

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA- UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA –



جامعة باجي مختار - عنابة-

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'Electrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT D'ETAT

***Analyse des parafoudres à Oxyde de Zinc dans les
réseaux électriques à haute tension***

Option

Réseaux Electriques

Par

Mohamed ADJABI

Directeur de Thèse : Nasr Eddine DEBBACHE

Prof Université Annaba

DEVANT LE JURY

Président : M. HOUABES

M.C Université Annaba

Examineurs : L. HEROUS

M.C Université Annaba

H. LABAR

M.C Université Annaba

A. ABOUBOU

M.C Université Biskra

Année 2007

ملخص

الزيادات في التوترات العابرة الناتجة عن مناورات الغلق و الفتح و الصواعق هي مصدر تشويش و خطر على سير الآلات و تؤدي غالبا إلى انقطاع التيار و بالتالي تمس بنوعية الطاقة الموفرة . و هذا ما أدى إلى استعمال و تطوير أجهزة حماية ذات خصائص و كفاءات عالية .

يعتبر حاليا الواقي من الصواعق ذو أكسيد الزنك الأكثر استعمالا و يتجه إلى تعويض الواقي من الصواعق ذو كربيد السليسيوم و المتفجر . حيث أن المقاومات المتغيرة المصنوعة على أساس أكسيد الزنك والتي تعتبر العنصر الفعال في الواقي من الصواعق تتميز بخصائص جيدة من حيث لا خطية علاقة التيار بالتوتر ، سرعة الاستجابة و قدرة امتصاص الطاقة . لكن هذه الأخيرة تتعلق بعدة عوامل و تتغير بصفة معقدة مع أبعاد المقاومة ، كثافة التيار و درجة عدم الانتظام .

هدف هذه المذكرة هو دراسة مدى تحسين الخصائص الكهربائية و الكيميائية من بينها الزيادة في الحقل القاعدي و تخفيض في التوتر يمر حتما من الدراسة المهجرية للفارستورس المميزات الكهربائية للواقي من الصواعق (فارستورس) ذو أكسيد الزنك تعتمد على المكونات الكيميائية المستعملة في صناعتها و خاصة في مرحلة الطهي في درجة حرارة عالية جدا .

لهذا الغرض اتبعنا مدى مقاومة الواقي من الصواعق ذو أكسيد الزنك للشيخوخة بالنسبة الزمن، و ذلك من ناحية المقادير الفيزيائية الرئيسية الثلاثة و الميزة للواقي من الصواعق هي: التيار المتسرب و الذي يؤثر سلبا على مدة حياة الواقي من الصواعق في حين الارتفاع في درجة الحرارة في مرحلة الطهي مهمة جدا لزيادة الناقلية لحبيبات أكسيد الزنك .

لتوضيح ذلك قمنا برسم المنحنى البياني لهذه العوامل السابقة الذكر تحت درجة حرارة و توترات مختلفة لتيار متناوب و مستمر .

كلمات أساسية: فارستورس ، أكسيد الزنك، الشيخوخة، حماية البرق، الحرارة العالية، التيار المتسرب، التوتر القاعدي.

Summary

Transitory overpressures due to the operations or the lightning are at the origin of disturbance as well for the material as for the consumer and thus harm the quality of energy. This led to the use of protection more and more powerful and with the improvement of their characteristics. The ZnO lightning protector is currently used the most and tends to replace them spark-gaps and lightning protectors Sic. Indeed, the varistors with zinc oxide, which are the basic elements of the lightning protector, present advantageous properties of point of view not linearity, capacity for absorption of energy and response time. However the capacity for absorption of the energy of this ceramics varies according to one pace complexes according to dimensions, density of current and uniformity of varistors. Reduction in the level of protection of the apparatus of protection, and by consequent that very required, of the level of insulation in the networks electric or that of the apparatuses to be protected such as the transformers, is connected with the reduction in the residual stress of the varistors. Improvement of the electric characteristics of the lightning protectors such as the increase in field of threshold and the reduction in the residual stress pass inevitably by the study of the microstructure of the varistor. The electric properties of the ZnO varistors depend on the composition chemical employee in manufacture, and of the cycle of sintering. In this work we followed the evolution of the operation of ageing in function of time, the three principal sizes characterizing a varistor: leakage current, the tension of threshold and the coefficient of nonlinearity. Increase leakage current influences considerably over the lifespan of the varistor while increase in the temperature of sintering and very important, for increase in the conductivity of the zinc oxide grains. We traced the characteristics of these parameters under different temperatures and for various tension in AC current and continuous.

Key words: Varistors, ZnO, lightning protectors, Ageing, temperature, current of escape, tension of threshold, coefficient of nonlinearity.

Résumé

Les surtensions transitoires dues aux manœuvres ou à la foudre sont à l'origine de perturbation aussi bien pour le matériel que pour le consommateur et nuisent donc à la qualité de l'énergie. Ceci a conduit à l'utilisation de protection de plus en plus performante et à l'amélioration de leurs caractéristiques.

Le parafoudre ZnO est actuellement le plus utilisé et tend à remplacer les éclateurs et les parafoudres SiC. En effet, les varistances à oxyde de zinc, qui sont les éléments de base du parafoudre, présentent des propriétés avantageuses du point de vue non linéarité, capacité d'absorption de l'énergie et temps de réponse.

Cependant la capacité d'absorption de l'énergie de ces céramiques varie suivant une allure complexe en fonction des dimensions, densité de courant et uniformité de la varistances. La diminution du niveau de protection de l'appareil de protection, et par conséquent celle très recherchée, du niveau d'isolement dans les réseaux électriques ou celui des appareils à protéger tels que les transformateurs, est reliée à la diminution de la tension résiduelle de la varistances.

L'amélioration des caractéristiques électriques des parafoudres telles que l'augmentation de champ de seuil et la diminution de la tension résiduelle passe inévitablement par l'étude de la microstructure de la varistance.

Les propriétés électriques des varistances ZnO dépendent de la composition chimique employée dans la fabrication, et du cycle de frittage.

Dans ce travail nous avons suivi l'évolution de l'opération de vieillissement en fonction du temps, des trois principales grandeurs caractérisant une varistance : le courant de fuite, la tension de seuil et le coefficient de non linéarité. L'augmentation du courant de fuite influe considérablement sur la durée de vie de la varistance tandis que l'augmentation de la température de frittage est très importante, pour l'augmentation de la conductivité des grains d'oxyde de zinc.

Nous avons tracé les caractéristiques de ces paramètres sous différentes températures et pour divers tension en courant alternatif et continu.

Mots clés : Varistances, ZnO, parafoudres, Vieillissement, température, courant de fuite, tension de seuil, coefficient de non linéarité.

«وما أوتيتم من العلم إلا قليلا»

A mes regretté parents,

A mon épouse,

A mes enfants Oussama...et Ryma,

A tous les membres de ma famille ainsi qu'à tous mes amis

Je remercie toutes ces personnes pour leur soutien moral, et spécialement mon épouse pour ses conseils et ses nombreux encouragements.

MOHAMED.

Remerciements

Je remercie Dieu,

Toute ma reconnaissance à Monsieur N.DEBBACHE mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant ce sujet, et ses valeureux conseils.

Je remercie Monsieur A.SAMIH Professeur à l'université de Jordanie pour ses conseils et sa patience tout au long de la période de mon stage.

Je remercie Monsieur Khaled d'avoir examiné et corrigé le manuscrite de ma thèse.

Je remercie Monsieur A.OMEIRI enseignant au département d'électrotechnique, à l'université de ANNABA d'avoir collaboré pour la réalisation d'un article.

Enfin merci à toutes les personnes qui mon soutenu de près ou de loin, même par un simple sourire.

Je suis très reconnaissant à l'égard de monsieur : M. HOUABES en acceptent de présider le jury de ma thèse ; L.HEROUS; H.LABAR et A.ABOUBOU en acceptant de faire partie du jury.

Mohamed.

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
(I-1)	Caractéristiques des différents types de surtensions.	08
(II-1)	Principes caractéristiques physico-chimiques des oxydes métalliques utilisés.	46
(IV-1)	Pente des courbes $\Delta I_f/I_f$ pour $V=0,55V_{s\text{ eff}}$.	78
(IV-2)	Pente des courbes $\Delta I_f/I_f$ pour $T=100^\circ\text{C}$	78
(IV-3)	Valeur des pentes pour $U=0,55 \times U_s$ et $T=100^\circ\text{C}$	79
(IV-4)	Valeur des pentes $\text{Log}(D.V) = f(1/t)$.	86
(IV-5)	Durée de vie pour $T=45^\circ\text{C}$	88
(IV-6)	Valeur des pentes pour les trois températures d'utilisation	89
(IV-7)	Durée de vie pour $T=45^\circ\text{C}$	90
(IV-8)	Valeur de U_R/U_S pour différents courants de chocs.	98

Liste des figures

Figures	Titre	Page
I-1	Ordre de grandeur des surtensions électrique.	07
I-2	Choc de manœuvre plein 250/2500 μ s.	09
I-3	Onde de surtensions de foudre normalisées	14
I-4	Constitution d'un éclateur aérien pour la MT.	16
I-5	Caractéristique courant - tension d'un éclateur	17
I-6	Caractéristique de la tension d'amorçage d'un éclateur	18
I-7	Parafoudre à base de varistance ZnO	23
I-8	Caractéristique I(V) type d'une varistance ZnO.	25
I-9	Variation de la résistance d'une varistance ZnO en fonction de la tension	26
I-10	Schéma résumant le rôle de la varistance	28
I-11	Principe de la protection	30
I-12	Microstructure d'une varistance	34
I-13	Diagramme de bande d'un joint de grain	35
I-14	Hauteur de barrière pour un joint de grain polarisé	37
I-15	Schéma électrique équivalent de la varistance	39
II-1	Procède de fabrication des varistances ZnO	47
II-2	Cycle de Préfritage	49
II-3	Cycle de frittage	50
II-4	Cycle de cuisson des électrodes	50
II-5	Cycle de frittage de la poudre par pulvérisation	51
III-1	Dispositif de mesure en continu	61
III-2	Dispositif de mesure en impulsionnel	62
III-3	Forme d'onde de la tension et du courant en impulsionnel	63
IV-1	Caractéristique courant-tension	66
IV-2	Variation du coefficient de non-linéarité en fonction de la tension	67
IV-3	Variation de la tension résiduelle en fonction du pic de courant absorbé par l'échantillon	68
IV-4	Dispositif expérimental permettant la mesure de C(U)	69

IV-5	Variation de la capacité en fonction de la tension	70
IV-6	Variation de la capacité en fonction de la fréquence	71
IV-7	Schéma de principe du circuit électrique permettant d'effectuer le vieillissement en alternatif	73
IV-8	Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.55x_{useff}$	75
IV-9	Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.65x_{useff}$	76
IV-10	Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.75x_{useff}$	77
IV-11	Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.55x_{useff}$	80
IV-12	Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.65x_{useff}$	81
IV-13	Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.75x_{useff}$	82
IV-14	Evolution du coefficient de non linearite en fonction du temps pour $u=0,55x_{u_{seff}}$	83
IV-15	Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,65x_{u_{seff}}$	84
IV-16	Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,75x_{u_{seff}}$	85
IV-17	Durée de vie en fonction de la température	87
IV-18	Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.8x u_s$	91
IV-19	Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.8x u_s$	92
IV-20	Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,8x_{u_s}$	93
IV-21	Trace de la courbe de durée de vie en fonction de la température	94
IV-22	Schéma de principe du circuit permettant de tracer la durée de vie pour différentes surtensions permanentes.	95
IV-23	Durée de vie pour des surtensions permanentes	96

IV-24	Schéma de principe du générateur de chocs	97
IV-25	Forme d'onde de tension et de courant $8/20\mu\text{s}$	98
IV-26	Evolution de la caractéristique courant-tension en fonction du nombre de chocs	99
IV-27	Energie d'activation en fonction de la tension	100
IV-28	Caractéristique courant tension avant et après polarisation continue	102
IV-29	Caractéristique courant-tension avant et après polarisation sinusoïdale	102
IV-30	Evolution de la capacité en fonction de la tension	103
IV-31	Variation de l'énergie d'activation en fonction de la tension	105
IV-32	Variation de l'inverse de la capacité en fonction de la tension	105

Liste des symboles

- BC : bande de conduction.
- BV : bande de valence.
- C : capacité de la varistance (F).
- Cdf : coup de foudre.
- Cp : capacité parasite.
- CST : courant stimulé thermiquement (A).
- D : coefficient de dégradation.
- DV : durée de vie (h).
- e : charge de l'électron
- ϵ : perméabilité diélectrique absolue (F/cm).
- E_f : niveau de fermi (eV).
- E_g : largeur de la bande interdite (eV).
- ϵ_0 : perméabilité du vide (F/cm).
- ϵ_r : perméabilité relative (F/cm).
- F : fréquence (HZ).
- F_m : phénomène de l'ensemble.
- F_p : phénomène parasite.
- I : courant circulant dans la varistance (A).
- I_f : courant de fuite (A).
- I_{nd} : courant nominal de décharge (A).
- I_s : courant de suite (A).
- i (t) : courant injecté.
- I (t) : courant instantané (A).

- I_{vs} : courant correspondant à la tension de seuil (v).
- J : densité de courant dans la varistance (A. cm⁻²).
- J₀ : constante liée au matériau (A. cm⁻²).
- K : constante caractéristique du matériau.
- K_b : constante de Boltzmann (1,38-10⁻²³ JK⁻¹).
- L : inductance.
- L_p : inductance parasite.
- n : nombre des électrons par unité de volume
- N_d : nombre des donneurs par unité de volume (m⁻³)
- N_s : nombre des états de surface (m⁻²)
- q : charge de l'électron
- Q : facteur de qualité
- R : résistance de la terre (Ω)
- S_d : facteur de défaut
- T : température (°C)
- t : temps (s)
- U_e : tension à l'entrer (V)
- U_s : tension de sortie (V)
- U_{seff} : tension de seuil effective (V).
- V : tension appliquée à la varistance (V)
- V_a : tension assignée (V)
- V_b : largeur de la barrière de potentiel (V)
- V_c : tension maximale d'écrêtage (V)
- V_g : gap de la varistance ZnO (3,2eV)
- V_r : tension résiduelle (V)

V_s : tension de seuil (V)

W_m : énergie maximale admissible ($J.m^{-3}$)

X_0 : réactance homopolaire.

X_d : réactance directe.

Z_c : impédance homopolaire caractéristique de la ligne.

$\bar{\sigma}$: constante de la fonction d'onde (S^{-1}).

ρ : densité de charge dans le grain de ZnO.

α : coefficient de non linéarité de la caractéristique courant-tension.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
Chapitre I	
Les surtensions et Microstructure des Varistances ZnO	5
Introduction.....	6
I-1 Surtensions de manœuvre.....	8
I-2 Surtensions temporaires.....	9
I-2-1 Surtensions à fréquence industrielle.....	10
I-2-2 Surtensions créés par le courant transitoire du transformateur.....	10
I-2-3 La ferrorésonance.....	11
I-3 Les surtensions de foudre.....	11
I-4 Protection contre les surtensions.....	13
I-4-1 L'éclateur.....	15
I-4-2 Parafoudres.....	18
I-4-3 Parafoudre à SiC.....	19
I-4-4 Parafoudres à base de varistances ZnO.....	20
I-4-5 Dimensionnement des parafoudres.....	21
I-5 Caractéristiques des varistances ZnO.....	23
I-5-1 Propriété électrique.....	23
I-5-2 Caractéristique courant-tension.....	24
I-5-3 LA protection.....	27
I-5-4 Paramètres caractéristiques des varistances ZnO.....	29
I-6 Microstructure.....	34
I-6-1 Théorie de la double barrière de Schottky.....	35
I-6-1-1 Description de la structure de la varistance.....	35
I-6-1-2 Surtension de la bande dans l'oxyde de zinc au contact de l'air.....	35
I-6-1-3 Expression du courant pour double barrière polarisée.....	37
I-6-1-4 Circuit électrique équivalent de la varistance.....	38

I-7 Mécanismes de conduction.....	39
I-7-1 Modèle de M.MATSUOKA.....	40
I-7-2 Modèle de J.D.LEVINE.....	40
I-7-3 Modèle de L.M.LEVINSON.....	41
I-7-4 Modèle de G.E.et G.BLATTER.....	41
I-7-5 Modèle de O.DORLANNE.....	42
I-8 Conclusion.....	42

Chapitre II

Etat de l'Art.....	43
II-1 Procédé de fabrication.....	44
II-1-1 Composition.....	44
II-1-2 Méthode de fabrication.....	44
II-1-3 Deuxième procédé : poudre obtenue par pulvérisation.....	49
II-1-4 Echantillons réalisés.....	51
II-2 Conclusion.....	53

Chapitre III

Dégradations des varistances ZnO.....	54
Introduction.....	55
III-1 Mécanismes de dégradation	56
III-1-1 Mécanisme de dégradation par diffusion d'ions dans les grains de ZnO...56	
III-1-2 Mécanisme de dégradation par désorption d'oxygène.....	57
III-1-3 Modèle de T.K.GUPTA et al.....	58
III-1-4 Modèle de K.SATO et al.....	58
III-1-5 Modèle de K.EDA et al.....	59
III-2 Détermination de la caractéristique I(V).....	59
III-2-1 Mesures en courant continue	60
III-2-2 Mesures en impulsionnel.....	61
III-3 Conclusion.....	62

Chapitre IV

Amélioration du Vieillissement des Varistances ZnO	63
Introduction.....	64
IV-1 Caractéristiques courant-tension.....	64
IV-2 Mesure de la capacité.....	67
IV-2-1 Mesure de la capacité en fonction de la fréquence.....	69
IV-3 Cas de la tension alternative.....	70
IV-4 Caractéristique de durée de vie en fonction de la température.....	85
IV-5 Vieillissement en continu.....	87
IV-5-1 Caractéristiques de durée de vie.....	89
IV-5-2 Durée de vie des varistances soumises à une surtension temporaire.....	93
IV-6 Essais aux chocs de tensions.....	95
IV-7 Interprétations des résultats.....	100
IV-7-1 Polarisation continu.....	102
Conclusion Générale.....	105
Références bibliographiques.....	108

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La consommation de l'énergie électrique sans cesse croissante, a entraîné l'extension du réseau de transport et le développement des lignes à très haute tension. En même temps la nécessité d'assurer une qualité de service suffisante a suscité l'installation de moyens de protection contre les surtensions. Ces dernières provoquent en effet de nombreuses défaillances du matériel et peuvent être dangereuses pour les usagers.

Le réseau a d'abord été protégé par des éclateurs. Puis des parafoudres associant des éclateurs et des varistances à carbure de silicium ont été mis en œuvre. Enfin, récemment, des dispositifs à base de varistances à oxyde de zinc (ZnO) ont remplacé avantageusement les éléments antérieurs. Cette substitution est devenue possible grâce aux propriétés remarquables qu'offrent les varistances ZnO (1-4). En effet, ces éléments, de fabrication aisée et de faible coût, sont des céramiques polycristallines constituées de grains semi-conducteurs dopés n séparés par des joints de grains. Cette structure leur confère une caractéristique courant-tension $I(V)$ fortement non-linéaire, un très court temps de réponse et une grande capacité d'absorber de l'énergie.

Le mécanisme de conduction le plus communément admis pour expliquer l'effet de varistance est celui qui met en jeu l'existence d'une double barrière de Schottky au joint de grains. Le courant est alors activé thermiquement et obéit à la loi d'émission thermoélectronique (23).

L'examen de la loi de variation du courant montre sa forte dépendance avec la température de l'élément. Par conséquent, tout échauffement agira directement sur la valeur du courant de fuite. Cet échauffement peut être provoqué par effet joule du au courant de fuite lui-même. Il peut aussi résulter de l'absorption d'une énergie transitoire lors des surtensions. Ces dernières peuvent, par ailleurs provoquer une dégradation des varistances qui entraîne une augmentation du courant de fuite et donc de la puissance dissipée même après retour à la température ambiante.

Tous ces phénomènes seuls ou superposés peuvent conduire à l'emballement thermique par un processus cumulatif.

Dans ce travail nous avons étudié les comportements thermique, et électrique de plusieurs types de varistances. Plusieurs heures ont été consacrées à leur

vieillessement. Les avantages et les inconvénients de ce type de protection ont été évalués grâce aux essais de vieillissement. Nous avons étudié l'influence une courant de fuite, de la tension de seuil, et du coefficient de non-linéarité sur le comportement électrique et thermique et sur leur durée de vie.

Dans ce cadre les travaux réalisés portent sur les points suivants :

- Etude des comportements électrique, et thermique des varistances ZnO pendant un vieillissement de longue-durée sous tension alternative dont la valeur efficace est de 55%, 65% et 75% de la tension de seuil des varistances.
- Etude du comportement chimique de longue-durée des varistances dans trois séquences de vieillissement : une première à 100°C, une deuxième à 120°C, et une troisième à 150°C pour les trois types de tension précédemment citées.

Etude du comportement purement thermique de courte-durée des varistances en appliquant la tension alternative avec différentes amplitudes à plusieurs températures.

Application de chocs de grande-amplitude (5/15 μ s, de 20à 65KA) aux varistances pour étudier leur comportement électrique et thermique.

Cette thèse comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous rappelons les différentes contraintes qui s'appliquent aux parafoudres, essentiellement les différentes surtensions, et les moyens de protections : les parafoudres à varistances ZnO et ceux qui ont été utilisés auparavant.

Nous rappelons les généralités des varistances ZnO, leurs caractéristiques : fondamentales, électriques, physiques et chimiques ; leur microstructure. Les principaux modèles de la conduction dans les varistances ZnO.

Dans le deuxième chapitre, il est question de l'état de l'art. Le procédé de fabrication qui a été utilisé au laboratoire de génie électrique de Gordanie pour l'élaboration des échantillons qui ont servi aux expériences, en employant deux méthodes : classique et de pulvérisation. Le rôle des additifs approprié employé dans la poudre, pour atteindre notre objectif.

Dans le troisième chapitre nous avons expliqué les différents mécanismes de dégradations, ainsi que les phénomènes physiques régissent la dégradation des varistances à oxyde de Zinc lorsque celle-ci est soumise à différentes contraintes, et les divers dispositifs expérimentaux utilisés dans ce travail.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude du vieillissement et en particulier la durée de vie des varistances ZnO sous différentes tensions et températures, tous les résultats sont présentés et puis commentés. Enfin nous tirons les conclusions de tous les résultats.

Chapitre I

Les surtensions et Microstructure des Varistances ZnO

I) INTRODUCTION :

Le développement industriel entraîne une forte croissance de la demande de l'énergie électrique et la grande superficie d'un territoire nécessite le transport à grandes distances.

Depuis lors, cette faculté extraordinaire, presque magique, transmettre de l'énergie à distance, de façon instantanée est mise en œuvre dans pratiquement tous les domaines d'application de l'électricité.

- L'électricité, pendant ce dernier siècle, s'est développée et est devenue l'une des formes énergétiques les plus employées par l'être humain.

- Pour répondre à la consommation toujours croissante et pour permettre de traiter des puissances plus grandes sans augmenter de façon aberrante les chutes de tensions relatives, les sections des conducteurs, les moyens de l'isolement et l'encombrement du matériel. Pour cela des réseaux ont été créés avec des tensions de plus en plus élevées.

L'ordre de grandeur des amplitudes et des durées est donné par la figure I-1.

Il est évident qu'à partir d'un certain niveau, l'isolement joue un rôle primordial dans les réseaux électriques, il existe certaines contraintes électriques auxquelles aucune isolation économiquement réalisable ne résisterait : c'est le cas des surtensions dues, soit aux perturbations internes liées au réseau lui-même (surtensions de manœuvre), soit aux perturbations externes, liées à la nature (surtensions atmosphériques) (1,2).

On accepte alors les amorçages inévitables en des points où ils peuvent se produire sans dommage durable et l'on protège les autres points en équipant le réseau d'appareils de protection tels qu'éclateurs ou parafoudres; le rôle de ces appareils est de limiter les surtensions qui parviennent à leurs bornes en écoulant à la terre un maximum de l'énergie injectée dans le réseau par la contrainte.

Les surtensions sont généralement classées en :

a) - surtensions internes qui dépendent du réseau;

- surtensions de manœuvre.

- surtensions à fréquence industrielle.

b) - surtensions externes, généralement d'origine atmosphérique;

- surtensions de foudre.

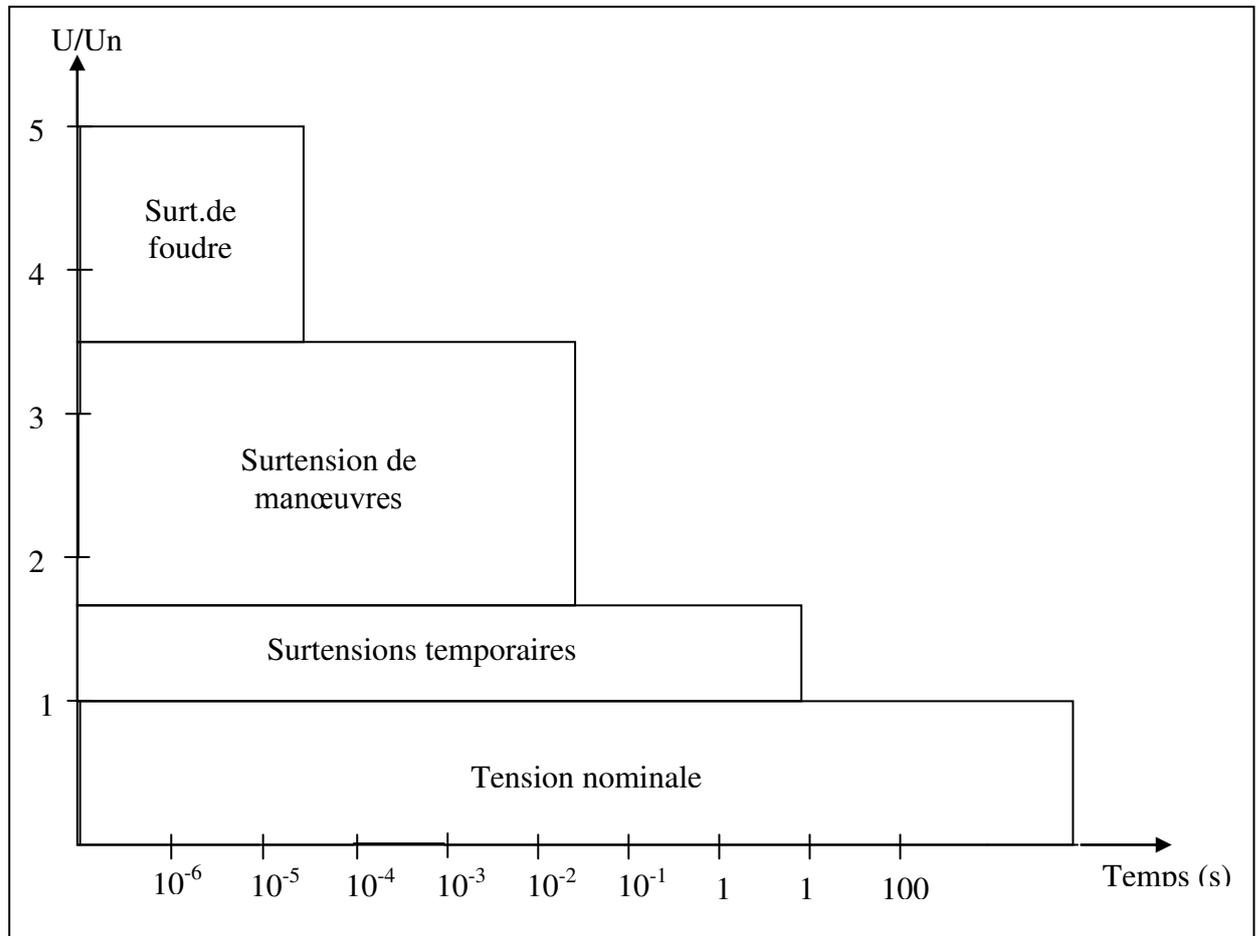


Figure I-1 : ordre de grandeur des surtensions électriques.

