE - Application des Parafoudres Moyenne Tension", Gif sur-Yvette, 27 Mai 1988.
- [68] J. HOWARD, "Characteristics which can be used to detect defective distribution surge arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1 January 1985.
- [69] R.J. BRONIKOWSKI, "Plug-In Arresters for Surge Protection of Underground Distribution Transformers", Seventh IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 79CH1399-5-PWR, 1979.
- [70] MANUEL Pierre "Mécanismes de conduction et de dégradation dans les varistances ZnO : Revue des différents modèles", Journée d'Etudes SEE - Application des Parafoudres Moyenne Tension", Gif sur-Yvette, 27 Mai 1988.
- [71] LCC THOMSOM "Varistances à Base d'Oxyde de Zinc", Depto. condensateurs LCC, THPMSOM-CSF COMPOSANTS, 1982-1983
- [72] A. VICAUD, A. ROUSSEAU, LHENNEBIQUE "Les Parafoudres à Oxyde de Zinc dans les Réseaux à Haute Tension", RGE, N°9 - Octobre 1986.

- [73] A. ROUSSEAU "Dimensionnement des Parafoudres MT pour le Réseau EDF", Journée d'Etudes SEE - Application des Parafoudres Moyenne Tension", Gif sur-Yvette, 27 Mai 1988.
- [74] R. E. OWEN, . R. CLINKENBEARDB, "Surge Protection of UD Cable Systems" Part I, IEEE PES Summer Power Meeting, Mexico City, Mexico, July 17-22, 1977.
- [75] M. IMATAKI "Advanced Metal Oxide Surge Arrester for Gas Insulated Switchgear (GIS)", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, October 1984.
- [76] B. RICHTER "Application of the Optics to the Measurement of Leakage Current in Metal-Oxide Surge Arresters", Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, GREECE, 5-9 September 1983.
- [77] I. HENNEBIQUE, A. PRIGENT, "Modélisation du Comportement Thermique d'un Parafoudre à Oxyde de Zinc", E.D.F/D.E.R, Note Technique HM/15 - 992 IH/AP/ML 24/09/ 1984.
- [78] W. H. Mc. ADAMS "Transmission de chaleur", Deuxième Edition. DUNOD. 1961.
- [79] A. BOUVENOT, "Transferts de Chaleur", Collection Technologiques, MASSON, 1981.
- [80] P.Y. LOCHET et al, "Modélisation des Systèmes thermiques par l'analyse nodale, Utilisation du Logiciel ASTEC 3 ", Note E.D.F/D.E.R. HE 112 W 1830 26/01/ 1982.
- [81] M. HEYDEMANN "ASTEC 3 Manuel de Référence -- Utilisateur", CISI, Juillet 81.
- [82] NEYRIAL, "Guide Pratique d'Utilisation d'ASTEC 3", Note E.D.F/D.E.R. HE 112 NS 2203 - 02/ 01/ 1983
- [83] R. SIEGEL, J. R. HOWELL "Thermal Radiation Heat Transfer", Mc. Graw Hill 1981.
- [84] R. GIBLIN, "Transmission de la Chaleur par Convection Naturelle", Collection de l'A.N.R.T, EYROLLES, 1974.
- [85] M. SERRANO "Etude thermique d'un Parafoudre à ZnO", EDF/ECL Rapport de DEA, 1985.
- [86] Manuel d'utilisation du thermomètre optique ASEA 1110.
- [87] A. ROUSSEAU, A. REDLINGER, "Réflexions sur les Maquettes Thermiques de Parafoudre selon le Projet de Norme CEI", E.D.F/D.E.R, Note Technique HM/15 - 1184 AR/CBs, juillet 1987.
- [88] International Electrotechnical Commission "Draft - Surge arresters, Part 1 : Metal oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", Technical committee N° 37 : SURGE ARRESTERS. January 1987.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	3
INTRODUCTION.....	4
NOTATIONS.....	6