Leurs principales caractéristiques sont décrites dans le tableau (I-1).

Ces perturbations qui se superposent à la tension du réseau peuvent s'appliquer selon deux modes:

- en mode commun, entre les conducteurs actifs et la terre,
- en mode différentiel, entre les différents conducteurs actifs.

Dans les deux cas, les dégâts occasionnés proviennent d'un claquage diélectrique entraînant des destructions de matériels sensibles et notamment de composants électroniques.

Surtension	durée	Raideur du front de montée, Ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
A fréquence industrielle	Longue voire très longue (h)	Fréquence du réseau	Faible
Manœuvre	Courte (ms)	Moyenne 1 à (200 KHz)	Moyen
Atmosphérique	Très courte (μ s)	Très élevée (1000kv/ μ)	fort

Tableau (I-1): caractéristiques des différents types de surtensions.

Les installations subissent périodiquement un certain nombre de surtensions non négligeables. Ces perturbations qui induisent des dysfonctionnements voire la destruction des matériels conduisent, en conséquence, à des interruptions de service. Des appareils de protection, tels que les parafoudres HT et BT, existent. Mais pour se protéger correctement des diverses surtensions apparaissant sur le réseau, il est nécessaire de bien les connaître et donc de les caractériser, c'est l'objet de ce chapitre (4, 5,6).

I-1- Surtensions de manœuvre :

Une modification brusque du régime établi dans un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ce sont généralement des ondes de surtensions haute fréquence ou oscillatoires amorties. Elles sont dites à front lent. Leur front est compris entre 100 et 500 μ s.

Les surtensions de manœuvre peuvent être créées principalement de l'une des manières suivantes :

- L'ouverture d'appareil de protection (fusible, disjoncteur,).
- Coupure des courants inductifs comme le déclenchement d'un transformateur à vide.
- Changements dans les circuits capacitifs comme enclenchements de batteries de condensateurs sur la ligne.

L'ordre de grandeur pour l'amplitude des surtensions de manœuvre est pratiquement de 1,3 à 3,4 U_n dans les réseaux aériens et de 2,2 à 3,5 U_n dans les réseaux de

câbles [51]. La forme conventionnelle d'une surtension de manœuvre est de 250/2500 μ s, figure I-2 (8,9).

Les surtensions de manœuvre sont la cause de peu de défaillances dans le réseau par rapport aux surtensions de foudre. Toutefois il faut faire attention au niveau d'énergie associée à ces surtensions car, à cause de leur durée, le parafoudre absorbe une énergie relativement importante qui peut provoquer dans les cas extrêmes un emballement thermique en particulier pour celui équipé de varistances ZnO.

I -2 Surtensions temporaires :

Ces surtensions se manifestent essentiellement lors de la modification de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre. Elles sont dans la plupart des cas de faible amplitude, de longue durée et de basse fréquence. Ces surtensions peuvent persister sur le réseau pendant une période relativement longue, ce qui peut être fatal pour les parafoudres qui ne seraient pas capables de dissiper l'énergie. Les surtensions temporaires sont de forme

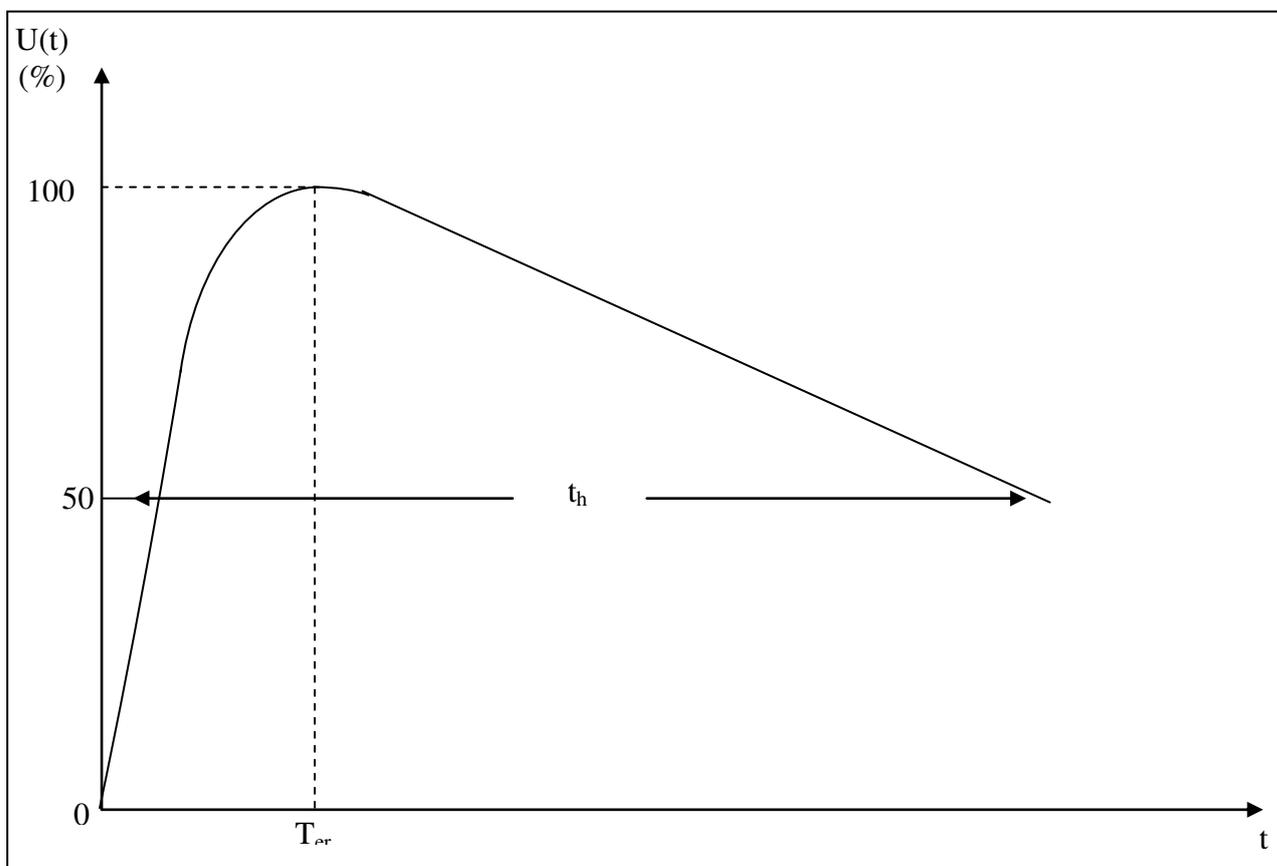


Figure I-2 : Choc de manœuvre plein 250/2500 μ s.

alternative ou oscillatoire et se présentent soit à la fréquence industrielle, soit à d'autres fréquences notamment les harmoniques générées par la ferrorésonance ou par le courant transitoire de mise sous tension des transformateurs qui provoque des résonances (10,12).

I-2-1 Surtension à fréquence industrielle :

Celles de premier groupe, de fréquences industrielles les plus nombreuses, apparaissent dans les réseaux à la suite de l'augmentation de la tension des phases saines, lors d'un défaut à la terre sur une phase dans un système triphasé. Il peut être provoqués par les défauts d'isolement phase/masse ou phase/terre sur un réseau à neutre isolé ou impédant, ou par la rupture de conducteur neutre. A ce moment là, les appareils monophasés vont être alimentés à la tension composée : $U_{ph} \times \sqrt{3}$. D'autres cas de surtensions temporaires à fréquence de service sont provoqués lorsqu'un alternateur ou un transformateur de réglage sont délestés par la coupure d'une forte consommation d'électricité. La tension croît à leurs bornes, jusqu'à ce que les régulateurs de tension interviennent et ramènent la surtension temporaire à la tension nominale.

Elles peuvent aussi être dues à la rupture d'un conducteur. Par exemple si un câble moyenne tension tombe sur une ligne basse tension, il provoque une surtension temporaire qui reste sur le réseau basse tension pendant plusieurs cycles jusqu'au fonctionnement des appareils de protection. Et finalement ces surtensions à fréquence industrielle peuvent être provoquées par l'effet Ferranti à l'extrémité ouverte d'une ligne de transport de grande longueur.

I-2-2 Surtensions créées par le courant transitoire du transformateur :

La mise sous tension brutale d'un transformateur peut provoquer le passage d'un courant unidirectionnel dont l'amplitude dépend le l'angle de phase au moment de mise sous tensions mais aussi de flux rémanent dans le circuit magnétique (polarité et amplitude). La composante principale de ce courant est de 50 Hz, mais il comporte des harmoniques. Dans certains cas, le parcours de courant peut provoquer des surtensions temporaires à fréquence industrielle ou en produisant des

résonances à l'une de ces harmoniques. Ce phénomène peut s'amortir très lentement et rester sur le réseau pendant plusieurs dizaines de périodes (13,14).

I-2-3 La ferrorésonance :

C'est un phénomène de nature oscillatoire qui peut générer des surtensions temporaires se manifestant parfois très longtemps sur le réseau. Beaucoup de défaillances de parafoudres ZnO pourraient être dues aux surtensions de ferrorésonance, car selon les rapports, elles arrivent par temps clair (pas de foudre) sur le réseau haut tension (14).

Les transformateurs modernes avec un circuit magnétique de faibles pertes et de très petit courant magnétisant, favorisent l'amorçage et le maintien de la ferrorésonance (14,16).

Il faut, par conséquent, utiliser une nouvelle génération de parafoudres qui soient dimensionnés correctement sur le plan thermique.

La ferrorésonance peut prendre naissance par interaction de la capacité d'un réseau avec une inductance non linéaire, particulièrement celle d'un transformateur à vide. Elle présente certaines analogies avec résonance classique et s'en distingue toutefois par le fait que l'inductance mise en jeu n'est pas définie de façon univoque mais varie avec la saturation. La ferrorésonance peut se produire avec des valeurs de capacité très différentes. L'amplitude maximale de la plupart de ces surtensions est de l'ordre de 1,5 à 2 U_n . Toutefois dans les cas où le transformateur est alimenté par un câble long, elle peut atteindre une valeur voisine de 2,5 U_n (15,20).

La ferrorésonance peut être de type série ou de type parallèle. C'est la ferrorésonance série qui seule présente un danger pour les transformateurs de puissance, et par conséquent, pour le parafoudre parallèle.

I-3 Les surtensions de foudre :

La foudre a pour origine la formation de nuages orageux dont la masse est de quelques centaines de milliers de tonnes d'eau, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres et dont l'altitude de la partie basse est comprise entre deux et trois kilomètres (9, 11,18). La répartition des charges électriques, positives dans la partie haute du nuage d'une part et négatives dans la partie basse d'autre part, lui donne

l'aspect d'un condensateur. La rupture diélectrique à l'intérieur du nuage, engendre une décharge électrique accompagnée de l'éclair, et peut provoquer une élévation de potentiel d'une ligne aérienne proche. On peut considérer aussi le sol comme une électrode de charge opposée à la partie basse du nuage, l'air constituant le diélectrique du condensateur. La foudre ou décharge, a lieu lorsque le gradient limite est atteint. Cela se concrétise par la formation d'un canal conducteur entre le sol et le nuage qui va permettre de décharger l'énergie du nuage en écoulant un courant intense (21,22). On désigne ce type de décharge de coup de foudre négatif. Il représente 80 à 90% des décharges atmosphériques dans les régions à climat tempéré (22). Par contre, les coups de foudre sont dits positifs lorsque la partie positive, en général sous forme d'îlots à la base du nuage, se décharge. Ce type de décharge est le plus contraignant étant donné qu'il véhicule plus d'énergie. Notons que les aspérités ou saillies du terrain (arbre, tour, pylône, etc....) offrent des points d'impacts préférentiels, à cause de la croissance du champ électrique par effet de pointe. De plus, de nombreux coups de foudre sont multiples, c'est-à-dire que plusieurs impulsions de courant de forte amplitude s'écoulent le long du même canal ionisé, certaines décharges multiples pouvant durer jusqu'à 1 seconde.

On distingue deux modes de surtensions engendrées par les coups de foudre :

- **Le coup de foudre direct** : dans le cas où la décharge frappe directement la ligne. On admet que le canal de foudre se comporte comme un générateur de courant à forte impédance interne. Après le foudroiement de la ligne, le courant se répartit par moitié de part et d'autre point d'impact et se propage le long du conducteur (12,18). Il entraîne avec lui une onde de tension dont la valeur instantanée est approximativement égale à $v(t) = Z i(t)/2$ où Z est l'impédance de l'onde. Cette onde de courant à une forme voisine de la bi-exponentielle et une amplitude de quelques kA à environ 100 kA. La vitesse de croissance du courant se situant entre 10 kA/ μ s et plus de 80 kA/ μ s. Ce qui donne des fronts de montée de 1 à 10 μ s. La queue de ces impulsions est de l'ordre de 100 μ s pour les coups de foudre à polarité négative, de l'ordre de 1ms dans le cas contraire. Le spectre de fréquence s'étale de 20 kHz à environ 1 MHz (12).

- **Le coup de foudre indirect** : survient lorsque la décharge frappe un support ou un câble de garde. Il se produit alors un amorçage en retour dans le cas de réseaux BT et MT.

Quand le coup de foudre frappe le sol au voisinage d'une ligne, il apparaît une surtension par couplage électrostatique (150 à 500 kV) et électromagnétique (jusqu'à 100 kV).

La fréquence de foudroiement d'une zone dépend de la hauteur des conducteurs au dessus du sol, de la largeur de la ligne et de la sévérité orageuse. Cette dernière est exprimée habituellement par le niveau kéraunique, définie par le nombre de jours par an où l'on entend le tonnerre en un lieu donné (18).

L'amplitude des surtensions d'origine atmosphériques est pratiquement de 2 à 5 fois la tension nominale du réseau, et leur temps de montée est compris entre 0,1 et 10 μ s. L'onde conventionnelle universellement admise comme représentative de ces surtensions, est l'onde pleine normalisée dite 1,2/50 μ s figure I-3a. Cette onde a une forme voisine de la bi-exponentielle :

$$V(t) = v_0 [\exp(-\delta_2 t) - \exp(-\delta_1 t)] \quad (I-1)$$

avec $\delta_1 = 6,05 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ et $\delta_2 = 1,43 \times 10^4 \text{s}^{-1}$.

L'apparition d'amorçage, aux éclateurs ou par contournement de chaînes d'isolateurs, transforme souvent cette onde en "onde coupée", figure I-3b.

L'ensemble des surtensions déjà citées produit des avaries de matériel par destruction locale de l'isolation (perforation ou contournement), des interruptions de service (par amorçage à la terre et amorçage entre conducteurs de phase), des incendies et des accidents résultant de défaut à la terre ou de contacts entre haute et basse tension (22).

I-4 Protection contre les surtensions :

Elle consiste à installer des appareils qui ont pour but d'éviter la destruction de l'isolation du matériel, de réduire les interruptions de service et de limiter les risques d'électrocution résultant des amorçages dus aux surtensions et des transmissions d'ondes entre réseaux qui peuvent en résulter (8,9,13).

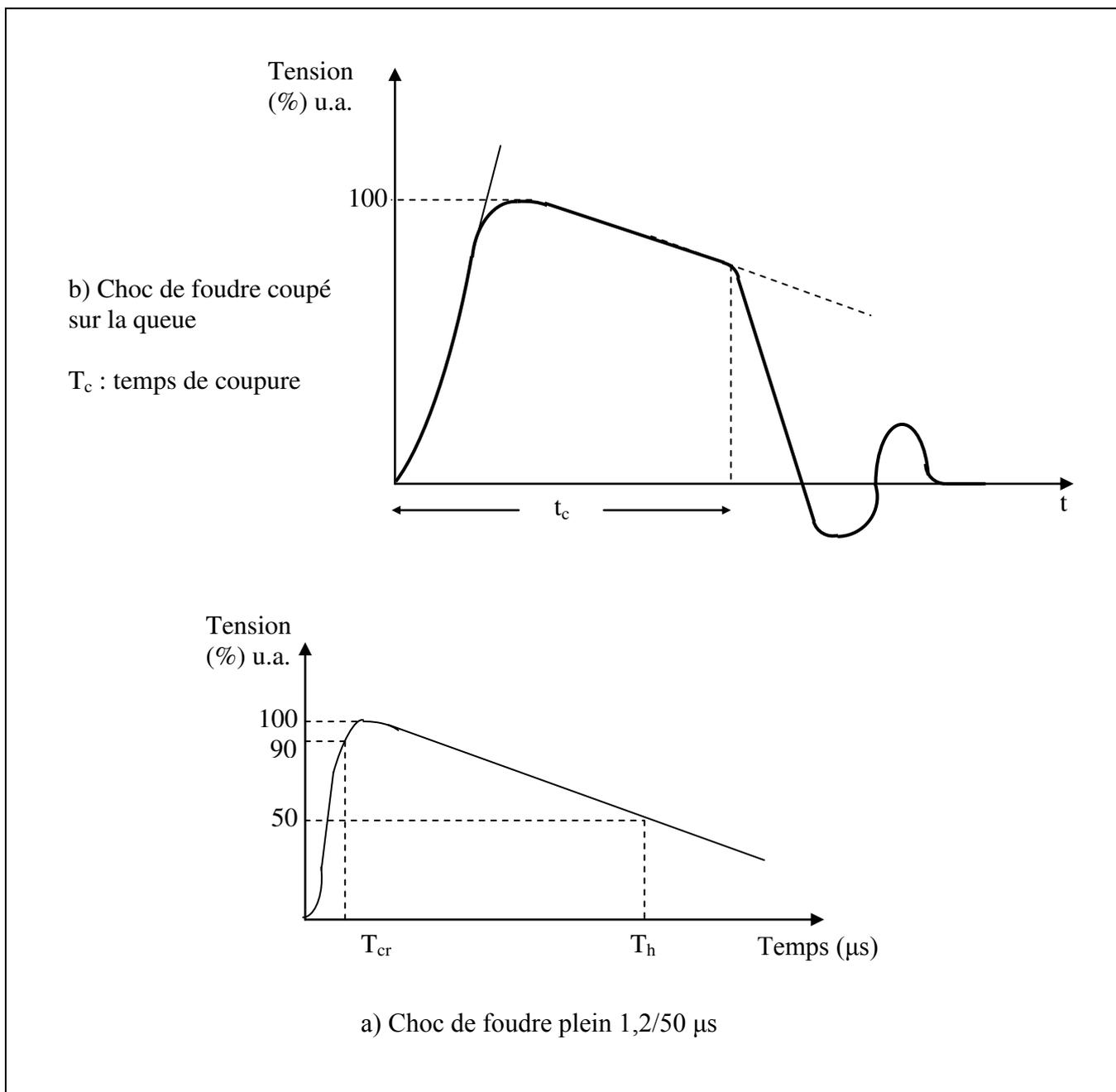


Figure I-3 : Onde de surtensions de foudre normalisées

Une première approche de la protection consiste à installer des anneaux ou des câbles de gardes reliés à la lettre, des paratonnerres, de mettre le neutre à la terre (17) etc..... ces mesures ont pour effet de soustraire partiellement les installations à l'influence des surtensions et d'en atténuer l'action.

La seconde approche consiste à employer des appareils de protection placés soit en série, soit parallèle avec le circuit considéré.

Les protections séries regroupent les filtres L/C qui agissent dans le domaine fréquentiel et les disjoncteurs et fusibles actifs contre les courts-circuits.

Les protections parallèles établissent une communication transitoire ou permanente entre l'installation à protéger et la terre ou la masse.

Un dispositif ou appareil de protection parallèle doit, pour répondre aux exigences mentionnées plus haut, avoir les caractéristiques suivantes :

- Absorber une forte énergie ;
- Limiter la surtension à une valeur inférieure au niveau de protection lui-même inférieur à la tension de tenue du matériel ;
- Un très court temps de réponse ;
- Une consommation nulle en régime permanent ;
- Une bonne stabilité dans le temps.

Actuellement, on ne dispose d'aucun appareil satisfaisant la totalité de ces propriétés mais il en existe un certain nombre qui réalisent avec succès quelques unes de ces exigences et sont largement utilisés pour assurer la protection.

I-4-1 L'éclateur :

L'éclateur figure I-4 est constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions du réseau dépassent le niveau de protection qui sera défini ultérieurement (9,10,12).

La forme des électrodes est très variable suivant le cas. Pour les réseaux MT à 20kV, sont utilisés des éclateurs à cornes munis d'une tige anti-oiseaux, les cornes sont destinées à provoquer un allongement de l'arc afin d'en faciliter l'extinction. L'allure générale de la caractéristique courant-tension d'un éclateur est donnée dans la figue I-5. Elle possède trois zones correspondant à des régimes différents :

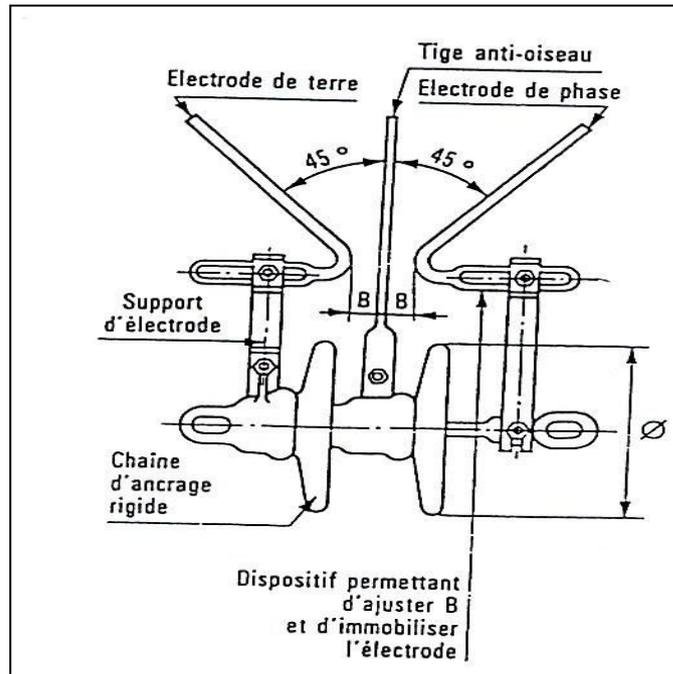


Figure I-4 Constitution d'un éclateur aérien pour la MT.

- Zone 1 : c'est le lieu de fonctionnement en régime permettant, le courant est très faible ($<10^{-9}$ A) et une tension d'amorçage très variable selon la raideur de l'onde incidente.
- Zone 2 : c'est une zone de transition dans laquelle la décharge est initiée. Celle-ci provoque l'amorçage de l'éclateur.
- Zone 3 : elle correspond à la région des courants forts, l'éclateur s'y comporte comme un court-circuit (il persiste une tension d'arc de très faible valeur).

L'intérêt principal des éclateurs est leur faible prix associé à la facilité de réglage de la tension d'amorçage en jouant sur leur écartement. Malheureusement, ils présentent de nombreux inconvénients (10) :

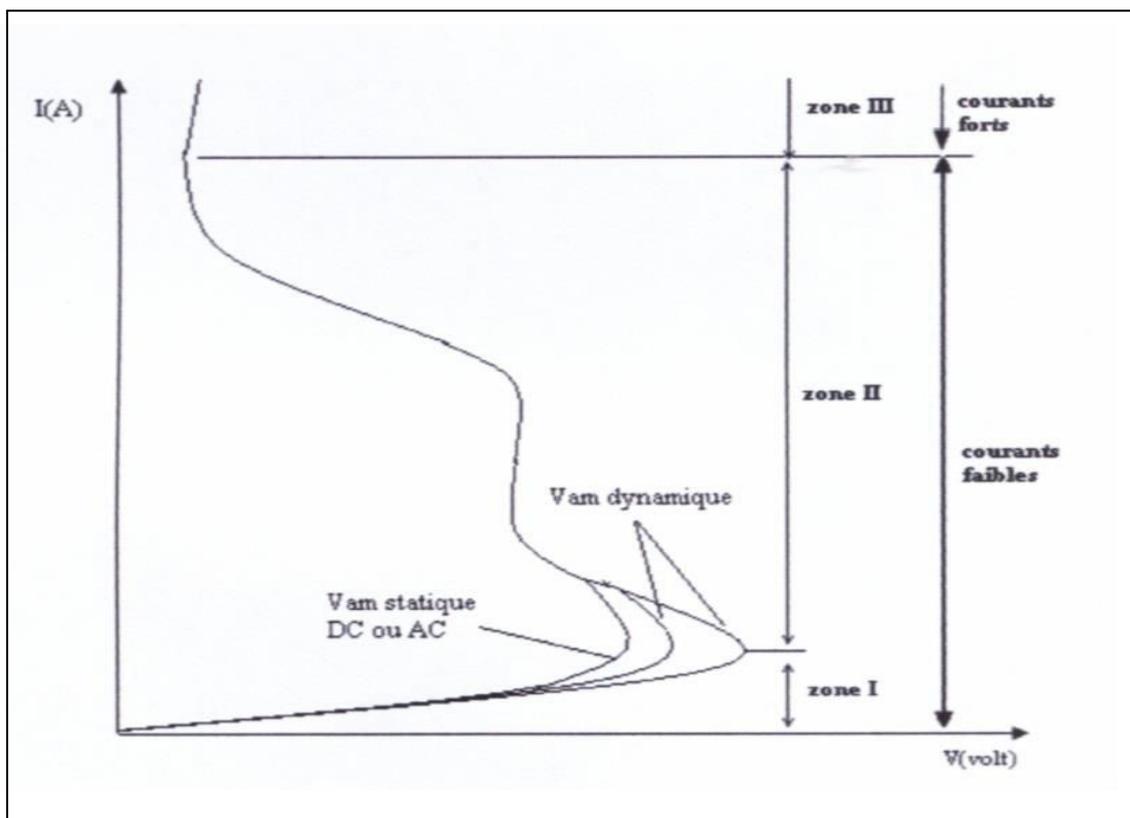


Figure I-5 : Caractéristique courant - tension d'un éclateur

- En général, les éclateurs ne se désamorcent pas d'eux même, ce qui provoque une coupure de la ligne par l'action des disjoncteurs et élimine donc la possibilité de les utiliser pour la protection contre les surtensions de manœuvre.
- Le temps de réponse des éclateurs est relativement grand (jusqu'à quelque μs) et dépend de la pente dV/dt de la surtension. Il est donné par l'intersection de cette pente avec la caractéristique dynamique d'amorçage figure I-6. Il en résulte un dépassement du niveau de protection d'autant plus important que dV/dt est grand.
- Le fonctionnement de l'éclateur provoque une onde coupée à front raide ce qui peut entraîner des avaries du matériel bobiné ou générer des surtensions par réflexion.

- Le niveau d'amorçage des éclateurs est tributaire des conditions atmosphériques, de plus le givre en s'accumulant sur les électrodes peut provoquer des fonctionnements intempestifs.

Pour remédier à ces divers défauts d'autres dispositifs, appelés parafoudres, ont été imaginées pour protéger le matériel contre les surtensions.

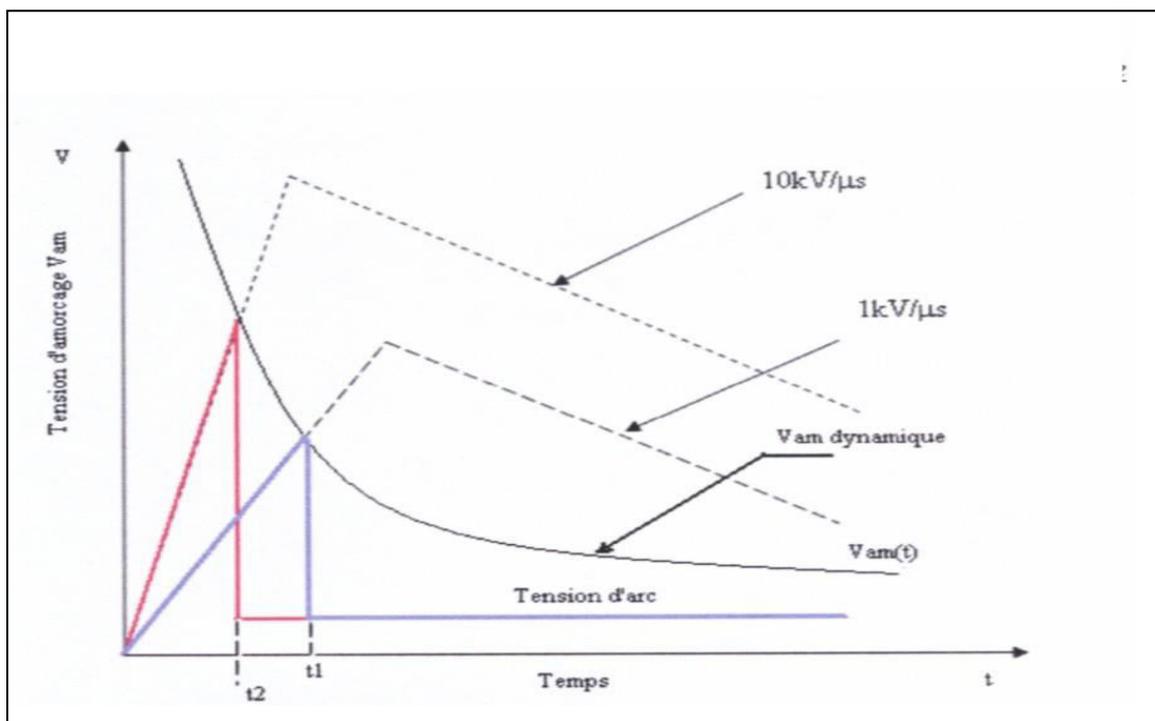


Figure I-6 : Caractéristique de la tension d'amorçage d'un éclateur

I-4-2 Parafoudres :

Les parafoudres sont des appareils qui écoulent, comme les éclateurs, une onde de courant lorsqu'une surtension arrive à leurs bornes. Cette surtension est écrêtée à une valeur acceptable pour le matériel à protéger. Le courant de suite qui les traverse après la perturbation est négligeable ce qui évite, en général le fonctionnement des disjoncteurs du réseau. (Le courant de suite est le courant qui traverse le parafoudre sous la tension nominale après la cessation de la perturbation. Dans le cas des éclateurs amorcés, donc conducteur, il est pratiquement égal au

courant de courant-circuit). Le service est, dans ces conditions, assuré sans coupure. Deux types de parafoudres sont utilisés :

I-4-3 Parafoudre à SiC :

Ces appareils constitués essentiellement d'une ou plusieurs résistances à caractéristiques non linéaires, associées en série avec des éclateurs. L'ensemble étant placé à l'intérieur d'une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (10).

Les résistances non-linaires sont formées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disque. Elles ont un coefficient de non-linéarité de l'ordre de 5 défini par la formule.

$$\alpha = d \log (I) / d \log (V) \quad (I-2)$$

Lorsque survient une surtension suffisante, les éclateurs s'amorcent permettant l'écoulement du courant de décharge au travers des varistances. La résistance de celles-ci et d'autant plus faible que le courant est élevé. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue. La valeur du courant décroît rapidement pour être interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro.

Par rapport à l'éclateur le parafoudre à SiC présente les avantages suivants :

- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour des surtensions à front raide.
- L'élimination du défaut par une extinction spontanée de l'arc (pas de courant de suite au-delà d'une demi-période).
- Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde coupée (onde à front raide).
- Les contraintes atmosphériques sont supprimées, car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche.

Parmi les inconvénients on peut citer :

- Un coût beaucoup plus élevé que l'éclateur.

- Les varistances SiC ne supportent pas un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une surtension temporaire.

Pour éviter ces inconvénients, de nouvelles résistances non linéaires à base de ZnO, appelées varistances ZnO, ont vu le jour ces dernières années. Le coefficient de non linéarité beaucoup plus élevé que celui des varistances SiC (compris entre 20 et 50), a entraîné l'apparition d'une nouvelle génération de parafoudres dépourvus d'éclateur.

I-4-4 Parafoudres à base de varistances ZnO

L'élaboration des varistances qui sont des céramiques requiert beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur stabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible (3,7,19). Actuellement l'utilisation de ces parafoudres est en train de se généraliser grâce, notamment :

- A la forte non linéarité de la caractéristique courant/tension, ce qui se traduit par un faible courant de fuite (de l'ordre des μA) permettant l'élimination des éclateurs série (et donc des inconvénients qui leur sont liés).
- Au temps de réponse très court (de l'ordre de 10 ns).
- A la capacité d'absorption de l'énergie (plus de 150j/cm^3).
- Au bas niveau de protection permettant la réduction de l'isolation du matériel qui lui est associé.
- A un encombrement plus réduit que dans les dispositifs antérieurs.

Cependant il persiste quelques inconvénients qui sont :

- La dégradation des caractéristiques consécutives à l'absorption de forte puissance, d'où une augmentation du courant de fuite.
- Dans la zone de fonctionnement normal, un accroissement de la température qui entraîne l'augmentation de la puissance consommée pouvant conduire à l'emballement thermique.

Les parafoudres sont parcourus par un courant permanent appelé courant de fuite. Ce courant dépend fortement de la température d'une part, et de la dégradation que

peuvent subir les varistances d'autre part. Il dépend aussi de manière transitoire de l'échauffement que provoque une surtension. Sous ces conditions deux cas peuvent se présenter :

- La température des varistances reste inférieure à un seuil critique et en l'absence de dégradation, le parafoudre retrouve son état initial au bout d'un certain temps après retour à la température normale de fonctionnement.

Les besoins d'amélioration de la qualité de service (dans la distribution de l'énergie électrique) justifient l'utilisation systématique de parafoudres ZnO, parce qu'ils présentent au moins trois avantages techniques par rapport aux éclateurs :

- Diminutions du nombre de coupures brèves : un éclateur amorcé ne s'éteint pas de lui-même car le courant de suite qui persiste après le passage de l'onde de foudre alimente l'arc. Pour assurer l'extinction de ce dernier, la protection provoque un cycle de déclenchement-réenclenchement rapide du disjoncteur MT situé au poste source. Une coupure de 0,3 s, très préjudiciable au bon fonctionnement des dispositifs électroniques ou autres utilisés par les clients se produit.
- Diminution du nombre de coupure permanente : diverses causes peuvent faire amorcer l'éclateur sans qu'il y ait surtension, telles que : oiseaux, paille, rongeurs, givres etc.
- Diminution du risque de montée de potentiel des installations voisines : lors de l'écoulement à la terre du courant de suite par l'éclateur, les masses locales et la prise de terre montent, à un potentiel pouvant atteindre quelques kV par rapport à des circuits raccordés à d'autres prises de terre.

I-4-5 Dimensionnement des parafoudres :

Dimensionner un parafoudre consiste à définir les dimensions des céramiques pour protéger un réseau ayant une tension spécifiée. Deux exigences contradictoires limitent le choix de la hauteur de la colonne de varistances (25,26) :

- D'une part, la recherche d'un bas niveau de protection fixe une limite supérieure de la hauteur car la tension résiduelle (due à un courant de décharge) lui est proportionnelle.

- D'autre part, les phénomènes de vieillissement sont d'autant plus sensibles que la tension appliquée par unité de longueur est grande. A tension de service donnée, cela impose une limite inférieure à la hauteur.

Un compromis consiste à fixer dans cette plage, la hauteur des varistances selon le critère qu'on veut favoriser.

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable en toute circonstance de dissiper sous forme de chaleur l'énergie qui lui est imposée. Pour éviter un emballement thermique, la température des varistances doit rester inférieure à une limite supérieure. Pour respecter cet impératif, on peut agir de deux façons :

- Soit réduire la puissance dissipée en augmentant la hauteur de la colonne, c'est-à-dire en relevant le niveau de protection.
- Soit augmenter la puissance dissipable par le parafoudre en choisissant des varistances de diamètre plus important ou, ce qui est mieux en multipliant le nombre de varistances mises en parallèle.

Une autre approche consiste à placer des entretoises métalliques entre les céramiques augmentant ainsi les surfaces d'échange et donc la puissance dissipée tout en gardant un bas niveau de protection figure (1-7).

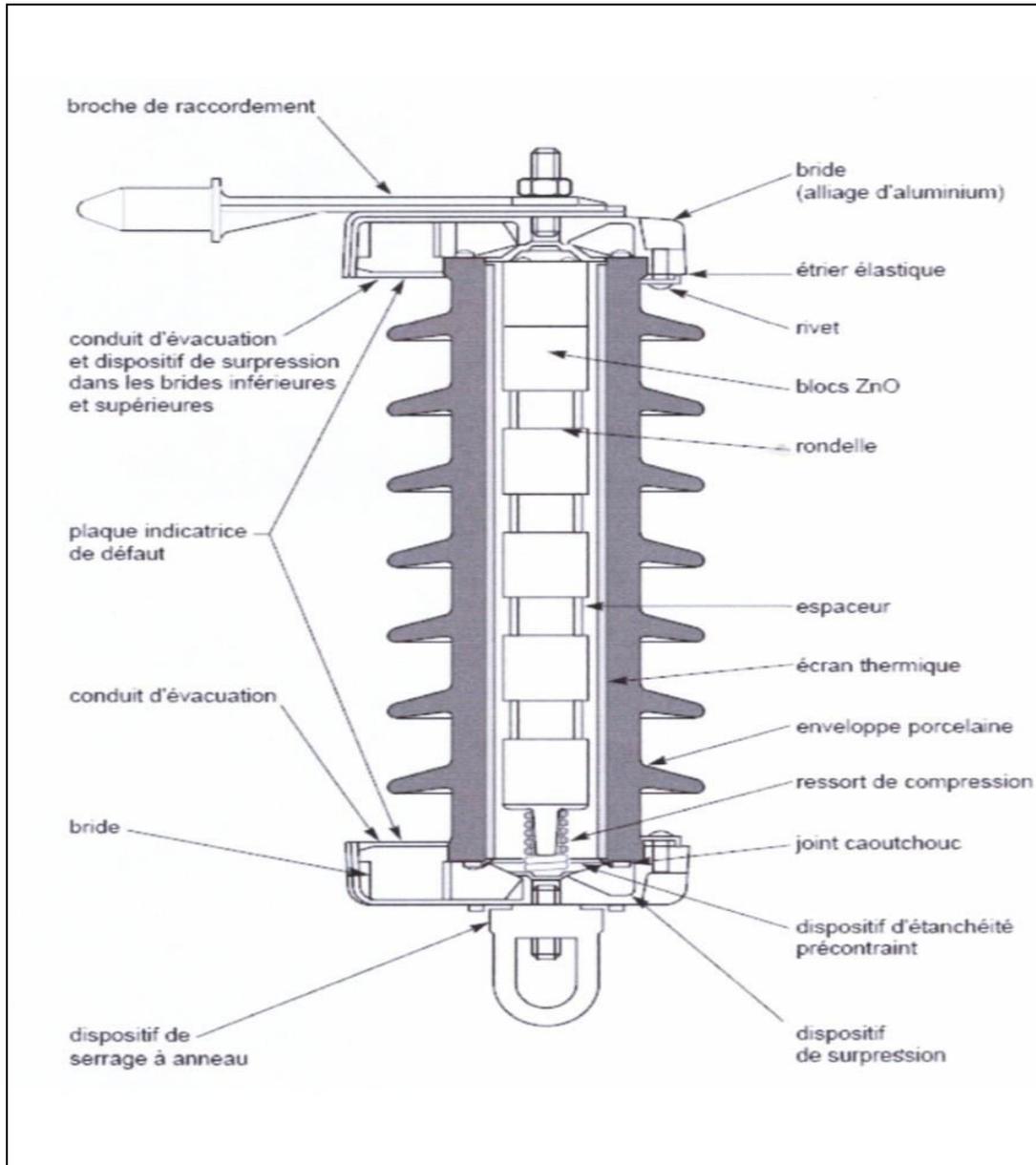


Figure I-7 : Parafoudre à base de varistance ZnO

I - 5 Caractéristiques des varistances ZnO

I - 5 -1 Propriété électrique :

La propriété la plus importante des varistances ZnO est la non linéarité de sa caractéristique courant tension $I (V)$

I-5-2 Caractéristique courant-tension :

La relation entre le courant et la tension (invariablement entre la densité de courant J et le champ électrique E), illustré par la figure (I-8) est de la forme suivante :

$$I = K.V^\alpha \quad (I-3)$$

I : courant circulant dans la varistance

V : tension appliquée à la varistance.

α : Coefficient de non linéarité

K : Constante propre au matériau.

D'après la figure (I-8), les tensions inférieures à la tension de seuil V_s , il y a linéarité entre le courant et la tension, dans ce cas α est égale à l'unité, Au-delà de V_s apparaît la non linéarité, et le courant augmente rapidement par rapport à la tension, α augmente considérablement. Après la caractéristique se sature, et la linéarité revient.

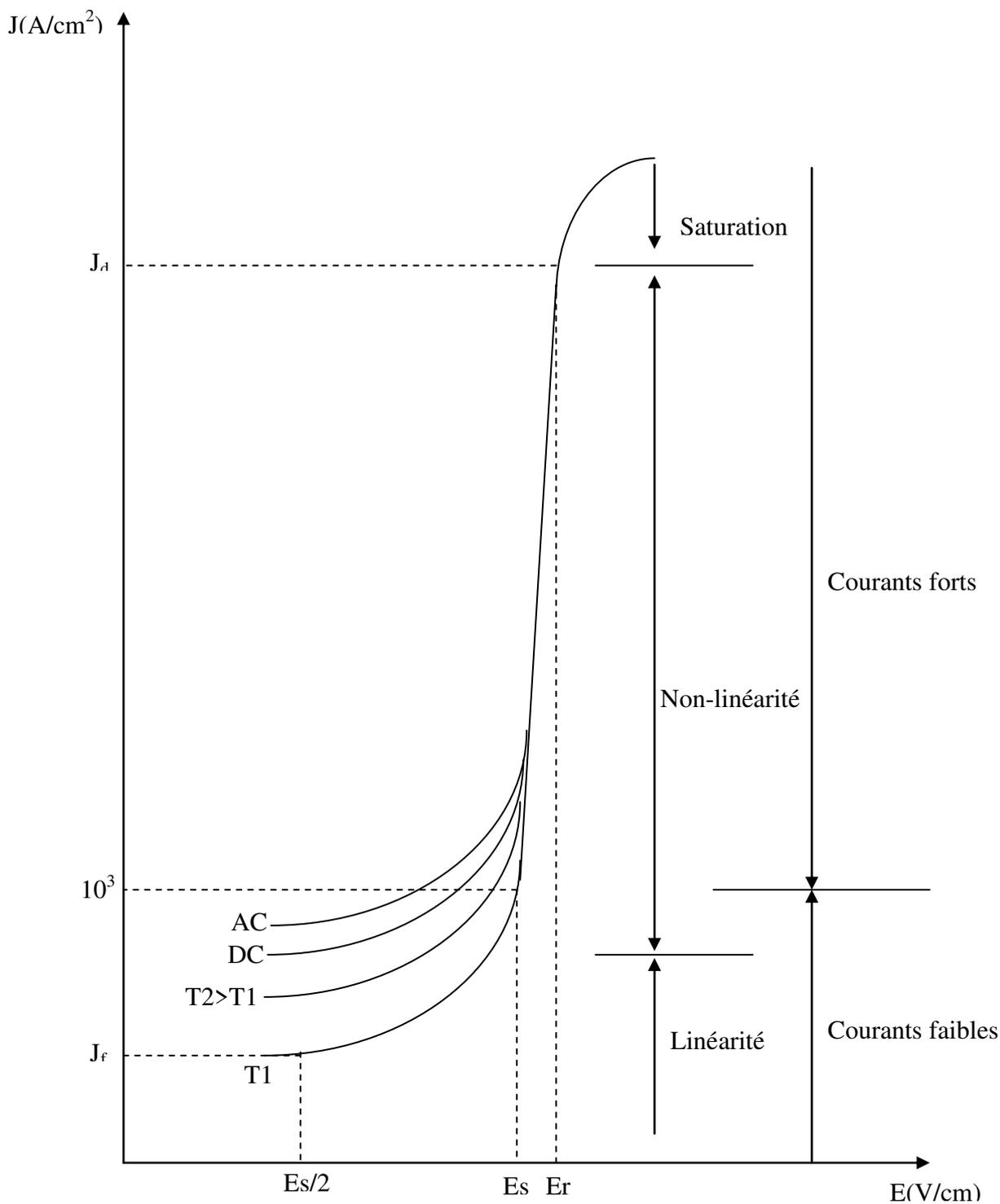


Figure I-8 : Caractéristique I(V) type d'une varistance ZnO.

A cela on peut associer l'évolution de la résistance de la varistance R en fonction de la tension appliquée $R(V)$ figure (I-9).

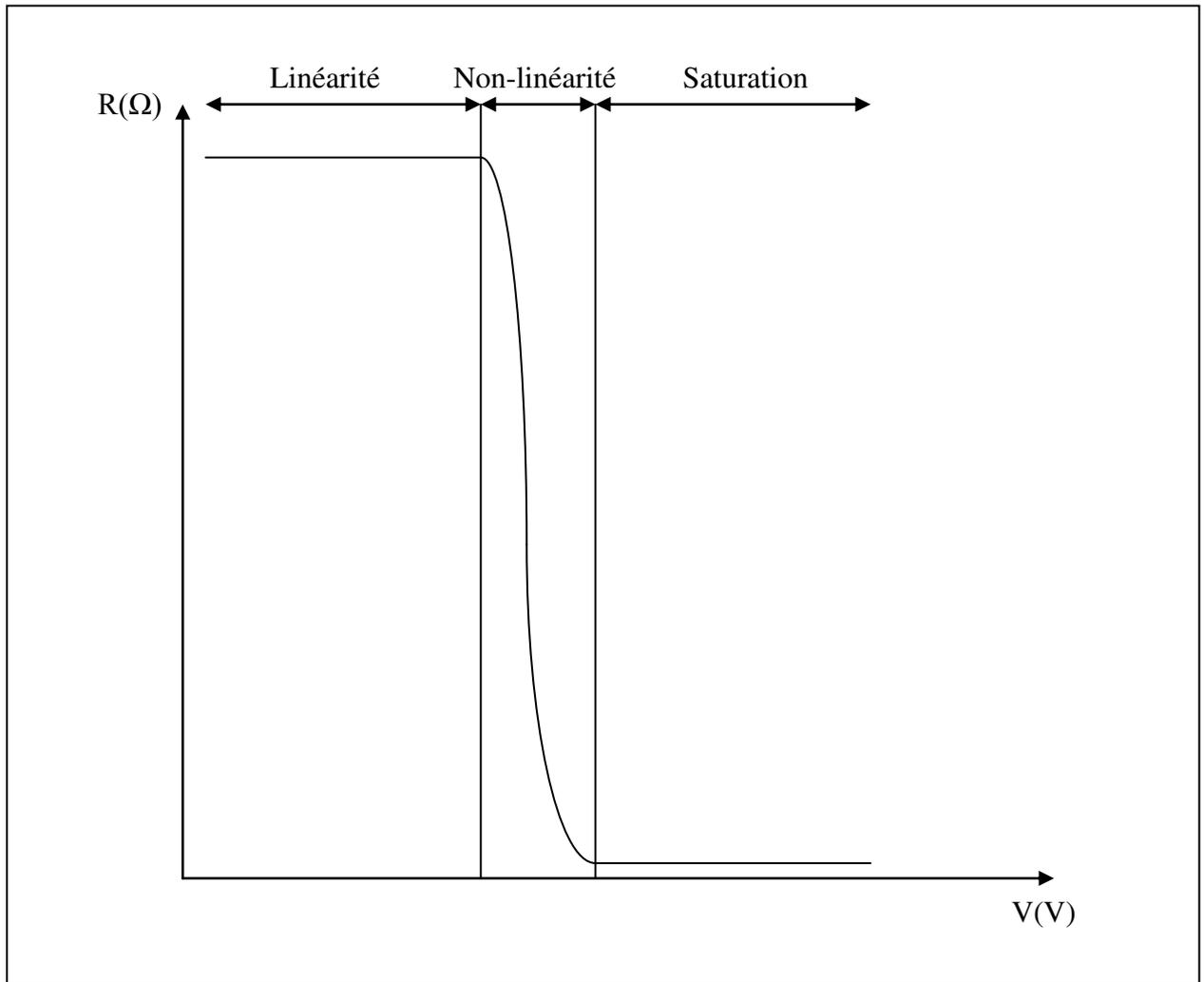


Figure I-9 Variation de la résistance d'une varistance ZnO en fonction de la tension

La caractéristique $J(U)$ des céramiques à base d'oxyde de zinc présente trois zones, comme le montre la figure (I.8)

Zone I : Région ohmique où la résistance reste pratiquement constant.

Dans cette partie de la caractéristique $I(V)$, la varistance est au repos. Elle présente sa phase isolante. Elle est quand même traversée par un courant de fuite ($J_f < 10^{-4} \text{ A/cm}^2$).

- Zone II : Région à caractéristique non linéaire où la résistance chute brutalement, le courant est exprimé par la loi empirique $I = kU^\alpha$.

La varistance présente ici sa phase conductrice. Le courant augmente beaucoup plus vite que la tension. Et c'est d'ailleurs cette vitesse d'augmentation du courant

par rapport à la tension, exprimée par le coefficient de non linéarité α , qui distingue la varistance ZnO des autres résistances non linéaires. Ce coefficient est considéré alors, comme le paramètre le plus important, des varistances ZnO.

- Zone III : Région de saturation dépendant essentiellement de la résistance des grains de ZnO, et donc du mode de dopage de ces grains. La résistance dans cette région reste à peu près constante.

C'est dans cette région, où il serait très intéressant que la tension, apparaissant aux bornes de la varistance pendant le passage de la surtension et supportée, en partie, par le matériel à protéger, soit réduit au maximum. C'est la tension résiduelle "produite" par la varistance.

On distingue sur la courbe de la figure (I-8) un certain nombre de grandeurs intéressantes pour les applications qui sont :

Le coefficient de non linéarité α , la tension de seuil V_s , le courant de fuite J_f , et la tension résiduelle V_r , sont des grandeurs caractéristiques de la varistance ZnO. Le contrôle de ces paramètres s'effectue par le choix des oxydes additifs et de leurs teneurs, ainsi que par le cycle de frittage. De même pour le coefficient de dégradation D et le facteur de qualité Q . D , qui ne doit pas dépasser les 10%, traduit la dérive de la tension de seuil d'une varistance dégradée par rapport de celle à l'état vierge. Ce coefficient est un critère de qualité relié à la densité de courant admissible. Alors que le facteur de qualité Q montre l'importance de la tension résiduelle, par rapport à la tension de seuil.

I-5-3 La protection :

L'application de la varistance ZnO porte surtout sur l'absorption des surtensions dues aux manœuvres sur le réseau ou à l'action de la foudre.

Pour cela on monte en parallèle avec l'appareil à protéger les varistances comme il est montré sur la figure I-10

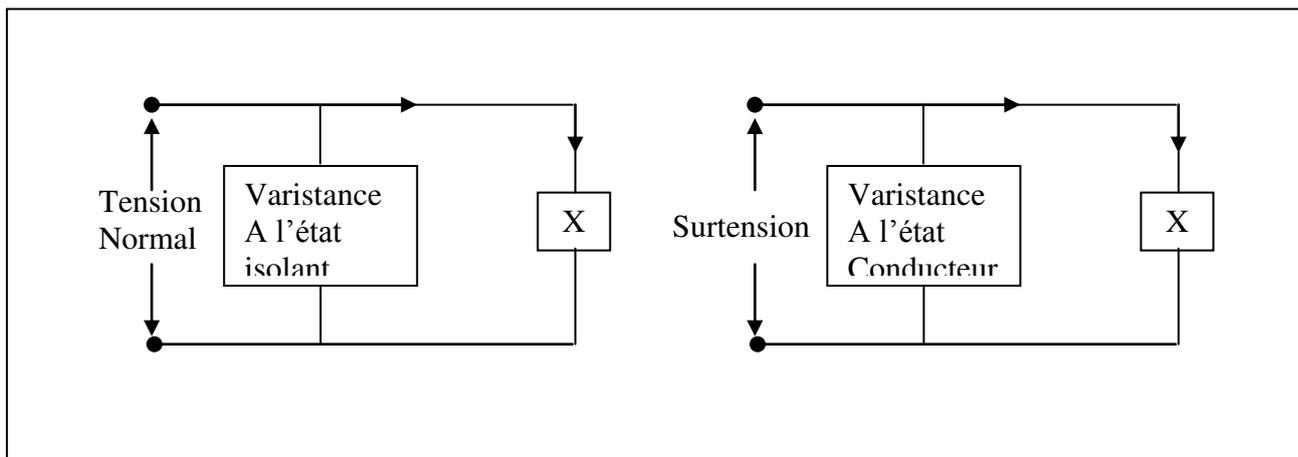


Figure I-10 : schéma résumant le rôle de la varistance

- La protection doit être réalisée de façon à ce que la tension, même pendant le phénomène de dérivation vers la terre, reste inférieure au niveau de protection du parafoudre.

En fonctionnement normal, (Sous tension de service) la varistance est pratiquement isolante.

Dés que la tension de seuil est atteinte voir dépassée par une surtension, la varistance devient instantanément conductrice et écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel tout en écouant l'énergie correspondante à la terre. Le courant écoué peut être très intense. La varistance doit être fabriquée de façon à pouvoir supporter ce courant de décharge sans être dégradée, encore moins détruite.

La tension et l'énergie que peut supporter la varistance dépendent naturellement de ses dimensions.

En effet la tension résiduelle du parafoudre dépend bien entendu, du courant qui le traverse et de la hauteur totale des varistances empilées en série qui le composent. A cela s'ajoutent les chutes de tension dues aux contacts entre les varistances. Delà, si la hauteur des varistances diminue par l'effet de l'augmentation du champ de seuil, cela contribuerait non seulement à la diminution de la taille et poids du parafoudre mais aussi à la diminution de sa tension résiduelle.

Après le passage de la surtension et en absence de dégradation, la varistance revient à son fonctionnement normal (région I) et retrouve ses propriétés électriques

initiales. Il faudrait pour cela qu'elle ait supporté l'énergie qui l'aurait traversée (26,29).

La figure I-11 illustre le principe de fonctionnement d'une varistance ZnO soumise à une surtension transitoire.

I-5-4 Paramètres caractéristiques des varistances ZnO :

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les varistances.

- Le coefficient de non linéarité α .

La pente de la caractéristique I (V) dans sa région de non linéaire définit le coefficient de non linéaire α de la varistance tel que $\alpha = \delta \text{Log} I / \delta \text{Log} V$.

$$\alpha = \frac{\text{Log}(I_2 / I_1)}{\text{Log}(V_2 / V_1)} \quad \text{(I-4)}$$

Généralement, les valeurs du courant utilisées pour le calcul de α «sont 1mA pour I1 et 10mA pour I2.

α est généralement compris entre 30 et 50 pour la varistance ZnO , alors qu'il prend des valeurs autour de 5 seulement, pour la varistance à base de SIC (31,32).

C'est la nature chimique des joints qui détermine la valeur de α .

Plus la valeur de α est élevé, plus la varistance est meilleure, sa non linéarité du moins. Néanmoins α est affecté par la température et la pression auxquelles la varistance pourrait être soumise (31).