CHAPITRE I. PRESENTATION DES PARAFONDRES A ZnO ET DE LEUR ROLE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES

<i>Introduction</i>	8
<u>I.1 PRINCIPAUX TYPES DE SURTENSIONS</u>	9
• <i>Les surtensions temporaires</i>	9
• <i>Les surtensions de manoeuvre</i>	10
• <i>Les surtensions de foudre</i>	10
• <i>Effets des surtensions sur le matériel</i>	10
<u>I.2 DISPOSITIFS DE PROTECTION UTILISES CONTRE LES SURTENSIONS</u>	11
<i>I.2.1 Les Eclateurs</i>	12
• <i>Inconvénients</i>	13
<i>I.2.2 Les Parafoudres à SiC</i>	13
• <i>Avantages</i>	15
• <i>Inconvénients</i>	15
<i>I.2.3 Les Parafoudres à ZnO</i>	16
• <i>Avantages</i>	16
• <i>Inconvénients</i>	18
<u>I.3 ROLE DES PARAFONDRES SUR LA COORDINATION DES ISOLEMENTS</u>	19
<u>I.4 ROLE DES PARAFONDRES A ZnO SUR LA QUALITE DU SERVICE</u>	20
CONCLUSION.....	24

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DES PARAFONDRES A ZnO

<i>Introduction</i>	26
<u>II.1 LES CERAMIQUES DE ZnO</u>	26
<i>II.1.1 Processus de fabrication</i>	26
• <i>Fabrication des céramiques destinées à la haute tension</i>	28
• <i>Fabrication des céramiques destinées à la basse tension</i>	28
<i>II.1.2 Propriétés électriques</i>	29
• <i>Caractéristique V(I)</i>	29
• <i>Relation entre les dimensions d'une céramique et ses caractéristiques électriques et</i>	30
• <i>Tension de seuil d'une céramique</i>	30
<i>II.1.3 Comportement des céramiques lors des impulsions très rapides</i>	32
<i>II.1.4 Répartition de tension sur la colonne de ZnO</i>	32
<i>II.1.5 Caractéristiques générales des céramiques de ZnO</i>	34
<u>II.2 EXIGENCES DEMANDEES AUX PARAFONDRES ET LEURS CAUSES PRINCIPALES DE DEFAILLANCE</u>	36
• <i>Exigences principales demandées aux parafoudres</i>	36
• <i>Causes de défaillance des parafoudres à ZnO</i>	36
<u>II.3 L'EMBALLEMENT THERMIQUE</u>	37
• <i>Conditions critiques de l'emballement thermique</i>	38
<u>II.4 STABILITE THERMIQUE</u>	38
• <i>Influence de la température ambiante sur la stabilité thermique</i>	40
• <i>Constante de dissipation de chaleur d'un parafoudre</i>	41
<u>II.5 CAPACITE D'ABSORPTION D'ENERGIE</u>	41
<u>II.6 DUREE DE VIE DES CERAMIQUES</u>	42
• <i>Dégradation des céramiques</i>	44
• <i>Dégradation due à l'application d'une tension de service permanent</i>	45
• <i>Dégradation due aux surtensions</i>	45

<u>II.7 VIEILLISSEMENT DES CERAMIQUES</u>	46
<u>II.8 ESPOIR DE VIE DES CERAMIQUES</u>	46
<u>II.9 POLLUTION</u>	47
• <i>Influence de la pollution sur la répartition de tension</i>	47
<u>II.10 DETECTION DES PARAFODRES DEFECTUEUX</u>	49
<u>II.11 DIMENSIONNEMENT DES PARAFODRES</u>	50
<u>II.12 AMELIORATION DU FONCTIONNEMENT DES PARAFODRES A ZnO</u>	51
<u>II.13 APPLICATION DES PARAFODRES A ZnO</u>	51
• <i>Application des parafoudres au système souterrain de distribution</i>	51
• <i>Application des parafoudres à ZnO sur des pylônes de 138 KV</i>	51
• <i>Application des parafoudres à ZnO dans les postes compacts à SF₆</i>	53
• <i>Développement des parafoudres à ZnO pour des systèmes de 1200 KV et 500 KV</i>	53
• <i>Parafoudres à ZnO à enveloppe synthétique</i>	54
• <i>Protection des bancs capacitifs</i>	55
• <i>Protection des machines tournantes</i>	56
<u>CONCLUSION</u>	57

CHAPITRE III MODELISATION ELECTRIQUE ET THERMIQUE DES PARAFODRES A ZnO

<i>Introduction</i>	58
<u>III.1 MECANISMES DES ECHANGES THERMIQUES</u>	59
<u>III.2 MODELISATION THERMIQUE A L'AIDE DE LA METHODE NODALE</u>	60
• <i>Description de la méthode nodale</i>	60
• <i>Analogie thermique-électrique</i>	62
<u>III.3 MODELISATION ELECTRIQUE</u>	62