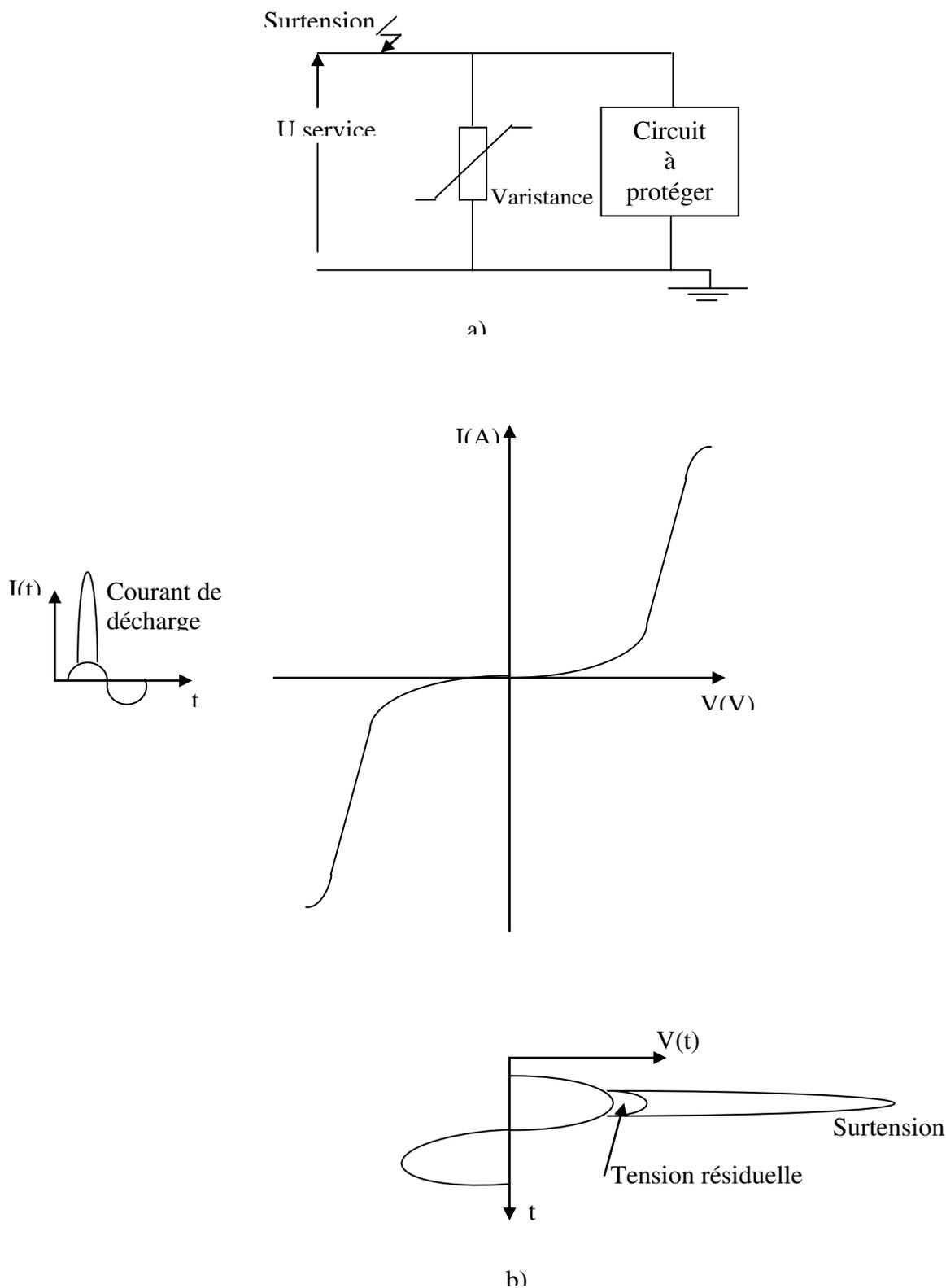


Figure I-11 : Principe de la protection
 a) Circuit soumis à une surtension
 b) principe de fonctionnement de la varistance ZnO

La tension assignée V_a

Elle correspond à la tension nominale de service appliqué en permanence à la varistance.

Sous l'effet des pertes diélectriques, le matériau s'échauffe davantage en alternatif qu'en continu, la tension assignée en régime sinusoïdal est légèrement inférieure à celle en continu.

Généralement le rapport, entre la tension assignée V_a et la tension de seuil V_s est tel que :

$$0,55 V_s \leq V_a \leq 0,65 V_s \text{ en alternatif} \quad (I-5)$$

$$V_a \leq 0,8 V_s \text{ en Continu} \quad (I-6)$$

La tension assignée dépend aussi de la varistance et de l'environnement thermique.

La tension de seuil V_s

On appelle tension de seuil, la tension continue qu'il faut appliquer à la varistance pour que la densité de courant dans le matériau atteigne 1mA/cm. Cependant en pratique, c'est plus souvent la tension appliquée à la varistance, lorsque celle-ci est parcourue tout simplement, par un courant de 1mA, qui est prise en considération (indépendamment de la surface des électrodes).

La tension de seuil doit se situer à quelque dizaines de pour-cent au-dessus de la tension de fonctionnement normal de l'élément à protéger. Elle se situe légèrement au-delà du premier coude de la caractéristique $I(V)$, dans la zone de fonctionnement de la varistance : la durée de la décharge qui lui correspond définit le temps de réponse de la varistance.

La tension résiduelle V_r

C'est la tension d'écrêtage pour un courant I_d d'une décharge donnée. C'est la tension d'écrêtage pour un courant de 10 kA sous forme d'onde de choc 8/20 μ s.

La tension maximale de service permanent V_{mcov}

C'est la valeur maximale admissible de la tension efficace, à référence industriel, qui peut être appliqué de façon continue aux bornes de la varistance, sans lui faire subir des dégradations, et cela dans des conditions de d'environnement et pour une durée de vie donnée.

La tension maximale d'écrêtage V_c

C'est la valeur crête de la tension correspondante au courant nominal de décharge. Pour un courant de décharge donné.

Le facteur de qualité Q

Il sert à composer la qualité des varistances afin d'optimiser leurs fabrications, Leurs choix lors d'un dimensionnement.

Ce facteur correspond au rapport de la tension résiduelle V_r au courant nominal de décharge, sur la tension de seuil V_s . il dépend donc du coefficient de non linéarité de la varistance.

On a :

$$Q = \frac{V_r}{V_s} = \left(\frac{I_{nd}}{I_{vs}} \right)^{1/\alpha} \quad (I-7)$$

ou I_{vs} courant correspondant à la tension de seuil, et I_{nd} le courant nominal de décharge.

Le courant de fuite I_f

C'est le courant qui traverse la varistance à l'état de repos, c'est-à-dire lorsqu'elle est soumise à la tension assignée, et ce à la température ambiante. Le courant de fuite est généralement mesuré lorsque la moitié de la tension de seuil est appliquée à la varistance. Ce courant doit être faible pour obtenir des pertes d'énergie minimales; c'est un critère de choix de la varistance.

Le courant nominal de décharge I_{nd}

C'est la valeur maximale du courant qui peut traverser la varistance durant la décharge d'une impulsion de courant, les dégradations subies restants négligeables.

Le courant de suite I_s

C'est le courant qui passe à travers la varistance après l'écrêtage de la surtension. Ce courant est fourni par le réseau d'alimentation. Il doit être négligeable tant que la varistance n'est pas dégradée.

L'énergie maximale admissible W_m

C'est l'énergie maximale que peut dissiper une varistance soumise à une onde de courant de la longue durée. Cette dernière peut provoquer la perforation ou l'explosion de la varistance si elle est considérable, la capacité d'absorption en énergie d'une varistance dépend de ses dimensions, de sa composition chimique (microstructure), et du traitement thermique employé. L'énergie maximale admissible est une caractéristique très recherchée pour la stabilité de la varistance (37,58).

Le coefficient de dégradation

Il consiste à quantifier la dérivée de la tension de seuil :

$$D = \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (I-8)$$

ΔV_s est la différence entre les valeurs de la tension de seuil avant et après dégradation.

Les spécifications servent à assurer que les varistances ZnO sont capables à supporter les contraintes des réseaux, à vérifier leurs termes aux surtensions et la conservation de leurs propriétés en fonction du temps. Parmi ces spécifications on peut citer :

- L'essai de tenue aux ondes de courant de forte amplitude.

- L'essai de tenue aux ondes de courant de longue durée.
- L'essai de tenue aux surtensions temporaires.
- essai de vieillissement.

Ce dernier essai consiste à appliquer une tension de service permanente pendant 1500 heures environ sur une varistance placée dans un four à 120°C et à enregistrer le courant de fuite. Ce courant doit rester constant pour éviter l'échauffement (30).

I-6 Microstructure :

Toutes les propriétés, électriques, physiques, et chimiques, des varistances ZnO résultent de leur microstructure figure I-12 (26,28).

La structure finale d'une varistance comprend trois phases principales :

- Les grains conducteurs de ZnO dont la taille est comprise entre 10 et 25 µm.
- Une phase isolante riche en oxyde de bismuth (Bi_2O_3) séparant les grains de ZnO(60).
- Une phase de type spinelle comprenant des oxydes de cobalt, de Zinc et d'antimoine (Co, Zn, Sb) sous forme de particule à l'intérieur de la phase isolante.

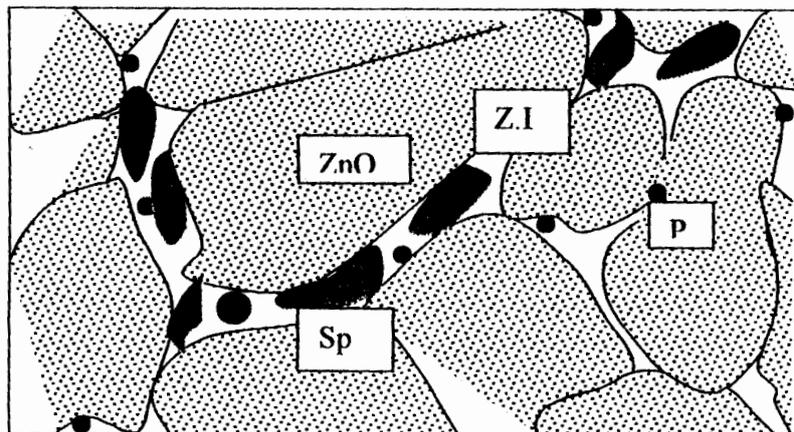


Fig. I-12 Microstructure d'une varistance

En exposant un joint de grains à l'air ou l'oxygène, un certain nombre d'atomes proches de l'interface se trouvent ionisés électro-négativement. Cette ionisation du fait par un transfert d'électrons du grain de ZnO vers l'interface. Il s'établit alors un potentiel électrostatique entre l'interface et le grain correspondant ; l'expression de ce potentiel est donnée par l'équation :

$$\text{div}V(x) = -\rho/\epsilon \Rightarrow \delta^2 V/\delta x^2 = -\rho/\epsilon \quad (I-9)$$

Où ρ : présente la densité des charges dans le grain de ZnO et ϵ la permittivité du ZnO ;

L'expression de ce potentiel est obtenue par une double intégration de l'équation (1,9).on obtient alors :

$$V(x) = Ax^2 + B \quad (I-10)$$

Où A et B : représentent des constantes. Nous constatons alors que les barrières ont une forme parabolique.

- Hauteur de la barrière à l'équilibre

A l'équilibre, c'est-à-dire pour une tension appliquée $V = 0$

Les barrières de potentiel présentent un système par rapport à l'axe passant par le joint de grain fig. I-13; la somme des porteurs positifs figés de part et d'autre du joint de grains, et égale en valeur absolue au nombre de porteurs (négatifs) figés dans le joint de grains.

La hauteur de cette barrière appelée aussi énergie d'activation est donnée par la relation :

$$V_B = \frac{e^2 N_s^2}{2 \epsilon_0 \epsilon N_d} \quad (I-11)$$

Où e : représente la charge de l'électron,

N_s et N_d : respectivement la densité des électrons des états de surface et la densité des donneurs du grain de ZnO.

La mesure expérimentale de V_B se fait en polarisant à très faible tension la varistance et en traçant $\text{Log}(j) = f(1/T)$. Nous verrons plus loin la relation liant des deux grandeurs. Les valeurs de V_B sont généralement comprises entre 0,6 et 0,8 eV.

- lorsqu'un joint de grains est polarisé, la quantité de charges au joint de grains varie avec la tension fig. I-14. L'équation de neutralité devant être respectée, la quantité de charges d'espace dans le grain polarisé négativement varie également, et donc la hauteur de barrière varie avec la tension.

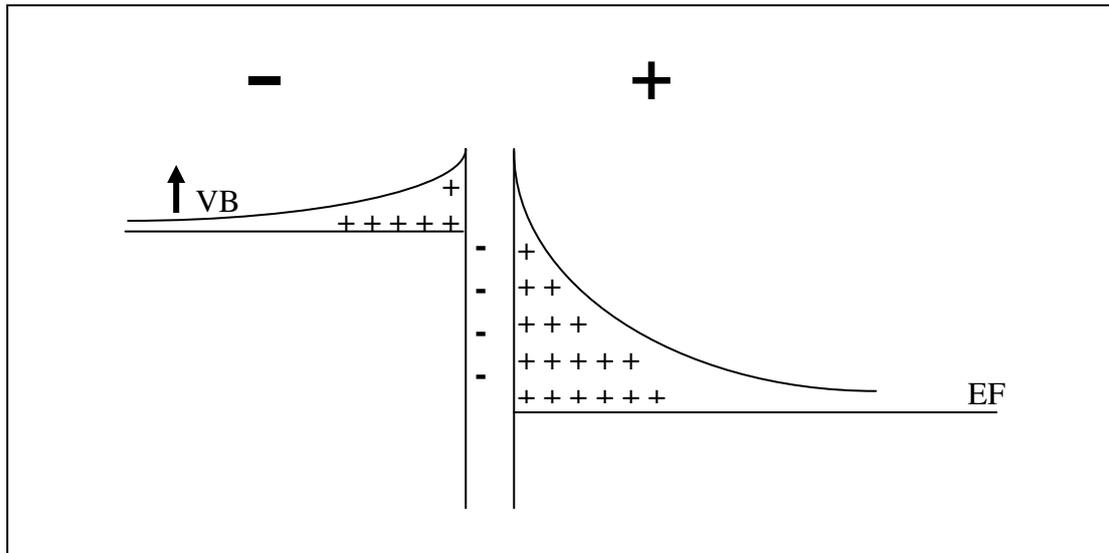


Fig. I-14 Hauteur de barrière pour un joint de grain polarisé

I- 6-1-3 Expression du courant pour une double barrière polarisée

Plusieurs théories ont été développées à ce sujet, dans le cas d'une faible tension, le courant est purement ohmique. Il est activé thermiquement et de la forme :

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{E_B(V)}{K_B T}\right) \quad (I-12)$$

Avec : $J_0 = AT^2$

Où E_B : représente l'énergie d'activation qui est fonction de la tension

$E_B(V) = V_B (1 - V/4V_B)^2$ nous remarquons que lorsque V est suffisamment petit,

$$E_B \approx V_B$$

A : représente la constance de Richardson et K_B : respectivement la température absolue exprimée en $^{\circ}\text{K}$ et K la constante de Boltzmann égale à $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

Récemment des travaux de recherche entrepris dans différentes laboratoires permettent d'expliquer les caractéristiques $J(V)$ en tenant compte uniquement de l'effet thermoélectronique. Cette théorie prenant en compte la variation du niveau de Fermi, lorsque la tension appliquée augmente prévoit pour une densité d'états de surface constante une diminution de la hauteur de la barrière.

La forme du courant proposé est la suivante :

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{E_B(V)}{KT}\right) \quad \text{(I-13)}$$

Avec

$$\left[\frac{E_B}{KT} + \exp\left(-\frac{E_B}{KT}\right) - 1\right]^{1/2} + \left[\frac{(E_B + qV)}{KT} + \exp\left(\frac{E_B + qV - qV_g}{KT}\right) - 1\right]^{1/2} = 2 \left[\frac{E_B(V=0) - 1}{Kt}\right]^{1/2} \left[1 + \frac{V}{2V_g}\right]$$

Une détermination littérale de E_B est très compliquée, pour cela des méthodes numériques permettent la résolution de cette équation ;

Où q représente la charge de l'électron,

V la tension appliquée,

K la constante de Boltzmann,

T la température absolue,

V_g le "gap" du ZnO ; $V_g = 3,2 \text{ eV}$.

I-6-1-4 Circuit électrique équivalent de la varistance :

La figure I-15 illustre le schéma électrique équivalent de la varistance généralement utilisé. Le joint de grains ou résidu la barrière de potentiel est représenté par une cellule capacité C_j , résistance R_j , dont les valeurs sont fonction de la tension, de la fréquence et de la température. Les grains de ZnO sont représentés par leur résistance R_g .

Pour les faibles valeurs de la tension, seul un courant de fuite (10^{-3} A/cm^2) traverse la varistance, sa valeur est limitée par R_j et C_j . A ces valeurs de tension la résistivité de

fuite est très grande de l'ordre de $\rho_s = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$. La valeur de R_g ($\rho_g = 0,1$ à $10 \Omega \cdot \text{cm}$) peut être négligée et le circuit se réduit à la cellule R_g, C_g .

Quand la tension augmente la résistance non linéaire R_j diminue est réduit donc l'impédance de la cellule permettant ainsi l'augmentation du courant. Dans ce cas, les barrières de potentiel tombent et l'impédance de la cellule s'annule. Un fort courant (10^3 A/cm) traverse alors la varistance et il n'est limité que par la résistance R_g des grains de ZnO.

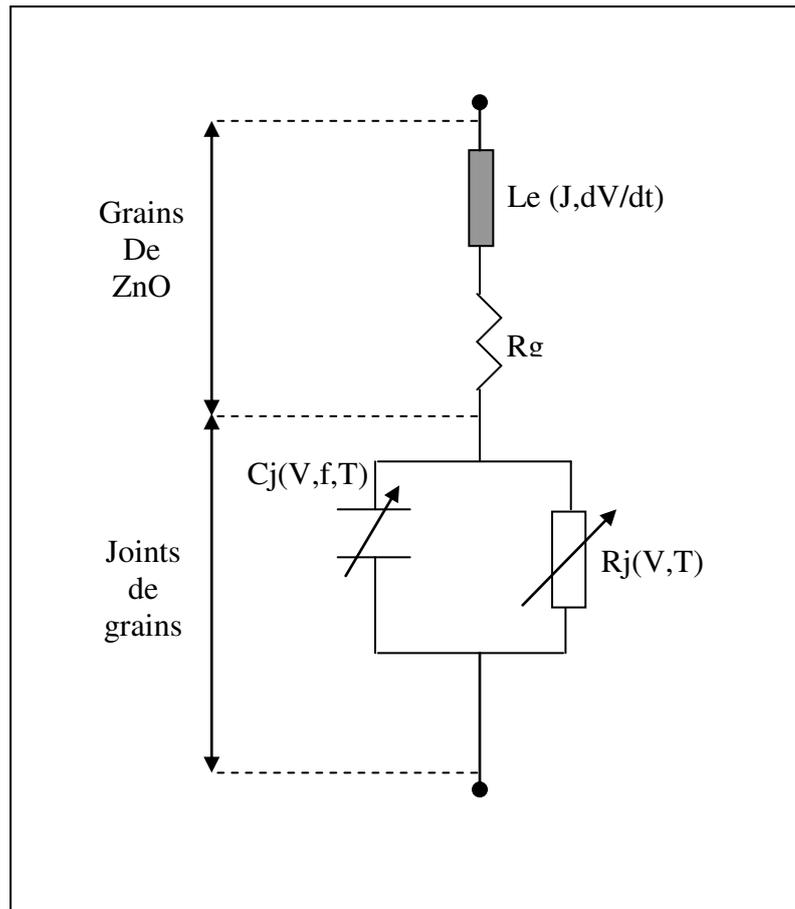


Fig. I-15 : Schéma électrique équivalent de la varistance

I-7 Mécanismes de conduction :

Les varistances à base d'oxyde de zinc sont des corps polycristallins à caractéristiques $I(V)$ non-linéaire et symétrique, donc directement utilisables en alternatif. Elles sont obtenues par frittage d'une céramique constitué essentiellement d'oxyde de zinc, avec de faibles ajouts (1 à 10% en masse) d'autres oxydes tel que

Co_3O_4 , MnO_2 , Sb_2O_3 et Bi_2O_3 . La composition chimique et les divers paramètres du traitement thermique influent de façon critique sur les propriétés électriques du matériau.

Pour comprendre et établir la loi qui gouverne la conduction d'un matériau tel que la varistance ZnO est très difficile en raison du grand nombre de constituants qui entre en jeu ainsi que la multitude d'étapes qui président à la réalisation de ce matériau.

Cependant, depuis son apparition, de nombreuses tentatives ont été entreprises dans le but de dégager un formalisme simple pour expliquer la brutale croissance du courant lorsque la tension appliquée dépasse un seuil.

Nous essayerons dans ce qui suit de décrire brièvement quelques uns des mécanismes qui ont été proposés (33, 35,38).

I-7-1 Modèle de M.MATSUOKA :

Cet auteur a proposé pour expliquer le comportement non linéaire, un mécanisme gouverné par le courant limité par les charges d'espace et faisant intervenir les pièges profonds situés dans le joint. Pour une tension faible, une partie des électrons injectés est neutralisée en comblant ces pièges qui ne servant pas à la conduction. Lorsque la tension devient suffisamment grande, tous les électrons contribuent à la conduction, entraînant l'accroissement du courant.

Quoique ce modèle rende bien compte de la forme générale de la caractéristique $I(V)$, il ne résiste pas aux critiques telles que : l'épaisseur du joint adopté ($1\mu\text{m}$) qui dépasse très largement sa valeur établie à partir de l'observation. En outre la tension de seuil est indépendante de la composition chimique du joint. Or la densité des pièges profonds est liée à cette dernière. Enfin la constante diélectrique est de 170 dans ce modèle alors qu'elle est en réalité de l'ordre de 10.

I-7-2 Modèle de J.D.LEVINE :

L'auteur propose que les électrons libres de part et d'autre d'un joint de grains migrent vers ce dernier où ils seront captés par les pièges profonds. Il en découle

l'apparition de zones de désertion et par conséquent un relèvement des bandes énergétiques qualifié de double barrière inversée.

Levine détermine dans un premier temps la variation de la hauteur de la barrière ϕ avec le potentiel appliqué V , puis étudie le mécanisme de conduction dû à cette variation. Il exprime une relation $\phi = f(V)$ en tenant compte de l'équilibre électrostatique entre les charges positives et négatives du grain, piégées au joint, il néglige cependant les charges situées dans l'autre grain adjacent. Il porte enfin, la variation de ϕ avec V dans l'équation relative à l'effet thermoélectronique. Malheureusement, les valeurs théoriques de α issues de ce modèle sont trop faibles devant celles obtenues par la mesure.

I-7-3 Modèle de L.M. LEVINSON :

A partir d'un diagramme de bandes représenté par une double barrière inversée, les auteurs utilisent les lois de conservation des charges et du courant (à travers un ensemble grain-joint de grains, joint de grains-grain). Ils proposent (38,43) que pour une tension inférieure à la tension de seuil, c'est l'effet thermoélectronique qui est responsable de la conduction. Au-delà de V_s la croissance du courant est expliquée par un effet tunnel. Ils supposent dans cette zone une création de trous par ionisation (effet d'avalanche) et qu'il y a neutralisation des électrons à l'interface.

I-7-4 Modèle de G.E. et G. BLATTER :

Les autres proposent que des trous sont créés par avalanche (chocs ionisants) sous l'effet du champ électrique, dans les régions désertées. La non-linéarité est due selon eux à la recombinaison de ces trous avec les électrons de l'interface. La modification des densités de charge de l'interface se traduit par l'effondrement de la barrière.

I-7-5 Modèle de O. DORLANNE :

Le point de départ de ce modèle est la recherche de l'expression de $\phi(V)$ pour ensuite l'intégrer aux différents mécanismes de conduction. Le but étant de désigner le modèle qui corrobore le mieux les résultats expérimentaux .

Pour ce faire, l'auteur considère une micro-varistance (deux grains séparés par un joint de grains), adopte le diagramme de bandes qualifié de double barrière inversée. Il établit la relation qui lie ϕ à V . la procédure suivie consiste à résoudre l'équation de Poisson en évaluant d'une part, les quantités de charges d'espaces positives dans les grains de gauche $Q_{e,g}$ et de droite $Q_{e,d}$ et d'autre part, la quantité de charges négatives de surface Q_s au joint de grains.

I-8 Conclusion :

Après un rappel sur les diverses contraintes que subit le matériel (surtensions temporaire, de manœuvre ou de foudre), nous avons sommairement exposé les performances des dispositifs usuels pour s'en protéger tel que les éclateurs, les parafoudres à carbure de silicium ou à oxyde de zinc. L'emploi de ce dernier tend à ce généraliser grâce à ses propriétés intrinsèques (forte non linéarité, temps de réponse court, grande capacité d'absorber de l'énergie et une bonne stabilité dans le temps) qui agissent sur la qualité de service par, la diminution du nombre de coupures brèves et permanentes d'une part, la réduction du risque de montée de potentiel des installations voisines d'autre part. Le parafoudre à oxyde de zinc permet, grâce à sa forte non linéarité, d'avoir des niveaux de protection bas et autorise par conséquent des niveaux d'isolation moindres. Pour le dimensionnement d'un parafoudre il a été montré que deux exigences contradictoires limitent le choix de la hauteur des varistances constituantes, le niveau de protection et le vieillissement. Quant au diamètre, sa valeur est déterminée afin que l'échauffement reste acceptable. Dans ce chapitre nous avons aussi exposés les propriétés physiques et les divers mécanismes de conduction des varistances pour établir la loi $I(V, T)$.

Chapitre II

Etat de l'Art

II-1 Procédé de fabrication

II-1-1 Composition

Le composant étudié est une varistance céramique polycristalline très complexe. Elle est composée d'un mélange de plusieurs Oxydes métalliques. Le principal constituant est évidemment le ZnO , pratiquement 90% et plus. En plus de l'oxyde de zinc, de faibles teneurs d'un nombre d'oxydes métalliques sont ajoutées. Leurs proportions dans le mélange a été judicieusement établis et correspond aux caractéristiques souhaitées de la varistance.

Le ZnO se présente sous forme de poudre cristallisée de 99,9% de pureté.

La qualité et la nature des Oxydes additifs, influent considérablement sur les caractéristiques électriques des varistances ZnO. Ces caractéristiques, coefficient de non linéarité, courant de la fuite, la stabilité et l'énergie admissible etc. Dépendent de la microstructure ainsi que des processus d'obtention des joints de grains. Les Oxydes additifs utilisés sont également sous forme de poudre cristallisée très pure. Le tableau (II-1) représente les principales caractéristiques physico-chimiques de chaque Oxyde.

II-1-2 Méthode de fabrication :

L'élaboration des varistances fait appel à un processus conventionnel de fabrication des céramiques. L'obtention d'une homogénéité et d'une reproductibilité suffisante des propriétés électriques impose(26,46) :

-Le contrôle des propriétés des produits de départ tels que la pureté, la réactivité chimique ou la répartition granulométrique ;

-La préparation d'une poudre homogène tant au niveau de la granulométrie qu'au niveau des constituants ;

-La définition du profil de température lors des traitements thermiques (calcination ; frittage, recuit).

-Le contrôle de la nature de l'atmosphère lors du frittage.

Description	FORMULE MOLECULAIRE	POIDS MOLECULAIRE (gr/mole)	DENSITE (gr/ cm ³)	TEMPERATURE DE FUSION (C°)	STRUCTURE	COULEUR
Oxydes Utilisées						
OXYDE DE ZINC	ZnO	81.37	5.61	1975	POLYCRISTAL	BLANC
OXYDE DE BISMUTH	Bi ₂ O ₃	465.96	8.90	820	POLYCRISTAL	JAUNE
OXYDE DE MANGANESE	MnO ₂	86.94	5.02	535	POLYCRISTAL	NOIR
OXYDE DE COBALT	Co ₃ O ₄	240.80	6.07	950	POLYCRISTAL	NOIR
OXYDE DE CHROME	Cr ₂ O ₃	151.99	5.21	2435	POLYCRISTAL	VERT
OXYDE D'ANTIMOINE	Sb ₂ O ₃	291.5	5.20	656	POLYCRISTAL	BLANC
OXYDE DE BORE	B ₂ O ₃	69.64	6.01	450	POLYCRISTAL	BLANC
OXYDE DE TITANE	TiO ₂	79.89	4.26	1850	POLYCRISTAL	BLANC

Tableau II-1 : Principes caractéristiques physico-chimiques des oxydes métalliques utilisés.

Il existe une multitude de procédés de fabrication, dans notre étude l'élaboration de la varistance se fait comme la montre le synoptique de la figure II-1.

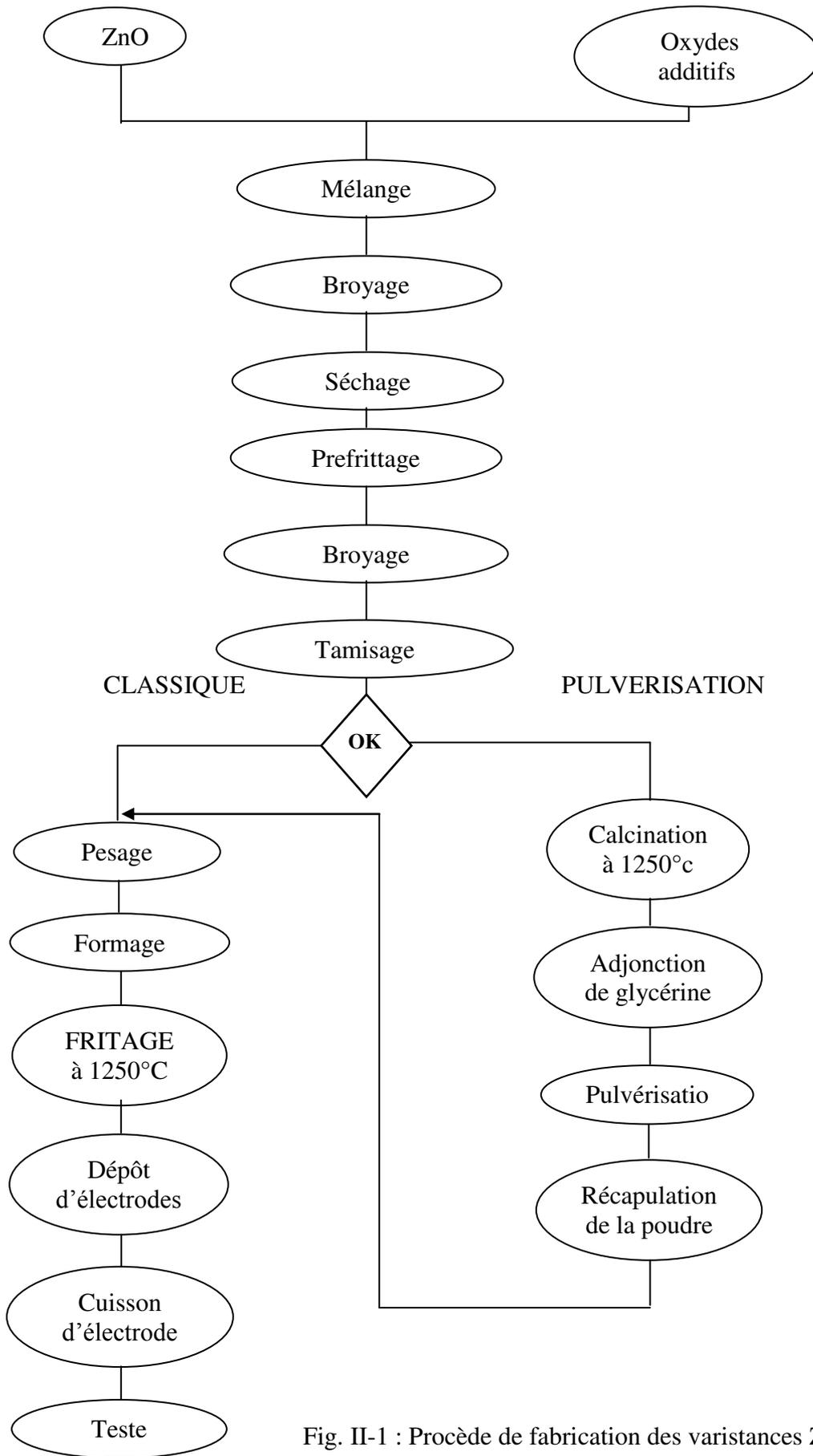


Fig. II-1 : Procède de fabrication des varistances ZnO

- Pesée :

La pesée des éléments est effectuée à l'aide d'une balance électronique de grande précision

- Broyage :

Une fois la pesée terminée, les Oxydes sont broyés et mélangés dans un broyeur à billes en porcelaine. Le mélange se fait en phase humide par l'adjonction de l'eau et d'un liant organique pendant 24 heures.

- Séchage:

Le mélange est ensuite mis dans une étuve à la température de 150°C, jusqu'à évaporation complète de l'eau ajoutée aux poudres lors de l'opération précédente.

- Pré frittage:

Un Pré frittage du mélange des oxydes permet de doper le grain de ZnO. Il est réalisé à l'air ambiant à la température de 700°C. La figure II-2 donne le cycle utilisé. Au cours de cette opération la poudre est plus ou moins agglomérée, ce qui nécessite un second broyage à sec pendant environ 10 H environ.

- Tamisage :

Afin d'avoir une poudre dont les dimensions du grain soit à peu près identique, on procède à un tamisage, la granulométrie est inférieure ou égale à 200 microns.

- Pressage :

La poudre déposée dans un moule cylindrique est pressée à 500 kg/cm². On obtient ainsi des échantillons sous forme de disques de 40 mm de diamètre et de 2,5 mm d'épaisseur. Les pastilles ainsi obtenues sont des échantillons crus, très fragiles, et de couleur blanche. Un frittage est nécessaire pour leur consolidation.

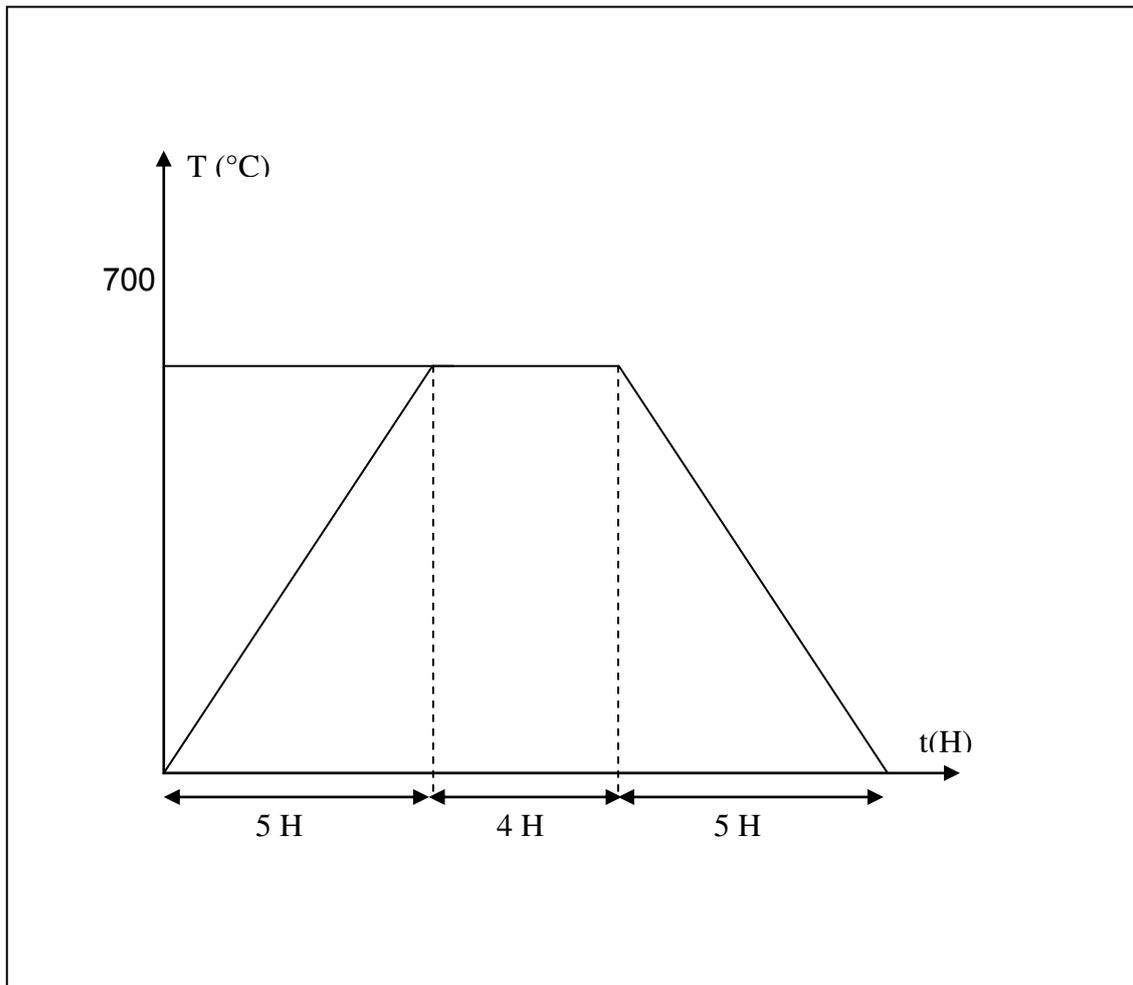


Fig. II-2 : Cycle de Préfrittage

- Frittage :

Les échantillons mis en forme à la presse, sont portés au four à une température dite température de frittage qui suit le cycle représenté sur la figure II-3 Le frittage est une opération primordiale car elle influe directement sur les propriétés du produit final. Vers la température de 700°C apparaît une phase liquide causée par la fusion de l'oxyde de bismuth qui va faciliter les échanges et le transfert de matière et mouiller les grains de ZnO créant de cette manière les joints de grains résistifs(24,69).Ce mécanisme est accompagné par une densification importante du fait d'un retrait dimensionnel de l'ordre de 20%.

- Dépôt et cuisson des électrodes

Les électrodes sont soit déposées par sérigraphie, soit par pinceau, à partir d'encres conductrices à base de Platine – Argent.

Après le dépôt des électrodes sur la varistance, on met cette dernière au four et on fait une dernière cuisson dont le cycle thermique est représenté sur la figure II-4.

- Enrobage :

L'enrobage a pour but de recouvrir les échantillons par une résine époxy qui, polymérisée à 160°C pendant une heure pour éviter les contournements des échantillons lors des essais.

L'enrobage protège les varistances contre l'humidité et assure une bonne isolation électrique.

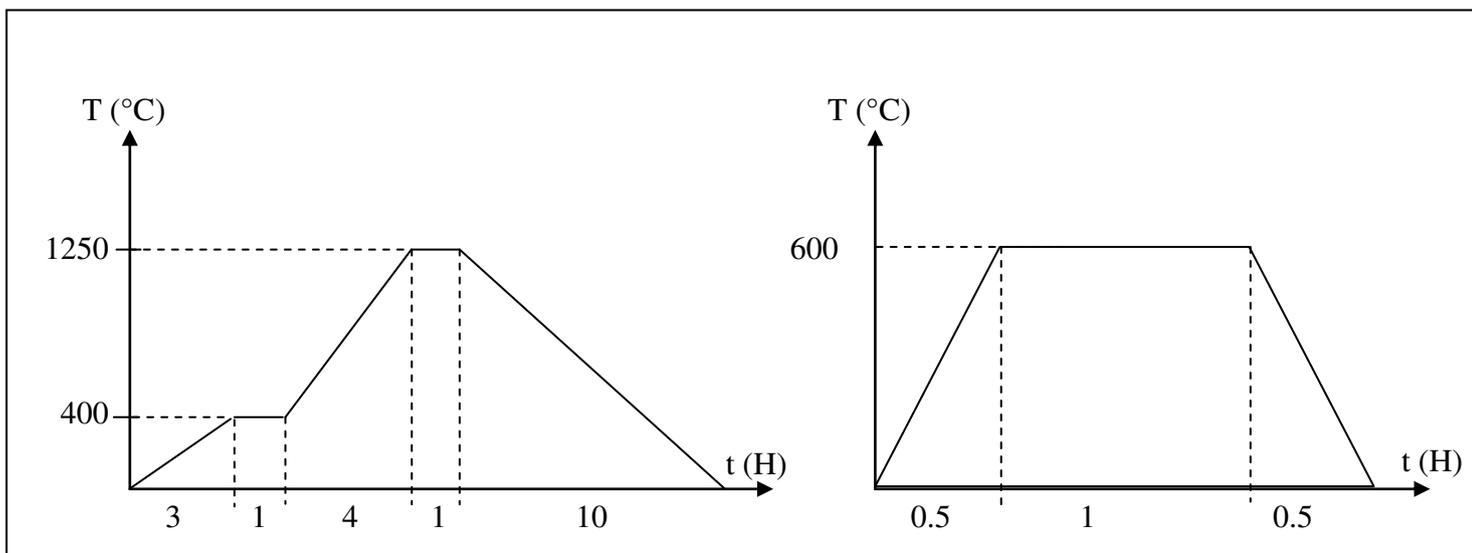


Fig. II-3 Cycle de frittage

Fig. II-4 Cycle de cuisson des électrodes

II-1-3 Deuxième procédé : poudre obtenue par pulvérisation :

A la fin de l'opération de tamisage décrite dans le paragraphe précédent, nous obtenons une poudre de couleur grise, parfaitement sèche et convenablement dopée qui peut être soit pressée directement sous forme de disque dans un moule selon le premier procédé, soit subir une opération complémentaire dite d'atomisation ou de pulvérisation selon le deuxième procédé.

Cette opération d'atomisation très utilisée dans les industries, de la céramique a pour but d'améliorer les qualités rhéologiques de la poudre afin d'en favoriser l'écoulement dans les moules et un meilleur pressage des échantillons.

Jusqu'au stade du tamisage les opérations restent identiques à celles du premier procédé. La poudre est alors calcinée à 1250°C suivant le cycle de la figure II-5 puis broyée afin d'obtenir une granulométrie d'environ 100 microns.

Un mélange de la poudre, d'eau, de liant organique et d'un lubrifiant est effectué. La proportion de ces différents constituants est soigneusement dosée pour obtenir une "barbotine" de viscosité adéquate.

Le mélange obtenu par pulvérisation est placé dans un dispositif de compression ou circule de l'aire chaude, pour le séchage de la poudre, les gouttelettes de barbotine projetées vers le bas sont ralenties et séchées par un courant d'air chaud, ainsi nous recueillons des microbilles de forme sphérique pratiquement sèches.

La poudre ainsi conditionnée présente une meilleure coulabilité, donc le remplissage des moules se fait plus aisément et le pressage des échantillons est facilité. En outre, on constate une amélioration très nette des caractéristiques électriques des pièces ainsi fabriquées.

Après conditionnement de la poudre par pulvérisation, les opérations de mise en forme des échantillons et de dépôt des électrodes se font de la même manière que pour le premier procédé.

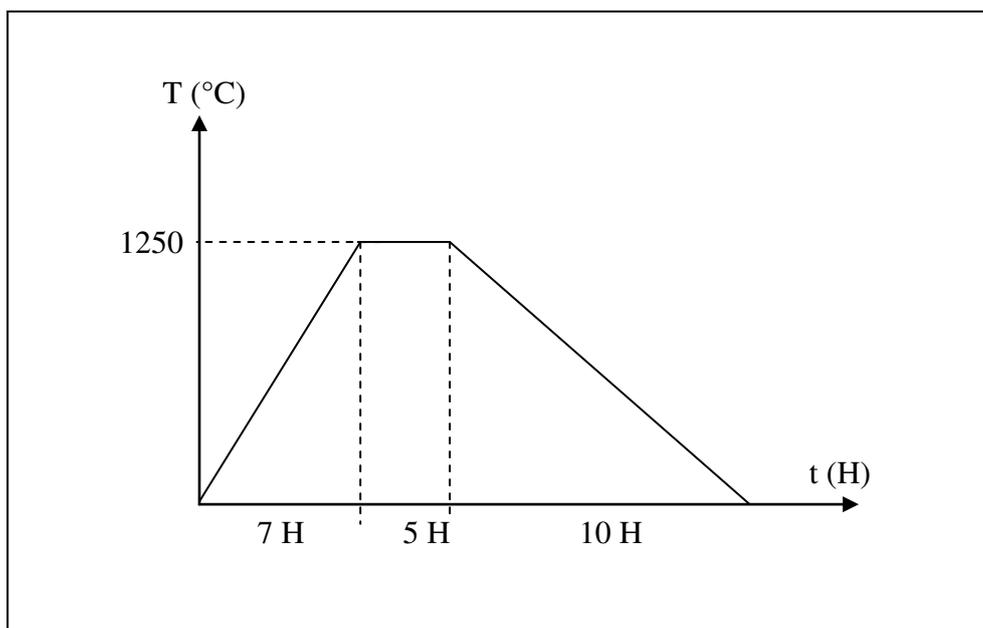


Fig. II-5 Cycle de frittage de la poudre par pulvérisation

II-1-4 Echantillons réalisés :

Nous avons réalisé trois séries d'échantillons par combinaison des deux procédés de fabrication. Et des deux compositions présentées dans les paragraphes précédents. Dans la suite de notre étude nous appellerons :

- Echantillons A, ceux réalisés à partir de la poudre A ($ZnO + 6$ oxydes additifs) par le premier procédé de fabrication.
- Echantillons A1, ceux réalisés à partir de la poudre A par la technique de pulvérisation.
- Et enfin les échantillons B dont la composition contient outre les additifs précédents, du TiO_2 et préparés par le premier procédé de fabrication.

- Rôle des oxydes additifs :

La structure de base des varistances ZnO est formée, par l'addition des éléments dopants à l'oxyde de zinc. Même en très faible quantité, les différents dopants jouent des rôles importants, mais assez complexes dans les propriétés des varistances ZnO . Les varistances ZnO du commerce contiennent généralement les quatre oxydes de base (oxyde de bismuth, oxyde de manganèse, oxyde de cobalt, oxyde d'antimoine).

Les additifs sont utilisés pour, contrôler la taille des grains, leur résistivité, et la stabilité de la varistance (50, 52,66). Dans ce qui suit nous allons présenter que le rôle des oxydes des éléments qui sont utilisés dans la formulation de nos échantillons.

L'oxyde de zinc est le constituant principal des varistances ZnO . C'est un semi-conducteur de type n, sans lequel les barrières de potentiel, qui se forment aux joints de grains et qui régissent la conduction électrique, n'existeraient pas.

- Oxyde de bismuth :

Toutes les compositions contenant de l'oxyde de bismuth présentent un effet varistance. Les observations au microscope électronique à transmission montrent que le bismuth se localise aux joints. Il assure ainsi, de manière efficace, l'isolation électrique entre les grains conducteurs de l'oxyde de zinc(34,62).

- Le cobalt et le manganèse :

Les oxydes de cobalt et de manganèse, en diffusant dans l'oxyde de zinc, modifient la structure électronique de la bande interdite et facilitent la création des barrières de Schottky. Ces oxydes associés à l'oxyde de bismuth permettent d'améliorer considérablement le coefficient de non linéarité.

- Le chrome :

L'oxyde de chrome est rajouté principalement pour son rôle de stabilisateur des phases riches en bismuth. D'autre part en présence de chrome, la température de formation de la phase spinelle descend en dessous de 100°C. En se dissolvant dans la spinelle, le chrome la stabilise, elle aussi(40).

- L'antimoine :

L'antimoine agit principalement en inhibant la croissance des grains de ZnO et, fait augmenter ainsi le champ de seuil de la varistance. Par ailleurs il remplit une fonction importante en raison de son aptitude à générer les phases pyrochlore et spinelle. En effet le pyrochlore fixe l'oxyde de bismuth à haute température limitant ainsi son évaporation, alors que le spinelle module et régule la croissance des grains de ZnO, Ce qui revient à fixer la tension de seuil et à améliorer la non-linéarité.

- Le bore :

Le bore améliore considérablement la stabilisation du courant de fuite dans le temps. Ainsi le bore augmente la durée de vie de la varistance.

- Rôle du liant :

L'opération de mise en forme des poudres nécessite l'adjonction préalable d'un liant. Ceci de façon à garantir aux poudres, mises sous une pression, une cohésion suffisante. Le liant utilisé est à base de latex.

II-2 Conclusion :

La qualité des varistances et leurs propriétés finales dépendent du choix de la formulation chimique (dopants et teneurs) et du cycle de frittage.

La conduction non linéaire de la varistance est régie par les barrières de potentiel qui se forment aux joints de grains au cours du frittage grâce aux défauts intrinsèques et extrinsèques. Le rôle des dopants se résume alors à l'accentuation des défauts extrinsèques soit par substitution aux cations de zinc ou en position interstitielle.

Il est fort probable que lorsqu'un élément quelconque améliore telle propriété particulière, il présentera tel autre inconvénient relatif à une autre propriété.

Les principales caractéristiques de la varistance sont le courant de fuite, la tension de seuil, et le coefficient de non linéarité. Ces propriétés peuvent être contrôlées à partir des dopants utilisés. L'oxyde de bismuth avec le cobalt et le manganèse permettent d'augmenter le coefficient de non linéarité, alors que l'oxyde d'antimoine permet l'augmentation du champ de seuil par création des phases spinelle, qui bloquent la croissance des grains pendant le frittage. Malheureusement, ce dernier agit négativement sur la capacité d'absorption de l'énergie par réduction de celle-ci.

Du côté expérimental, la valeur des mesures est reliée d'abord à une bonne élaboration des échantillons. Le processus de fabrication, à travers le soin donné à chaque étape (pesage, broyage, ...) ainsi que le respect de la propreté et des outils utilisés (jarres, tamis,...) pour éviter la pollution des poudres sont très importantes pour la réussite de l'élaboration des échantillons.

Chapitre III

Dégradations des

Varistances ZnO

Introduction :

La dégradation d'une varistance à base d'oxyde de zinc a pour effet de modifier ses caractéristiques électriques essentiellement dans la zone des faibles courants et aussi de diminuer le coefficient de non-linéarité α . Elle peut de ce fait mettre la varistance hors d'état d'assurer sa fonction de protection. La fin de vie d'une varistance résulte, dans la plupart des cas, d'une catastrophe thermique. On peut compter plusieurs causes de dégradation des varistances :

- a- contraintes électriques permanentes : La tension de service à température ambiante, appliquée pendant une longue période, peut aussi produire une dégradation dans certains types de varistances. Ce type de dégradation est une variation lente des propriétés du matériau granulaire lui-même d'où un affaissement de la hauteur des barrières. Le degré de ce vieillissement dépend de la nature et de la qualité de la céramique et peut être réduit jusqu'à devenir une perturbation négligeable.
- b- Contraintes de courants forts : Des courants forts à travers la varistance peuvent conduire à des densités locales de courants excessives, jusqu'à détruire partiellement quelques barrières(49).
- c- Dimensionnement thermique incorrect : La composante résistive du courant alternatif et d'autres contraintes électriques produisent de la chaleur dans le corps des varistances pendant leur fonctionnement normal. La puissance dissipée doit être transférée depuis les blocs de varistances au moyen du matériau environnant, enveloppe du parafoudre et connexions vers l'air environnant. Pour obtenir la stabilité thermique, le transfert de la chaleur vers l'extérieur pour la température maximale de fonctionnement doit dépasser la somme des puissances internes reçues par la varistance. Si le dimensionnement thermique du parafoudre n'est pas correct il y aura un emballement thermique et donc la dégradation de la varistance (53,54).
- d- Dégradation ou destruction de l'enrobage de la varistance : Il peut y avoir aussi le phénomène de dégradation physico-chimique, thermique ou électrique de l'enrobage des varistances ou la production de cassures ou de fissures à cause des contraintes électriques ou thermique ; ce qui peut perturber complètement le fonctionnement de la varistance.

- e- Matériaux environnants : Les caractéristiques de la couche superficielle de la varistance peuvent être modifiées par une réaction chimique avec les matériaux environnants .Par exemple à partir de décharges partielles à l'intérieur de l'enveloppe d'un parafoudre ZnO , des molécules de gaz peuvent se produire qui réagiront chimiquement avec les oxydes . Ces réactions chimiques doivent être empêchées ou limitées par une protection étanche de la surface de la varistance.

III-1 Mécanismes de dégradation :

La plupart des auteurs qui ont étudiés la question s'accordent pour dire que la dégradation électrique des varistances ZnO est associée à une déformation des barrières de Schottky dans l'interface des grains. Les études qu'ils ont réalisées jusqu'à présent, au cours d'épreuves de vieillissement des varistances, mettent en évidence divers mécanismes, dont les deux plus connus sont les suivants.

III-1-1 Mécanisme de dégradation, par diffusion d'ions dans les grains de ZnO

La non-stœchiométrie de l'oxyde de zinc, donne des défauts comme des lacunes d'oxygène ou des cations Zn⁺ interstitiel (47). De plus, une varistance contient de nombreux éléments dopants qui sont susceptibles de migrer. Dans les zones désertées au voisinage des joints de grains les champs internes lors de l'application d'une impulsion de courant de forte intensité sont considérables, la courbure des bandes d'énergie est modifiée, et le champ électrique résultant devient beaucoup plus important dans la zone désertée polarisée dans le sens direct que dans celle polarisée dans le sens inverse.

Cette dissymétrie permet d'envisager la diffusion d'ions dans un sens privilégié, ce qui pourrait induire les phénomènes de dégradation, surtout dans le cas d'application d'une tension continue.

Gupta et al ont proposé un mécanisme de dégradation mettant en jeu la diffusion de zinc interstitiel dans les zones désertées. Selon ces auteurs, le refroidissement plus rapide de la périphérie des grains peut avoir pour conséquence de figer une distribution de défauts de zinc interstitiels. L'application d'une tension externe peut

faire migrer vers l'interface les défauts ionisés Zn^{+} ou ils peuvent se recombiner et neutraliser une partie des charges négatives qui sont à l'origine des barrières de Schottky.

Sato et al abordent le phénomène de dégradation sous l'effet du champ électrique, en courant alternatif, en suggérant le déplacement de porteurs dans la zone désertée. Selon ce mécanisme seule une partie des porteurs piégés pendant une alternance, seraient libérés pendant l'alternance suivant. Par conséquent l'accumulation des charges négatives dans la zone désertée va modifier progressivement la courbure des bandes d'énergie, ce qui provoquerait l'augmentation du courant de fuite.

III-1-2 Mécanisme de dégradation par désorption d'oxygène :

Ce mécanisme suggère que les charges négatives stockées à la surface des grains d'oxyde de zinc sont, au moins en partie, des ions d'oxygène. Les échanges d'ions d'oxygène présents à la surface des grains d'oxyde de zinc, avec l'atmosphère environnant peuvent affecter les propriétés électriques de la céramique (51, 53,61). Donc la dégradation peut résulter de la désorption ou de la migration de l'oxygène sous l'effet du champ électrique ou dans une atmosphère réductrice.

Deux types de transfert peuvent intervenir : soit à l'intérieur du matériau ou à partir du matériau vers le milieu ambiant. Ce phénomène peut diminuer la concentration des états accepteurs à l'origine de la barrière.

On distingue alors deux types de dégradation :

- La dégradation réversible lorsque l'échantillon retrouve son état initial après un certain temps de repos qui peut être réduit par traitement thermique. Ce type est attribué à un déplacement ionique de l'intérieur du grain vers l'interface ;
- La dégradation irréversible, lorsque l'échantillon est partiellement ou totalement détruit. S'il y a création d'un canal conducteur provoqué par l'hétérogénéité du matériau (42,55). Par contre dans le cas d'un choc de grande amplitude l'échantillon se fissure suite à des contraintes thermiques très élevées.