<u>III.4 CHOIX D'UN LOGICIEL DE CALCUL</u>	63
<u>III.5 DEVELOPPEMENT DU MODELE THERMIQUE</u>	63
• Répercussion des phénomènes thermiques sur le modèle électrique.....	64
<u>III.6 DETERMINATION DES PARAMETRES THERMIQUES</u>	64
III.6.1 Conductances thermiques par conduction.....	65
III.6.2 Conductances thermiques par rayonnement.....	66
III.6.3 Conductances thermiques par convection.....	66
• Entre la porcelaine et l'air ambiant.....	67
• Convection entre la porcelaine et la colonne de ZnO.....	68
• Entre les capots et l'air ambiant.....	69
<u>III.7 PARAMETRES ELECTRIQUES</u>	69
<u>III.8 MODELISATION D'UN PARAFoudre 77 K_{Veff}</u>	71
• Modélisation des extrémités.....	71
• Modélisation de la portion centrale.....	73
• Utilisation du logiciel.....	75
<u>CONCLUSION</u>	77

CHAPITRE IV ETUDE EXPERIMENTALE ET VALIDATION DU MODELE

Introduction.....	78
<u>IV.1 MATERIEL UTILISE</u>	79
IV.1.1 Choix de la méthode de mesure de température.....	79
IV.1.2 Précision de l'équipement de mesure de température.....	79
IV.1.3 Caractéristiques du matériel utilisé.....	80
IV.1.4 Limitations des installations du laboratoire.....	81
<u>IV.2 MONTAGE EXPERIMENTAL</u>	82

<i>IV.2.1 Points de mesure de température.....</i>	<i>82</i>
<i>IV.2.2 Procédure des essais réalisés.....</i>	<i>83</i>
<u>IV.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CALCULES.....</u>	<u>83</u>
<i>IV.3.1 En Régime Permanent.....</i>	<i>85</i>
<i>IV.3.2 En Régime Transitoire.....</i>	<i>86</i>
• <i>Refroidissement naturel.....</i>	<i>87</i>
• <i>Refroidissement sous tension.....</i>	<i>90</i>
<i>IV.3.3 Comparaison des résultats mesurés et calculés.....</i>	<i>91</i>
CONCLUSION.....	96

CHAPITRE V APPLICATION DU MODELE

<i>Introduction.....</i>	<i>97</i>
<u>V.1 ETUDE D'UN PARAFONDRE MOYENNE TENSION.....</u>	<u>97</u>
<i>V.1.1 Constitution du parafoudre 24 K_{Ve}ff.....</i>	<i>97</i>
<i>V.1.2 Modélisation du parafoudre.....</i>	<i>98</i>
<i>V.1.3 Calcul de paramètres thermiques.....</i>	<i>98</i>
<i>V.1.4 Caractéristiques électriques.....</i>	<i>99</i>
<i>V.1.5 Essais.....</i>	<i>99</i>
<i>V.1.6 Points de mesure.....</i>	<i>99</i>
<i>V.1.7 En régime permanent.....</i>	<i>99</i>
<i>V.1.8 En régime transitoire.....</i>	<i>101</i>
• <i>Refroidissement naturel.....</i>	<i>101</i>
<i>V.1.9 Comparaison entre les mesures et les calculs.....</i>	<i>103</i>
<u>V.2 RECHERCHE DE NOUVELLES STRUCTURES DE PARAFONDRES.....</u>	<u>103</u>
<i>V.2.1 Parafoudre 77 K_{Ve}ff.....</i>	<i>103</i>

• Régime permanent.....	105
• Régime transitoire.....	107
V.2.2 Parafoudre 24 K _{Ve} ff.....	110
• Régime permanent.....	110
• Régime transitoire.....	111
CONCLUSION.....	114
CONCLUSION.....	115
REFERENCES.....	116

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 5 juillet 1984, modifié par l'arrêté du 21 mars 1988,

Vu la demande du Directeur de Thèse

M. A. FOGGIA - Professeur - INPG

et les rapports de

M. G. MEUNIER - Chargé de Recherche CNRS
Habilitation à diriger des recherches - ENSIEG

M. A. ROUSSEAU - Ingénieur - EDF CLAMART

Monsieur SERRANO Manuel

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du titre de **DOCTEUR**

Spécialité ELECTROTECHNIQUE

Fait à Ecully, le 25 novembre 1988

Le Directeur de l'E.C.L.



J. BORDET