Il est aussi possible qu'un certain nombre de joints soient détruits entraînant une dégradation partielle et permanente de l'échantillon.

La dégradation se manifeste principalement dans la zone des faibles courants par une augmentation du courant de fuite et une diminution de la tension de seuil, et aussi par une diminution du coefficient de non-linéarité α . Néanmoins il n'existe pas de mécanisme unique responsable de la dégradation (61, 65,67), du fait des diverses contraintes (tension continue, tension alternative, choc de foudres, onde de manœuvre) auxquelles peuvent être soumises les varistances.

-Plusieurs auteurs ont essayé d'expliquer l'origine et la nature de la dégradation. Nous donnons ci-dessous une description de quelques uns de ces modèles.

III-1-3 Modèle de T.K. GUPTA et al :

L'auteur propose (27) pour expliquer la dégradation un mécanisme de diffusion mettant en jeu la migration des atomes de zinc interstitiels dans la zone désertée. La création d'une distribution figée de défauts interstitiels est expliquée par le refroidissement plus rapide de la périphérie des grains lors du frittage. L'application d'un champ externe entraîne la migration des défauts ionisés Zn^+ vers l'interface grain-joint de grains ou ils peuvent se recombinaer avec des charges négatives qui sont à l'origine des barrières de Schottky. Le déplacement des charges négatives entraîne une déformation de leur distribution. Après la suppression de la polarisation, il se produit une migration dans le sens inverse sous l'effet du gradient de concentration suite à l'ionisation des défauts. Les observations aux microscopes à transmission couplée avec un dispositif de microanalyse, ont montré que la diffusion d'espèce chimique est possible dans les grains ZnO sous l'effet d'un champ électrique exagéré.

III-1-4 Modèle de K. SATO et al :

La dégradation est expliquée par déplacement ionique sous l'effet du champ électrique. Les porteurs de charges s'accumulent progressivement dans la zone désertée. Pour une contrainte unidirectionnelle, cette accumulation de porteurs se

fait différemment selon que la polarisation est directe ou inverse ce qui se traduit par une dégradation non symétrique de la caractéristique (39,41).

III-1-5 Modèle de K. EDA et al :

En plus des mécanismes déjà cités précédemment les auteurs proposent un phénomène de désorption d'oxygène. Ils modélisent la migration des ions O^{2-} par une structure qui représente 3 grains avec leur joint de gains et une zone riche en Bi_2O_3 . Une partie des ions O^{2-} peut être piégée l'autre se fixant à l'interface de droite. De cette perte d'oxygène résulte un abaissement de la hauteur de barrière de Schottky.

La déformation de cette dernière lors de l'application d'une contrainte continue est expliquée par une perte d'oxygène plus facile du côté de la barrière polarisée en inverse.

III-2 Détermination de la caractéristique I(V) :

La caractéristique des varistances ZnO, par le tracé de la courbe courant-tension, est le moyen le plus complet pour en faire l'étude. La caractérisation des varistances permet la détermination directe de la tension de seuil, le coefficient de non-linéarité, et le courant de fuite.

La caractéristique I(V) d'une varistance ZnO est constituée de différentes zones de fonctionnement, pour des puissances différentes. Les mesures seront par conséquent effectuées selon différents régimes d'essais, afin d'éviter l'emballement thermique du matériau. Les zones de fonctionnement sont regroupées en deux régions distinctes.

- La région des courants faibles.
- La région des courants forts.

Dans la région des courants faibles ($I < 10\text{mA}$), les mesures sont effectuées en continu, jusqu'à la tension de seuil, sans problème particulier. Au-delà de cette valeur, des précautions doivent être prises pour ne pas dépasser la limite de la stabilité thermique.

Dans la région des courants forts ($I > 10\text{mA}$), les mesures sont obligatoirement faites en régime impulsionnel, à l'aide d'un générateur d'onde de choc.

III-2-1 Mesures en courant continu :

Pour les courants inférieurs à 10mA , l'expérience est réalisée généralement en courant continu dont on représente le montage de mesure sur la figure III-1.

Pour les courants inférieurs à $10\mu\text{A}$ un temps de relaxation du matériau (environ 2min) doit être respecté afin d'éviter d'enregistrer le régime transitoire dû à la polarisation. Mais pour les courants supérieurs à $10\mu\text{A}$, la mesure est faite en temps réel et très vite afin d'éviter l'échauffement de l'échantillon. A l'approche de 1mA , l'emballement thermique du matériau est très perceptible. Le courant augmente tellement vite qu'il devient difficile de lire les valeurs du courant et de la tension pendant l'expérience. Il faut alors diminuer considérablement le nombre de mesure.

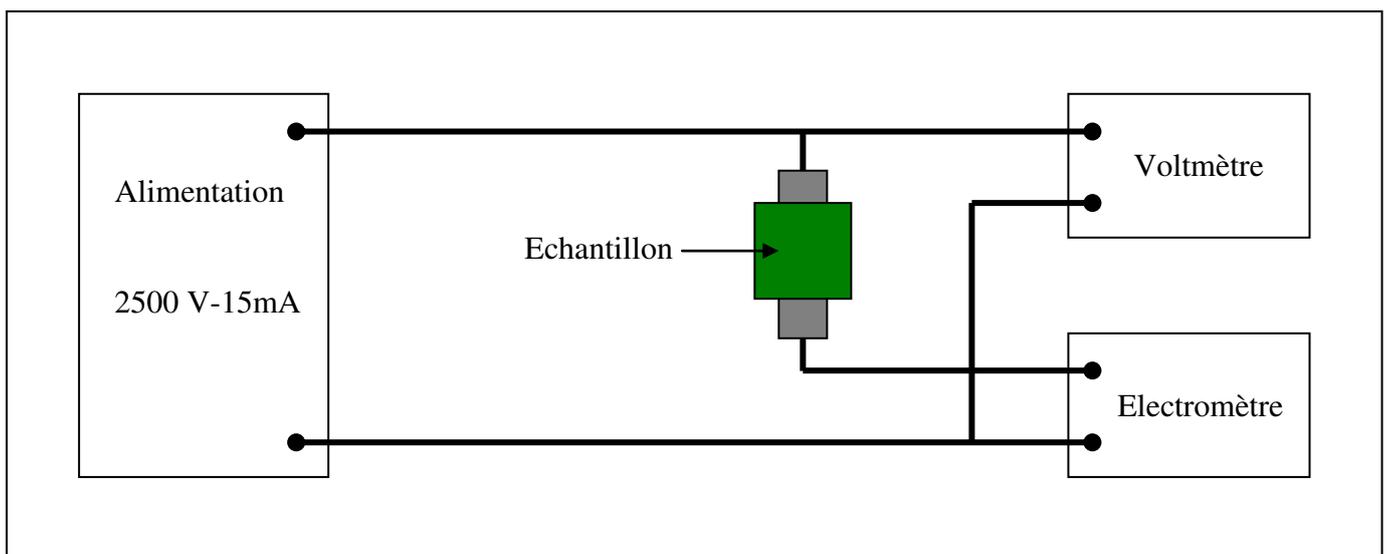


Fig. III-1 : Dispositif de mesure en continu

III-2-2 Mesures en impulsionnel :

Pour les courants forts, l'emploi des tensions et courants impulsionnels devient éminent, afin d'éviter un échauffement excessif de la varistance.

Pour ce faire nous utilisons un générateur d'onde de choc donné par la figure III-2.

La durée séparant deux mesures doit être suffisamment longue pour permettre le retour de l'échantillon à la température ambiante (jusqu'à refroidissement de l'échantillon, perceptible au touché, environ une heure). Les mesures de ce type sont en général effectuées pour contrôler l'homogénéité des varistances. Lorsque la contrainte est excessive, un emballement thermique local se produit créant ainsi un canal conducteur qui relie entre elles les deux électrodes de la varistance. Ce canal se situe à un endroit où la tension de seuil est la plus faible, offrant un chemin préférentiel au courant.

Pour chacun des chocs on relève la valeur de crête de la tension et du courant de décharge sur l'écran d'un oscilloscope figure III-3.

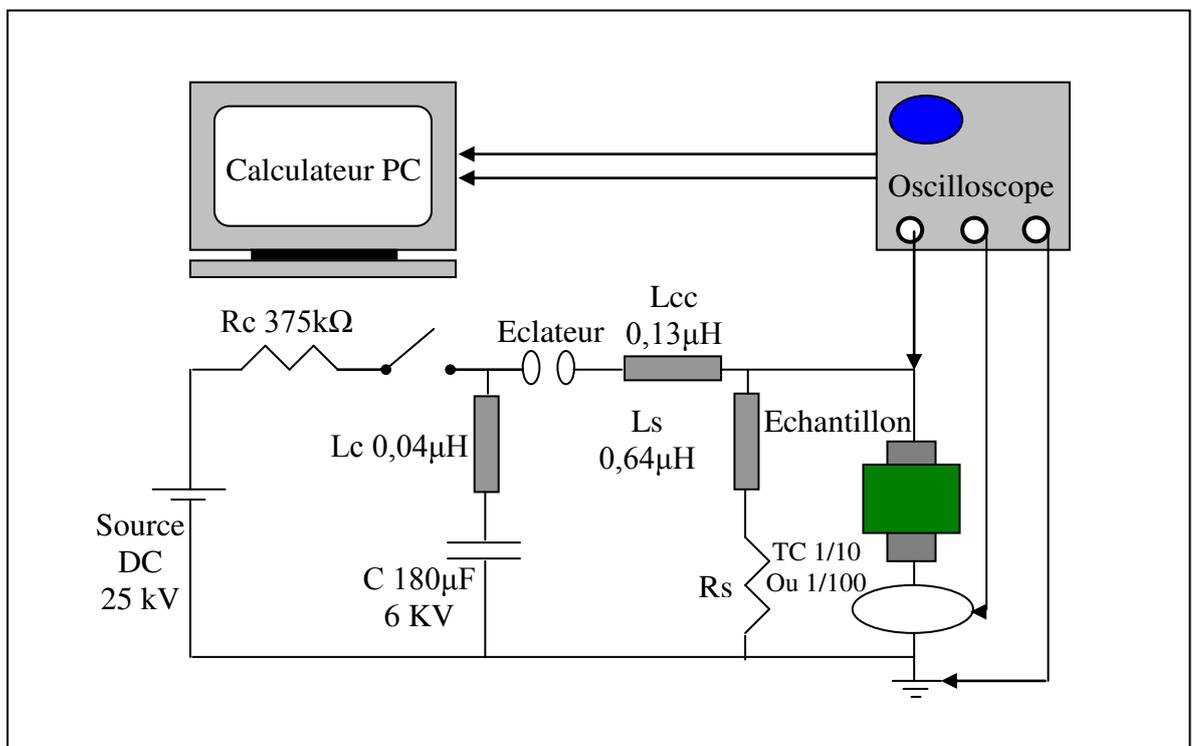


Fig. III-2 : Dispositif de mesure en impulsionnel

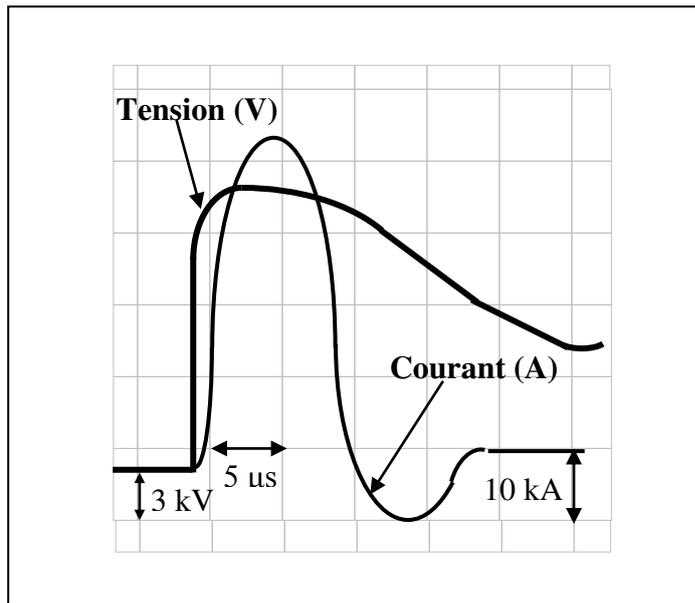


Fig. III-3 : Forme d'onde de la tension et du courant en impulsions

III-3 Conclusion :

Les varistances sont des céramiques à structure granulaire. Leur caractéristique $I(V)$ fortement non-linéarité est la conséquence de la présence d'une double barrière de Schottky aux joints de grains. Cette barrière de potentiel s'oppose au passage du courant pour les tensions faibles et s'effondre au voisinage de quelques volts d'où une diminution brutale de la résistivité. O. Dorlanne démontre que l'effet thermoélectronique seul est suffisant pour décrire la caractéristique $I(V)$ dans sa totalité.

Ces composants, qui sont utilisés comme élément écrêteurs de surtensions pour protéger les installations électriques, peuvent être dégradés par des contraintes excessives. La dégradation résulte très souvent d'une migration d'ions aux joints de grains entraînant une modification des barrières de potentiel.

Notre étude a pour but d'évaluer le vieillissement des varistances sous différente tension et température, les résultats sont représentés dans le chapitre IV.

Chapitre IV

Amélioration du

Vieillissement des

Varistances ZnO

- Introduction :

Les travaux entrepris ont pour finalité de prévoir le comportement thermique d'une varistance soumise à une contrainte électrique. Elles nécessitent, cependant, de connaître l'évolution du courant en fonction de la tension et de la température, ainsi que la géométrie des échantillons et leurs paramètres physiques. La validité des résultats repose sur une bonne reproductibilité de leurs caractéristiques $I(V)$.

La disposition et les dimensions d'une varistance, intégrée dans un dispositif de protection, varient suivant l'origine de fabrication et l'utilisation envisagée. Ainsi, des dispositifs qui sont prévus pour assurer la même protection peut avoir des comportements thermiques différents suivant la configuration de leur assemblage.

Les résultats présentés dans ce chapitre portent sur les échantillons réalisés à partir des mélanges A, A₁ et B définis précédemment.

IV-1 Caractéristiques courant-tension :

Les caractéristiques $j(V)$ sont obtenues en tension continue et alternative à 50 Hz fig. (IV-1).

Nous remarquons que l'allure de ces caractéristiques reste identique pour les trois types d'échantillon ; les échantillons B à épaisseur égale présentent une tension de seuil légèrement inférieure à la poudre A ; pour ce qui concerne la poudre A₁, celle-ci présente une densité de courant de fuite inférieure aux deux autres.

Un tracé de la caractéristique $j(U)$ pour des tensions sinusoïdales fig. (IV-1) met en évidence un courant important dans la zone ohmique ; celui-ci correspond à la composante capacitive. Dans la zone conductrice les deux caractéristiques en régime continu et alternatif ont tendance à se joindre, bien qu'il existe une différence d'environ 5 à 20% entre le courant obtenu avec une tension continue et celui obtenu à l'aide d'une tension alternative. Notons que les valeurs des tensions alternatives sont prises égales à la tension crête.

La figure (IV-2) représente la variation des coefficients de non linéarité en fonction du champ électrique, nous remarquons que la poudre B présente un coefficient de non linéarité comparable aux deux autres compositions.

Afin d'avoir une idée sur le taux "d'écrêtage de nos varistances, nous avons tracé le rapport $U_R/U_{1mA} = f$ (pic du courant traversant la varistance) fig.IV-3.

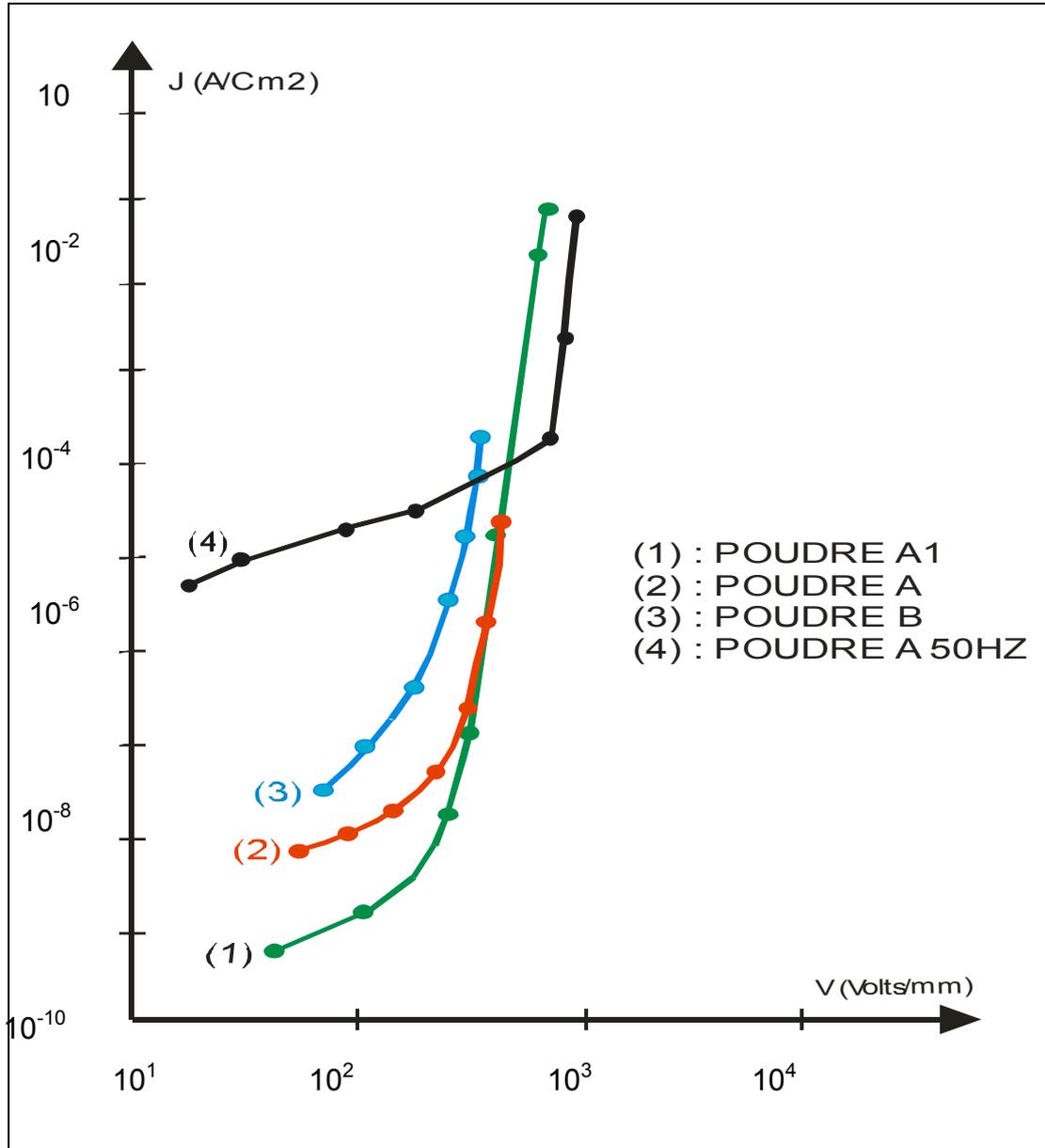


Fig. IV-1 : Caractéristique courant-tension

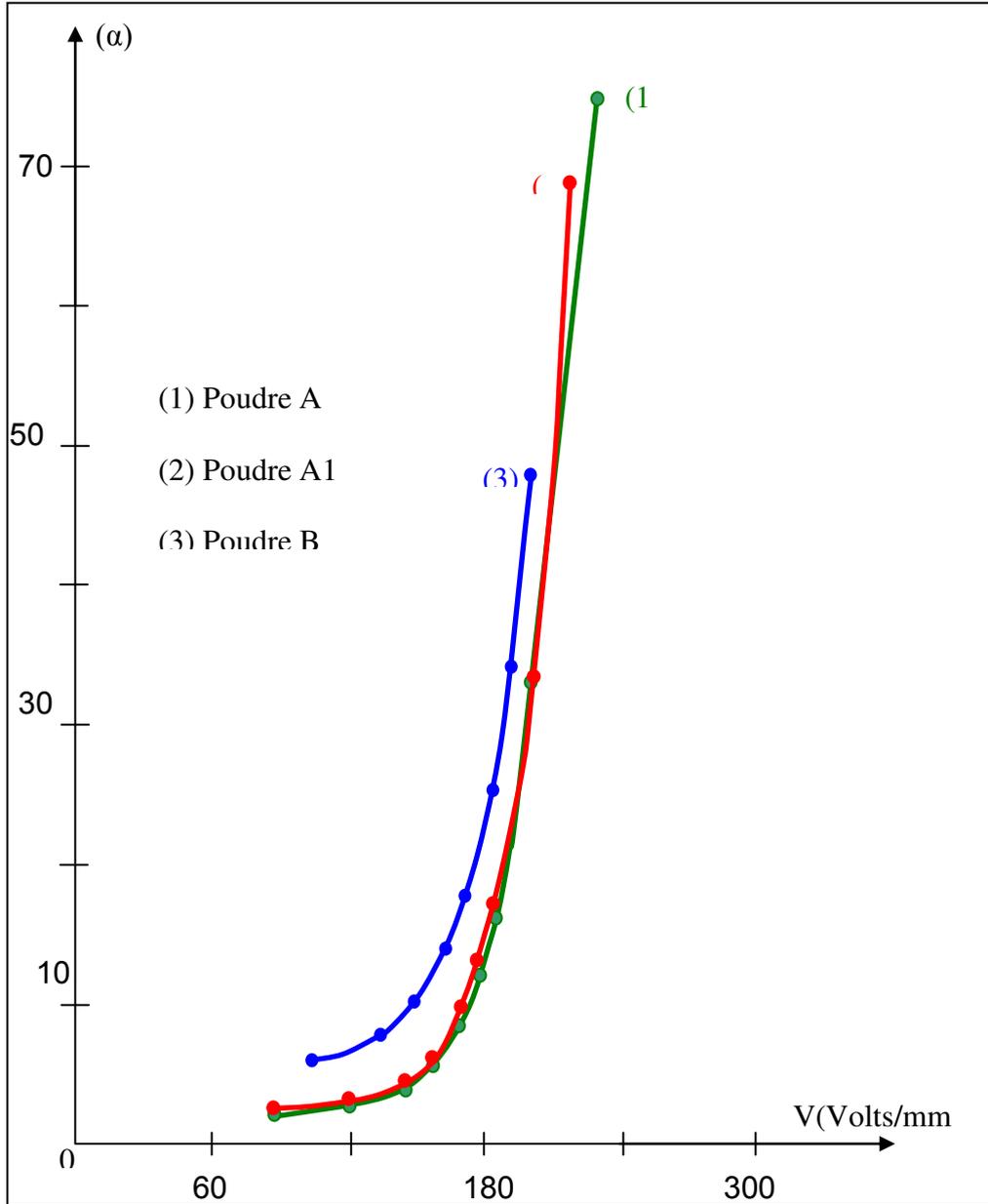


Fig. IV-2 Variation du coefficient de non-linéarité en fonction de la tension

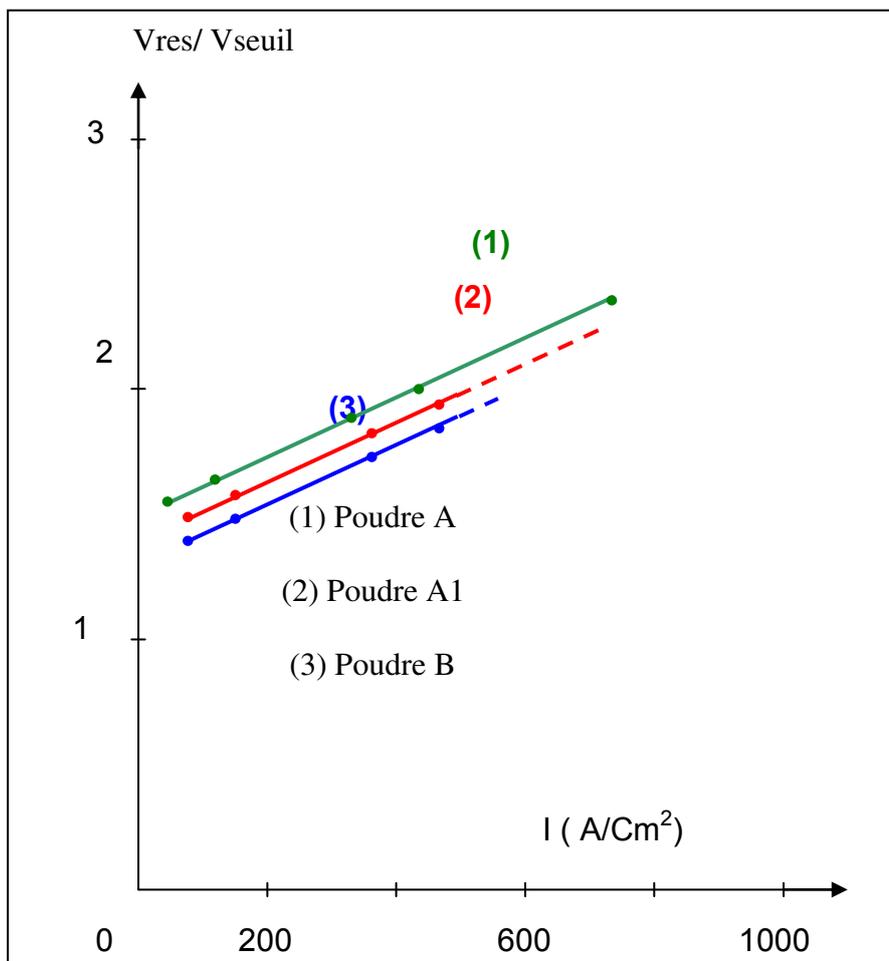


Fig. IV-3 : Variation de la tension résiduelle en fonction du pic de courant absorbé par l'échantillon

IV-2 Mesure de la capacité :

La connaissance de la capacité d'une varistance est importante, dans la mesure où celle-ci intervient dans le calcul des circuits dans lesquels elle est montée.

Pour réaliser cette mesure on utilise un montage comportant un transformateur élévateur de tension 220V – 5kV fig. IV-4. Un autotransformateur placé au primaire du transformateur permet de faire varier la tension au secondaire, et donc aux bornes de la varistance ; une résistance de 48 kΩ pour les basses tensions et de 10Ω pour les hautes tensions, placée en série avec l'échantillon permet la visualisation du courant à l'oscilloscope.

Nous remarquons que pour les tensions de valeur inférieure à celle de la tension de seuil, c'est-à-dire dans la zone ohmique de la caractéristique J (U) le courant est en

quadrature avec la tension, on a alors un courant purement capacitif, l'expression de la capacité est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{I}{U \times 2\pi f} \quad \text{(IV-1)}$$

Où I représente la valeur crête du courant
 V la valeur crête de tension,
 f la fréquence d'utilisation : f = 50 Hz

Une fois que la tension aux bornes de la varistance dépasse la tension de "coude", le courant ne suit plus la forme sinusoïdale compte tenu de la caractéristique non linéaire de la varistance. La mesure directe d'un courant capacitif devient, de plus en plus délicate. Nous avons alors recours à un développement en série de Fourier du courant.

1) : VARISTANCE ; (2) : RESISTANCE DE DETECTION

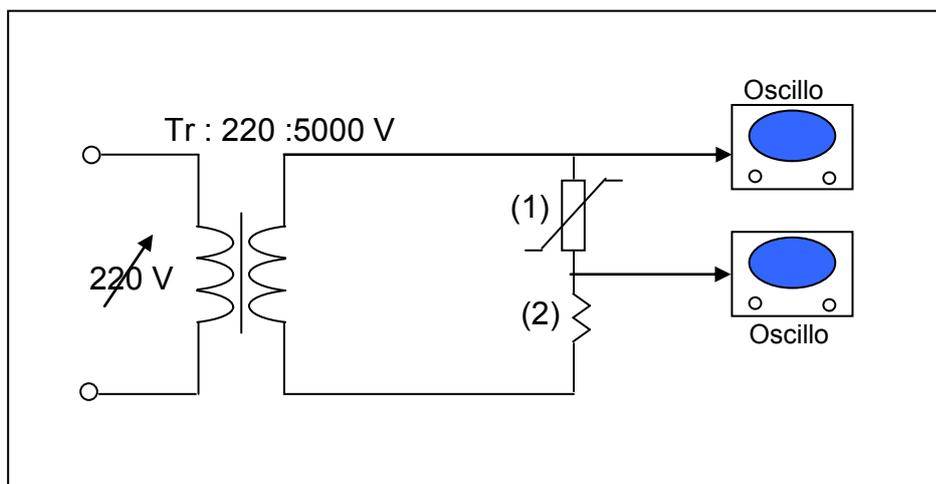


Fig. IV-4 : Dispositif expérimental permettant la mesure de C(U)

D'où la valeur de la capacité : $C = \frac{I_1}{U \cdot \omega}$ (IV-2)

Ce raisonnement est compliqué pour cela nous sommes amenés à l'utiliser uniquement pour des tensions strictement supérieures à la tension de seuil.

La figure IV-5 donne l'allure de la capacité en fonction de la tension pour la fréquence de 50 Hz. nous remarquons que C diminue légèrement dans la zone

ohmique de la caractéristique $J(V)$ et augmente dès que la varistance à un comportement non linéaire.

IV-2-1 Mesure de la capacité en fonction de la fréquence

Dans plusieurs applications les varistances travaillent sous tension sinusoïdale à diverses fréquences. Pour cela, il nous a paru important de tracer la variation de la capacité en fonction de la fréquence et d'en déduire la capacité apparente.

La figure IV-6 montre les caractéristiques $C(f)$ obtenues à l'aide du pont de mesure. Nous remarquons une faible décroissance de C lorsque la fréquence croît.

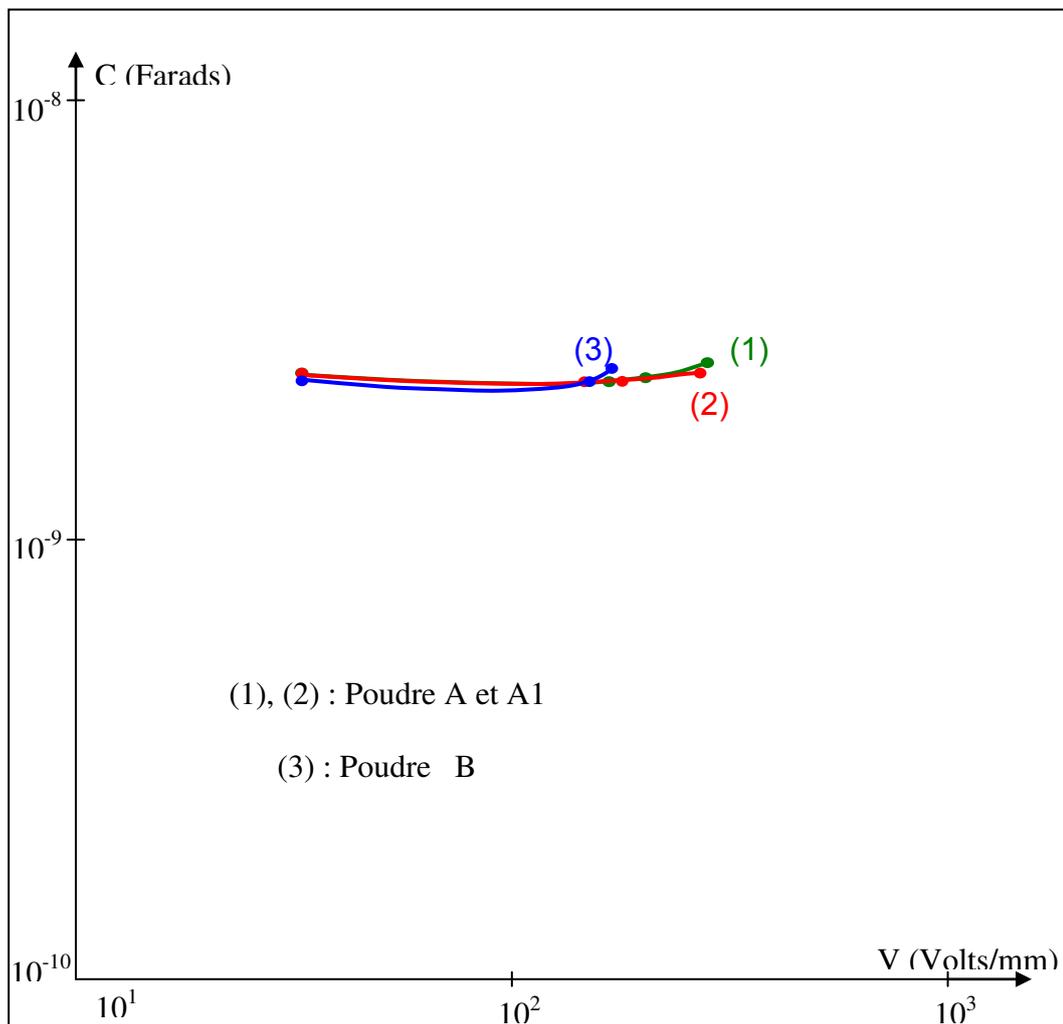


Fig. IV-5 Variation de la capacité en fonction de la tension

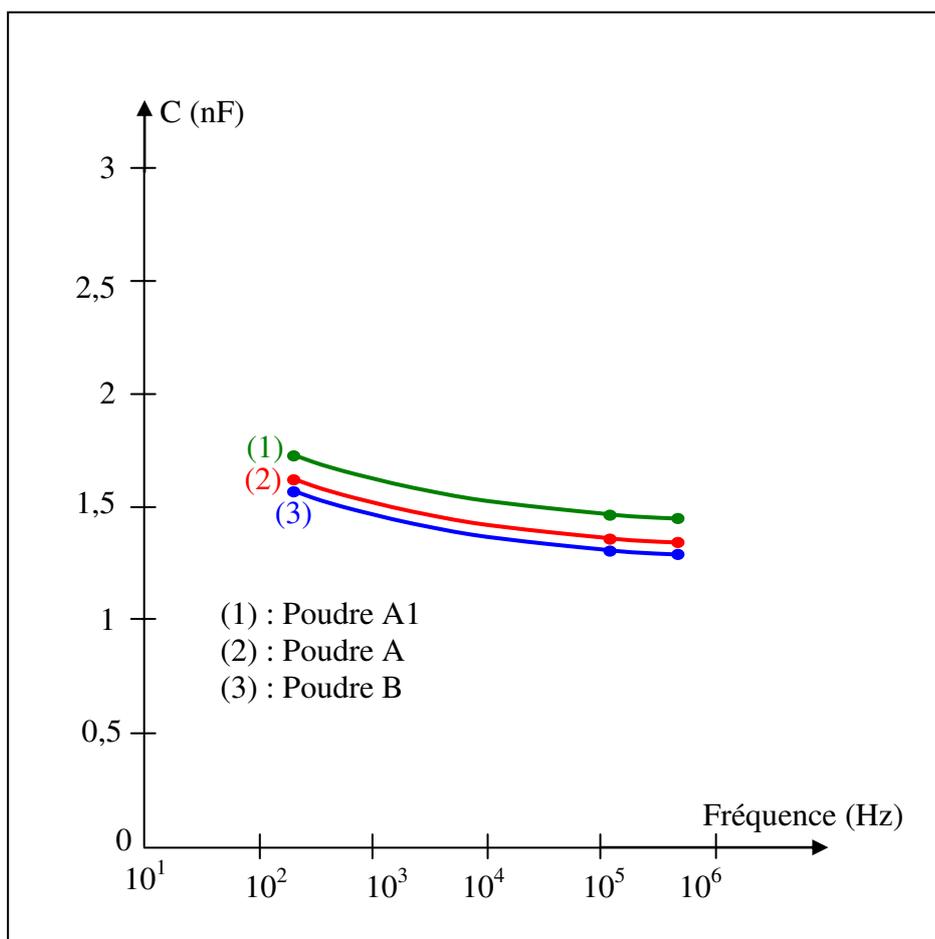


Fig. IV-6 : Variation de la capacité en fonction de la fréquence

IV-3 Cas de la tension alternative

Ces essais ont été effectués sur les échantillons A, A₁ et B aux températures de 100, 120, 150°C, sous les tensions de contrainte en valeurs efficaces égales à 0,55 ; 0,65 et 0,75 fois la tension de seuil V_s , mesurée en continu.

Le circuit électrique qui nous a permis de faire cette expérience est représenté sur la figure IV-7.

Ce montage permet de réaliser simultanément des essais de longue durée à différents niveaux de tension.

A l'aide d'un autotransformateur, nous fixons la tension au secondaire d'un transformateur (élévateur de tension) à la valeur de contrainte voulue. Les échantillons sont placés dans une étuve à la température choisie.

Des résistances (1/4 watt) mises en série avec chaque varistance permettent de limiter le courant en cas d'emballement thermique.

Soumises aux contraintes décrites ci-dessus, certaines varistances voient leur résistance décroître. L'accroissement du courant de fuite qui en résulte peut conduire à une détérioration du matériau par emballement thermique.

Tout au long de l'opération de vieillissement nous avons suivi l'évolution en fonction du temps, des trois principales grandeurs caractérisant une varistance, à savoir :

- Le courant de fuite,
- La tension de seuil,
- Le coefficient de non linéarité.

Nous essaierons en tenant compte de ces résultats, de comparer les trois types d'échantillons.

Le mode opératoire pour obtenir ces grandeurs est le suivant :

Les varistances sont soumises aux tensions et températures décrites ci-dessus. Au bout d'un temps déterminé t , nous les sortons de l'étuve, nous laissons leur température décroître jusqu'à atteindre la température ambiante. Nous procédons alors à la mesure de la caractéristique $I(V)$, à partir de laquelle nous déduisons les paramètres I_F , α , et V_S .

Variation du courant de fuite en fonction du temps

Des résistances (1/4 watts) mises en série avec chaque varistance permettent de limiter le courant en cas d'emballement thermique.

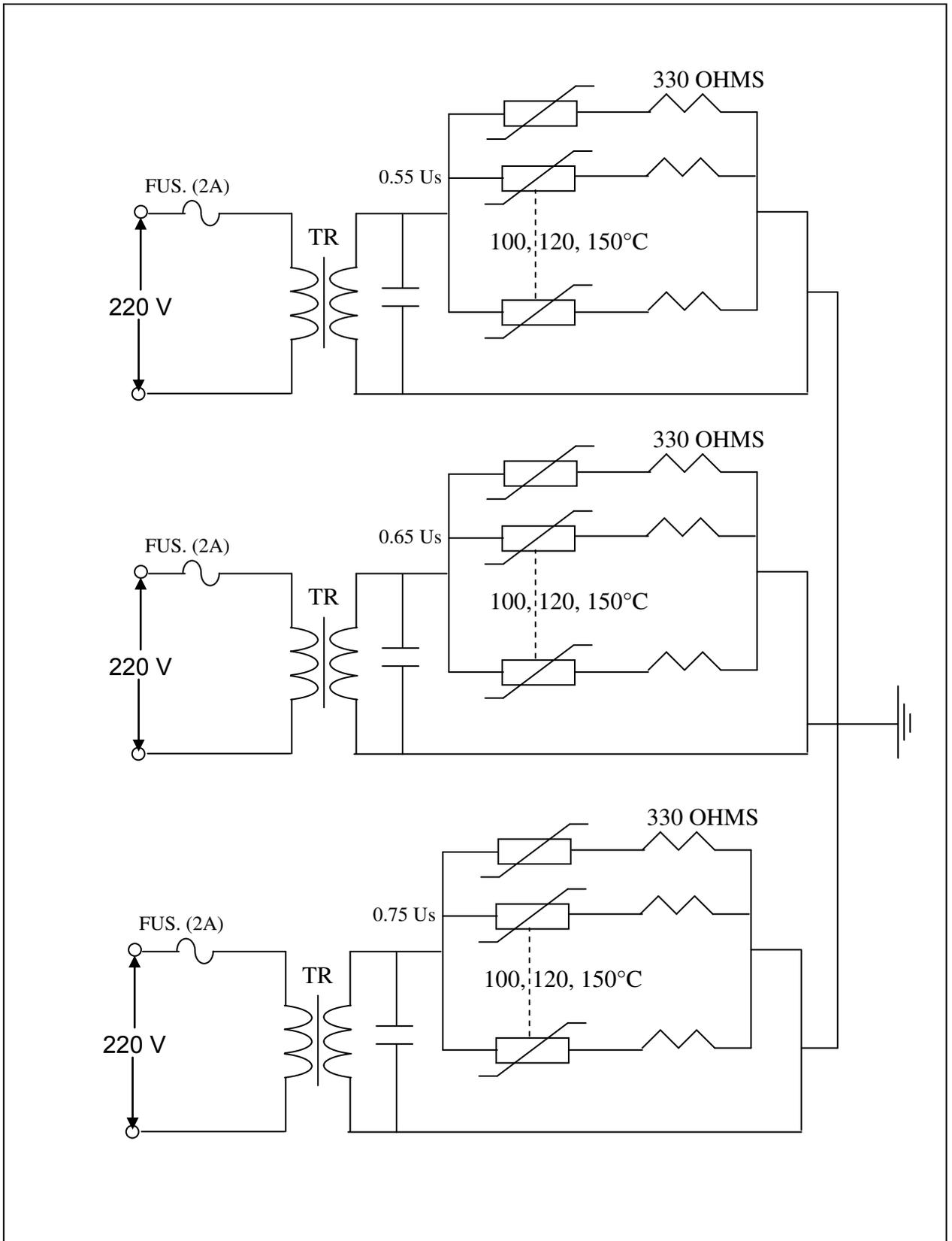


Fig. IV-7 : Schéma de principe du circuit électrique permettant d'effectuer le vieillissement en alternatif

Soumises aux contraintes décrites ci-dessus, certaines varistances voient leur résistance décroître. L'accroissement du courant de fuite qui en résulte peut conduire à une détérioration du matériau par emballement thermique.

Tout au long de l'opération de vieillissement nous avons suivi l'évolution en fonction du temps, des trois principales grandeurs caractérisant une varistance, à savoir :

- Le courant de fuite,
- La tension de seuil,
- Le coefficient de non linéarité.

Nous essaierons en tenant compte de ces résultats, de comparer les trois types d'échantillons.

Le mode opératoire pour obtenir ces grandeurs est le suivant :

Les varistances sont soumises aux tensions et températures décrites ci-dessus. Au bout d'un temps déterminé t , nous les sortons de l'étuve, nous laissons leur température décroître jusqu'à atteindre la température ambiante. Nous procédons alors à la mesure de la caractéristique $I(V)$, à partir de laquelle nous déduisons les paramètres I_F , α , et V_S .

Variation du courant de fuite en fonction du temps :

Nous appellerons $\Delta I_F / I_F$ le rapport $\frac{I_F(t) - I_F(0)}{I_F(t)}$

où $I_F(t)$ représente le courant de fuite à l'instant t de la mesure et $I_F(0)$ le courant à l'instant où a débuté le vieillissement (27,44).

Les figures (IV-8, IV-9, IV-10) mettent en évidence l'évolution de $\Delta I_F / I_F$ en fonction du temps, pour les trois tensions de vieillissement. Ces caractéristiques sont paramétrées par la température.

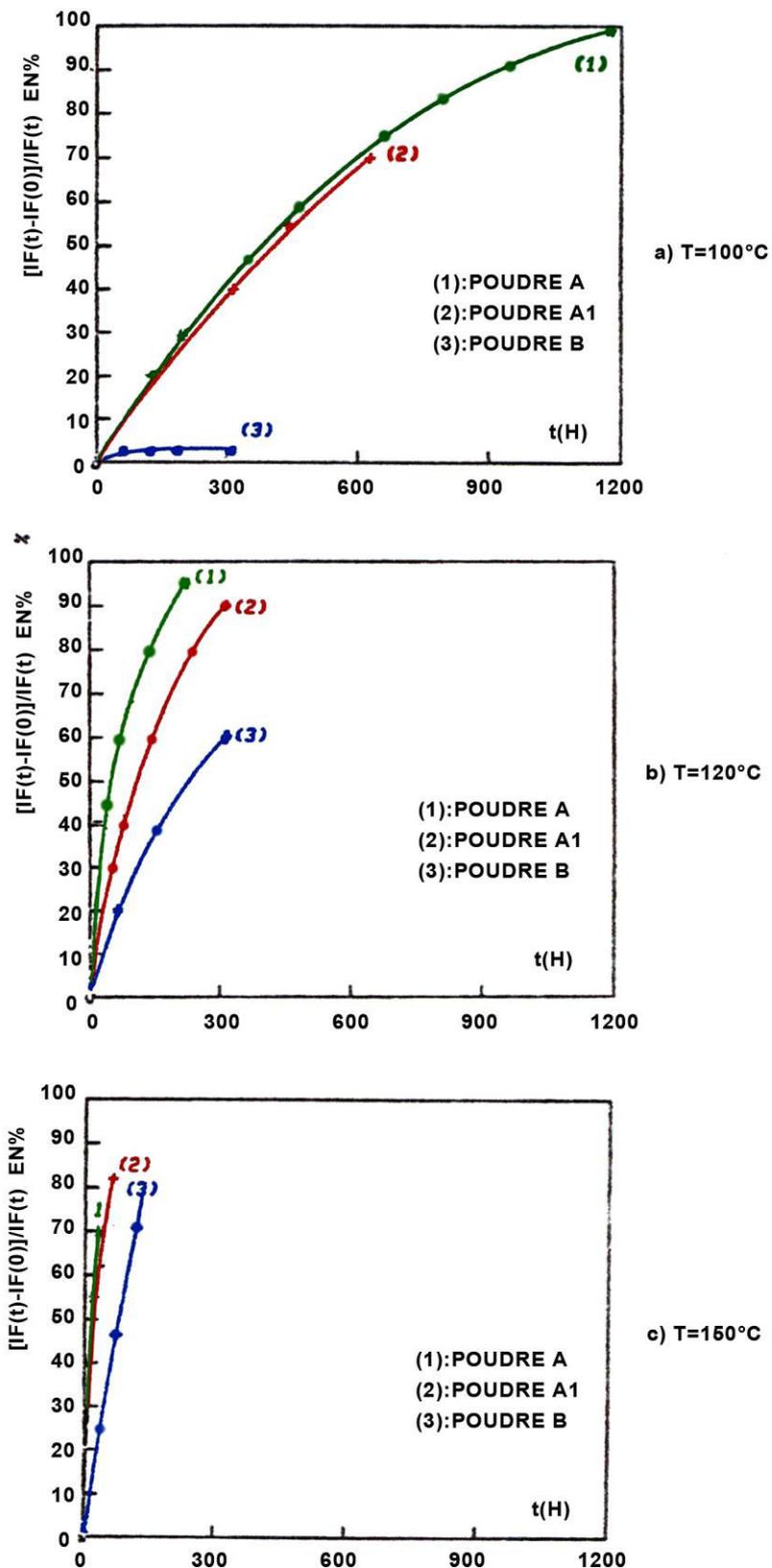
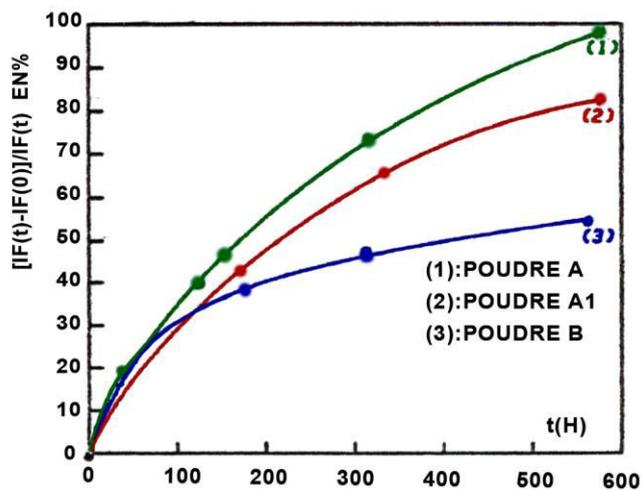
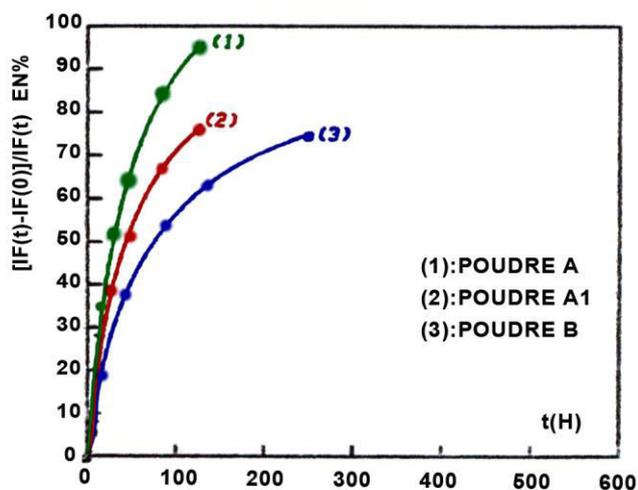


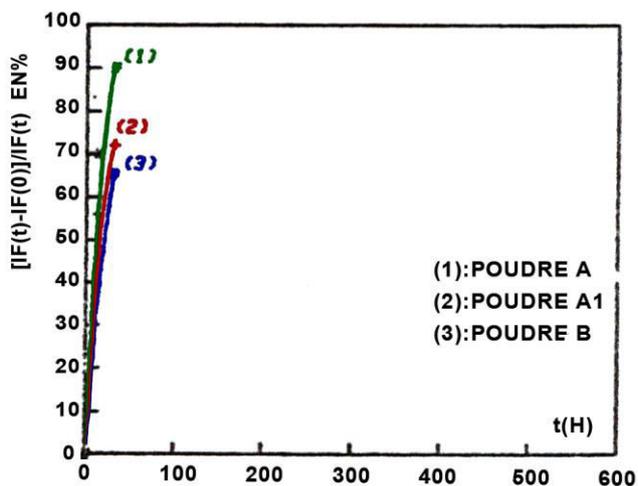
Fig. IV-8 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.55x_{useff}$



a) T=100°C



b) T=120°C



c) T=150°C

Fig.IV-9 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.65x_{useff}$

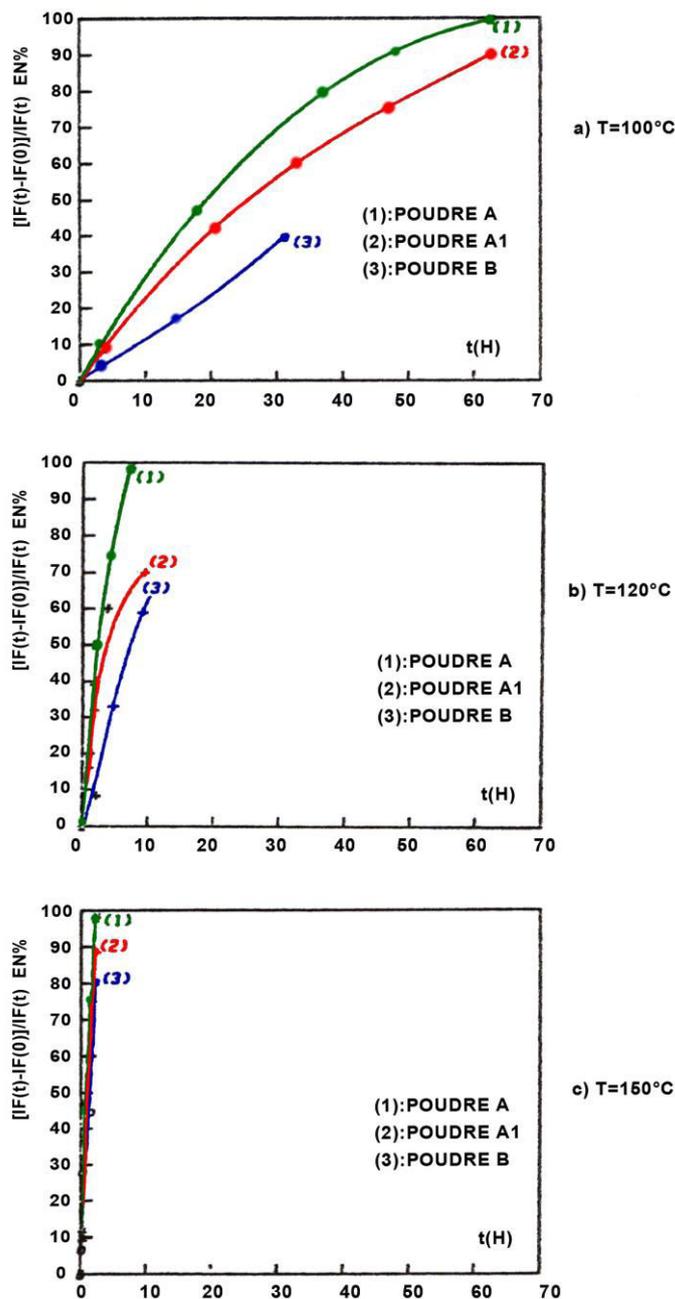


Fig. IV-10 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.75x_{\text{useff}}$

L'étude de ces caractéristiques, montre que pour une tension donnée la pente de $\Delta I_F / I_F$ est d'autant plus grande que la température est plus élevée. Par exemple, pour une tension $U_{\text{eff}} = 0,55 \times U_{\text{Seff}}$, la valeur de ces pentes pour les trois poudres étudiées est donnée par le tableau (IV- 1).

T°C \ Poudres	100	120	150
Poudre A	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$14,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
Poudre A ₁	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
Poudre B	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$

TABLEAU (IV-1) : Pente des courbes $\frac{\Delta I_F}{I_F}$ pour $V = 0,55 \times U_{Seff}$

La caractéristique correspondant à la poudre B présente la pente la plus faible. Des caractéristiques analogues à celles de la figure IV-8 ont été tracées pour des tensions de $0,65 \times U_{Seff}$ et $0,75 \times U_{Seff}$ (fig. IV-9 et IV-10).

En prenant $T = 100^\circ\text{C}$ et la tension $V = 0,55 \times U_{Seff}$, $0,65 \times U_{Seff}$ et $0,75 \times U_{Seff}$ comme paramètres, nous pouvons dresser un tableau (IV-2) donnant les pentes de $\Delta I_F / I_F$:

	$0,55 \times V_s$	$0,65 \times V_s$	$0,75 \times V_s$
Poudre A	0,16	0,64	3,2
Poudre A ₁	0,165	0,9	2,56
Poudre B	0,05	0,512	1,6

TABLEAU (IV-2) : pentes des courbes $\frac{\Delta I_F}{I_F}$ pour $T = 100^\circ\text{C}$

En comparant les figures (IV-8, IV-9 et IV-10), nous pouvons constater que seules les varistances élaborées à partir de la poudre B, fonctionnant à une température inférieure ou égale à 100°C et sous une tension permanente de $0,55 \times U_{Seff}$ sont susceptibles de garantir une bonne stabilité.

En réalité dans les applications industrielles, la température de la varistance n'excède que très rarement 45°C (45, 48,53).

Variation de la tension de seuil et du coefficient de non linéarité en fonction du temps :

Tout au long du vieillissement, la tension de seuil et le coefficient de non linéarité ont tendance à baisser. Afin d'illustrer ces variations, nous avons tracé $\Delta U_s(t)/U_s$ et $\Delta \alpha(t)/\alpha$ fig. (IV-11, IV-12, IV-13, IV-14, IV-15, IV-16).

$\Delta U_s(t)/U_s$ et $\Delta \alpha(t)/\alpha$ représentant respectivement les rapports :

$$\frac{U_s(0) - U_s(t)}{U_s(0)} \text{ et } \frac{\alpha(0) - \alpha(t)}{\alpha(0)}$$

$U_s(t)$ et $\alpha(t)$ sont les mesures à l'instant t , et $U_s(0)$ et $\alpha(0)$ les mesures à l'instant initial.

Prenons comme précédemment l'exemple où la tension appliquée est de $0,55 \times U_{\text{seff}}$ et $T=100^\circ\text{C}$ fig. (IV-12a et IV-15a), nous obtenons alors pour $t = 500$ heures, le tableau (IV-3) :

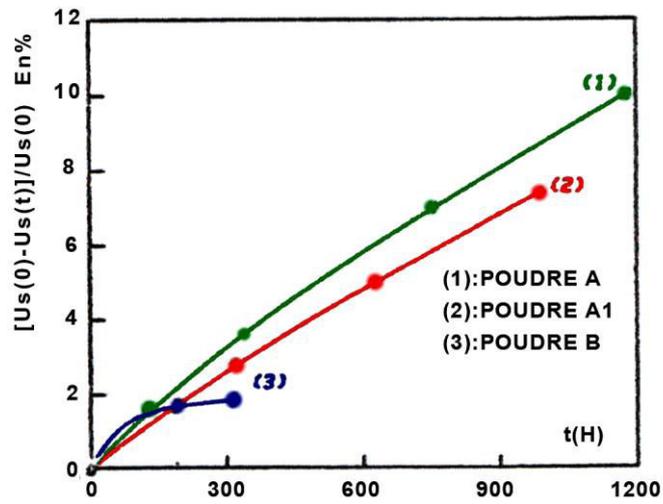
	$\Delta U_s(t)/U_s$	$\Delta \alpha / \alpha$	$U_s(500)$ volts	$\alpha (500)$
Poudre A	5 %	18 %	1714	59
Poudre A1	4 %	15 %	1730	61
Poudre B	1.5 %	9 %	1773	64

Tableau (IV-3) : valeur des pentes $\Delta U_s(t)/U_s$ et $\Delta \alpha / \alpha$

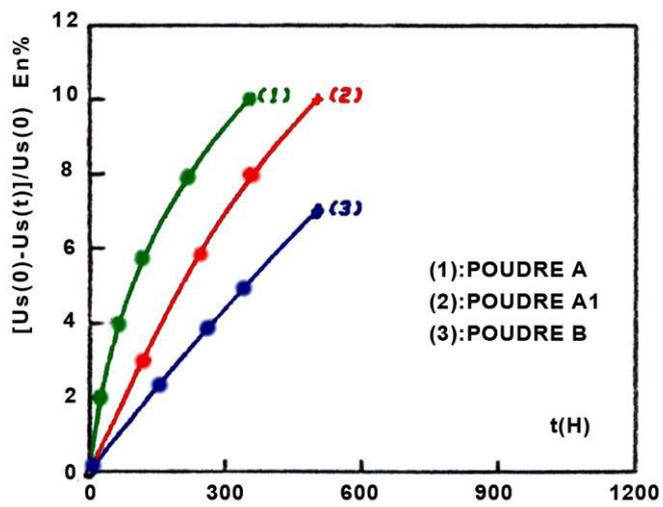
Pour $U=0.55 \times U_s$ et $T = 100^\circ\text{C}$

Les conditions initiales sur ces grandeurs sont :

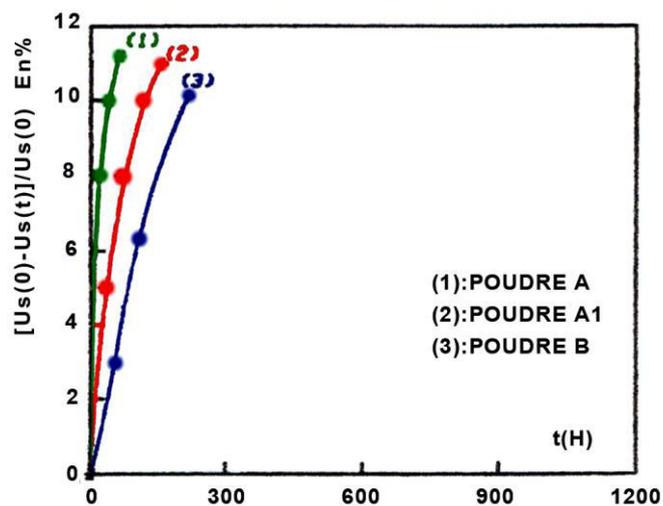
$\alpha(0) = 70$ et $U_s(0) = 1800$ volts.



a) T=100°C



b) T=120°C



c) T=150°C

Fig. IV-11 : Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.55xuseff$

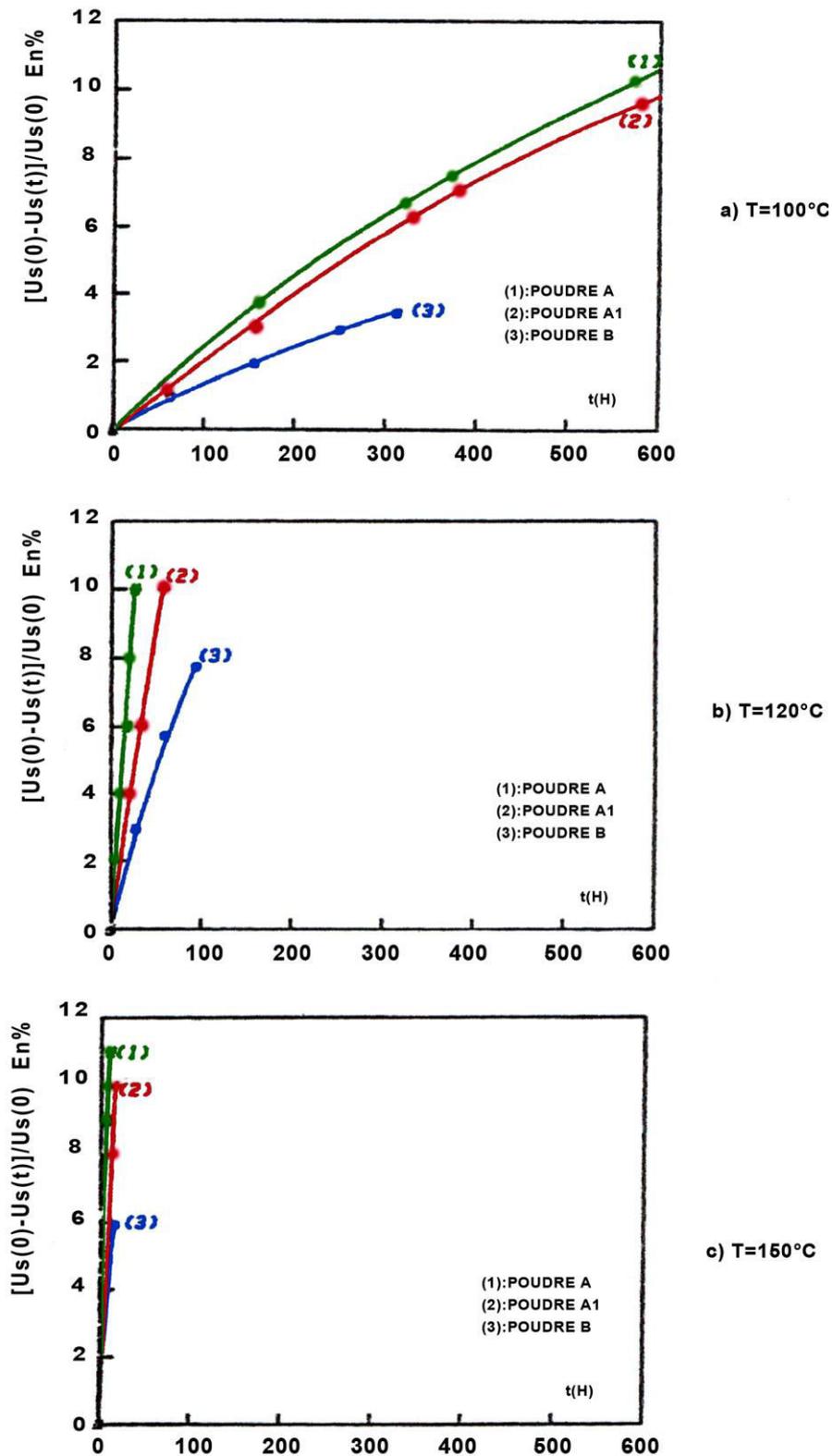
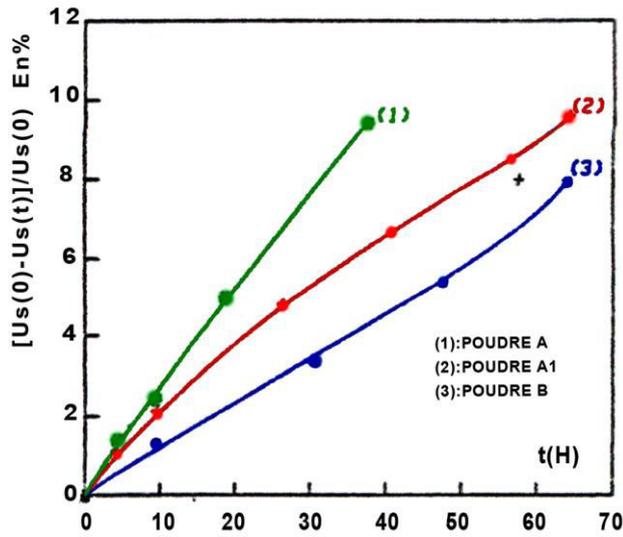
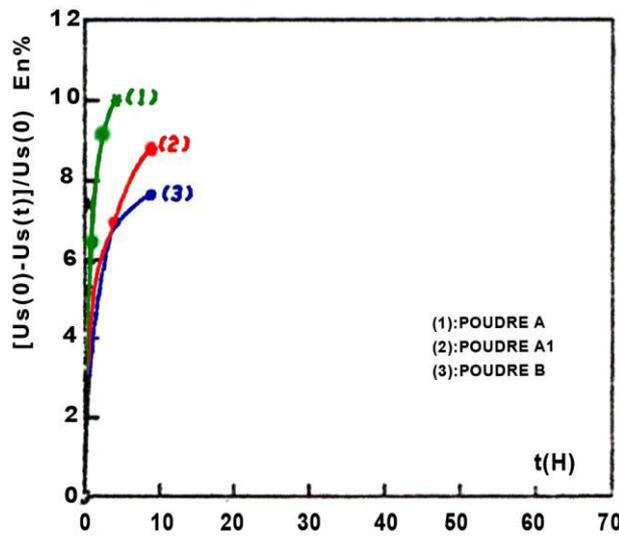


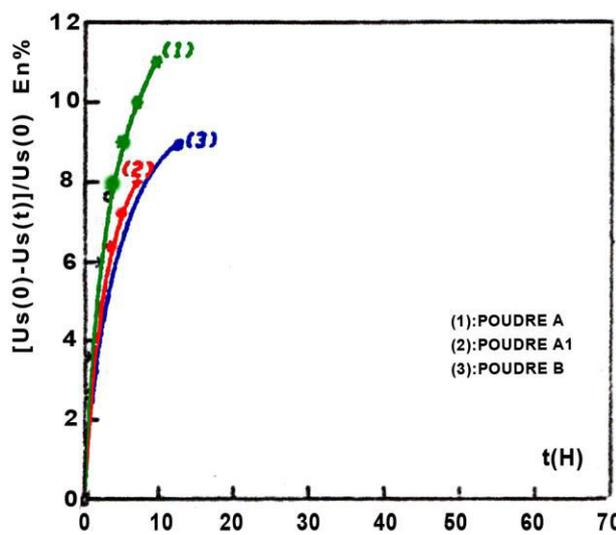
Fig. IV-12 Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.65xuseff$



a) $T=100^\circ C$

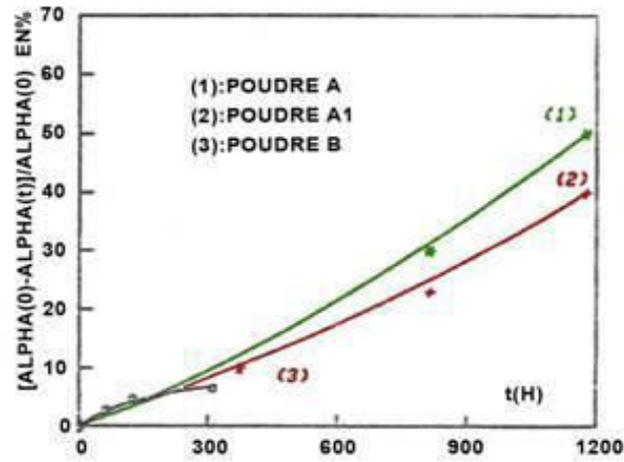


b) $T=120^\circ C$

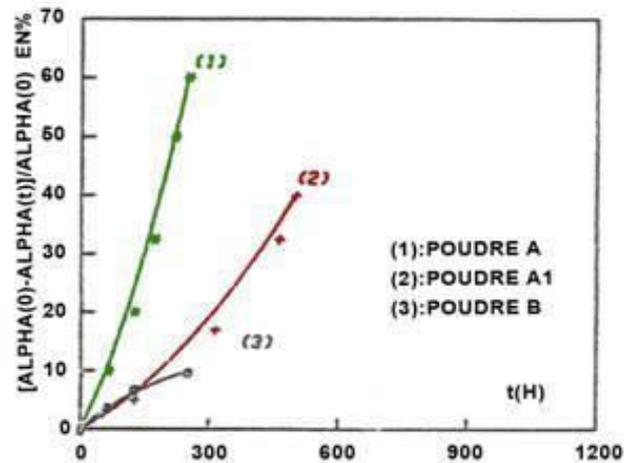


c) $T=150^\circ C$

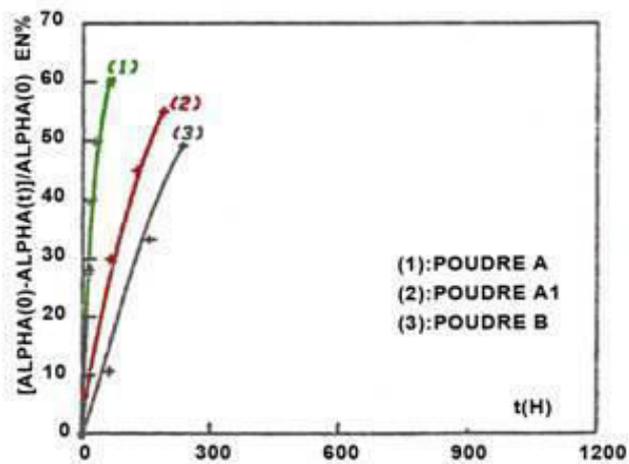
Fig. IV-13 : Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.75x_{useff}$



a) $T=100^\circ\text{C}$



b) $T=120^\circ\text{C}$



c) $T=150^\circ\text{C}$

Fig. IV-14 : Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,55x_{\text{seff}}$

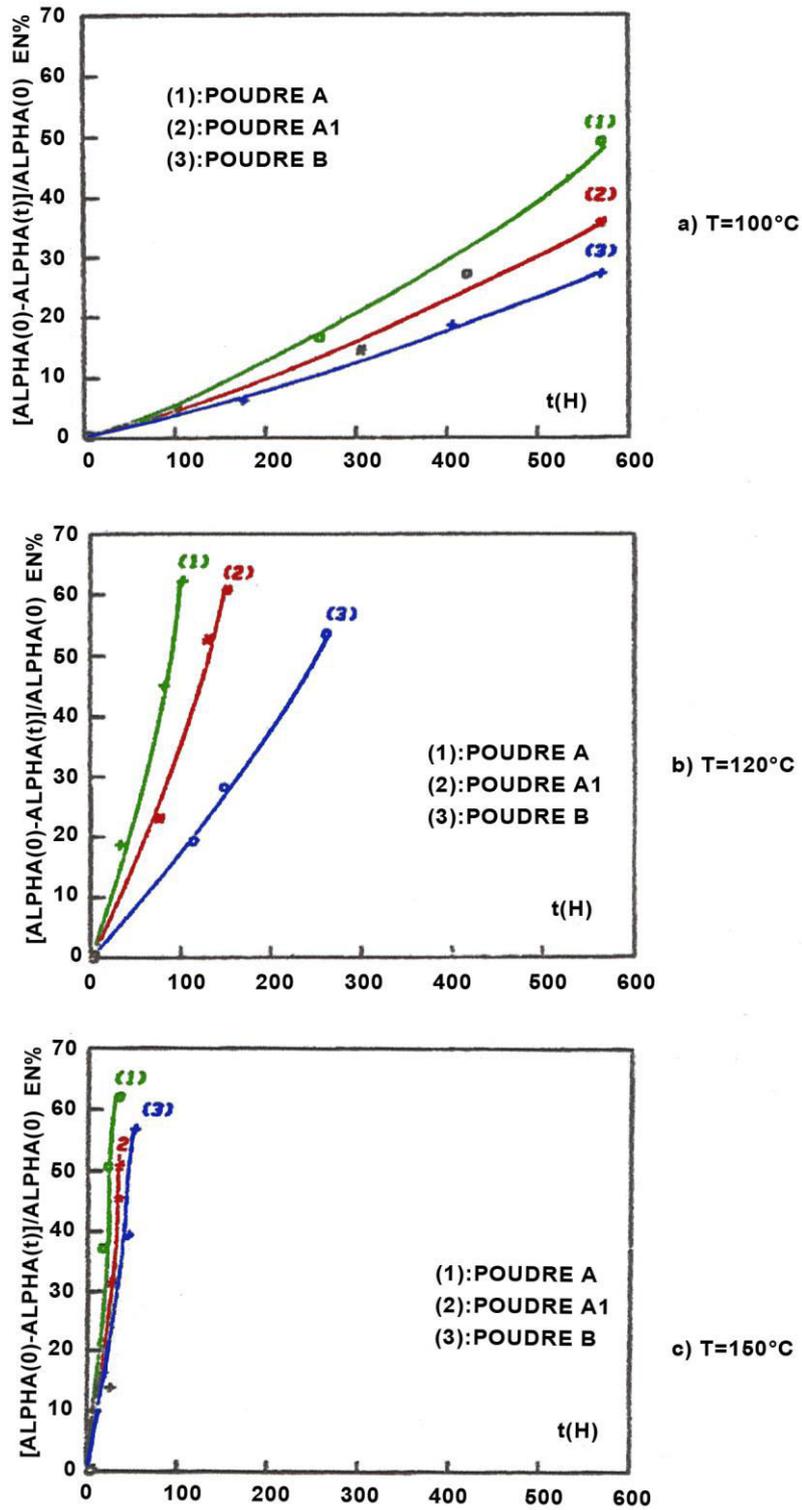
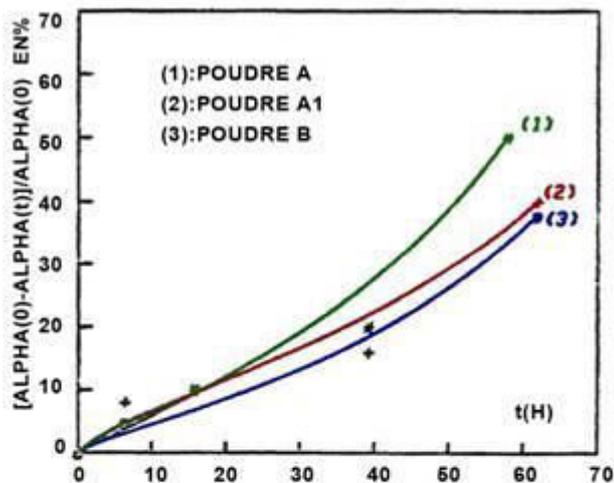
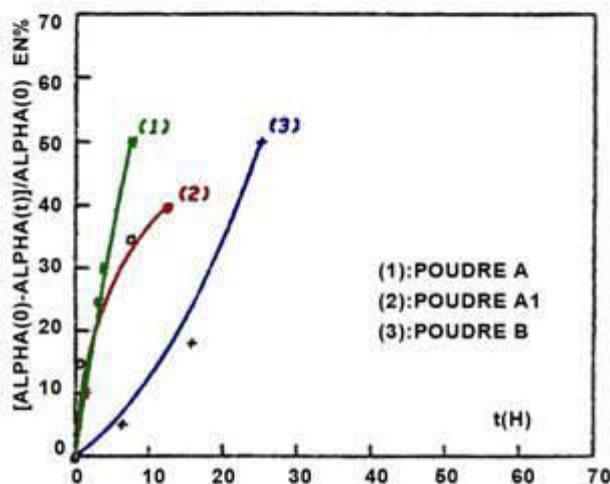


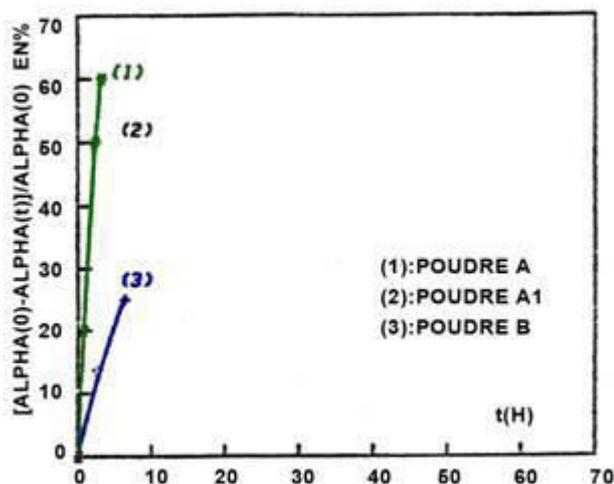
Fig. IV-15 : Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,65x u_{\text{seff}}$



a) $T=100^\circ\text{C}$



b) $T=120^\circ\text{C}$



c) $T=150^\circ\text{C}$

Fig. IV-16 : Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,75u_{\text{seff}}$

Une diminution de α jusqu'à environ 70 % de sa valeur initiale n'est pas gênante, dans la mesure où $\alpha(0)$ est assez important ; par contre pour la tension de seuil, une diminution exagérée de celle-ci entraînerait un écrêtage de la tension d'utilisation et un emballement thermique.

IV-4 Caractéristique de durée de vie en fonction de la température :

Nous avons choisi comme définition de la durée de vie d'une varistance, le temps au bout duquel la dérive de la tension de seuil $\Delta U_s(t)/U_s$ définie précédemment excède 10 % (63, 64,73).

A partir des courbes expérimentales donnant la durée de vie en fonction de la température, nous pouvons en utilisant un modèle statistique, déduire la durée de vie à la température ambiante.

Théoriquement la durée de vie est donnée par la relation suivante :

$$D.V = A \exp (C/T) \tag{IV-3}$$

où D.V représente la durée de vie, A et C des constantes et T la température. D'après les caractéristiques de la figure IV-17 expriment le Log (D.V.) en fonction de 1/T (où T est exprimée en degrés K), nous déduisons les valeurs de C pour les 3 tensions de vieillissement, qui sont nous le rappelons $0,55 \times U_{\text{Seff}}$, $0,65 U_{\text{Seff}}$ et $0,75 U_{\text{Seff}}$.

C représente la valeur de la pente de la droite correspondant à $\text{Log} (D.V) = f (1/T)$. Donner dans le tableau IV-4.

	0,55 x U _s	0,65 x U _s	0,75 x U _s
POUDRES			
Poudre A	13200	12000	9710
Poudre A ₁	13600	12500	10000
Poudre B	14000	12800	10300

TABLEAU IV-4 : Valeur des pentes $\text{Log} (D.V.) = f (1/T)$

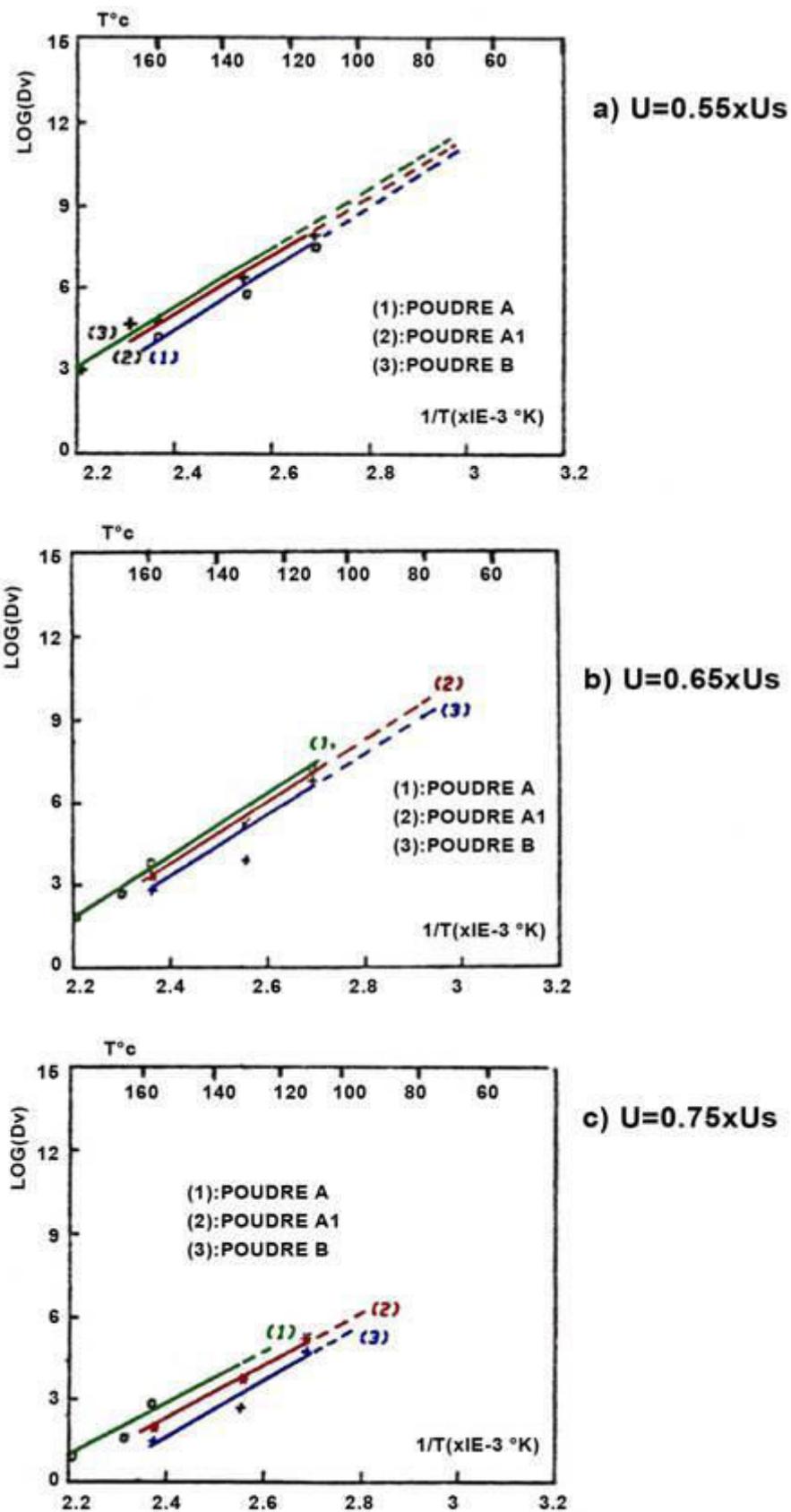


Fig. IV-17 : Durée de vie en fonction de la température

Si l'on suppose que la température ambiante est de 45°C, et en utilisant directement les caractéristiques de la figure IV-17, nous obtenons les durées de vie tableau IV-5.

DUREE DE VIE	0,55 x U _s	0,65 x U _s	0,75 x U _s
POUDRES			
Poudre A	70 ans	22 ans	40 H.
Poudre A ₁	90 ans	38 ans	55 H.
Poudre B	120 ans	48 ans	60 H.

TABLEAU IV-5 : Durée de vie pour T = 45°C

Ces valeurs sont obtenues par prolongement de la droite correspondante, jusqu'à la valeur de T = (45 + 273) °K. Nous lisons ensuite Log (D.V.) à partir duquel nous déduisons D.V.

D'après ces résultats, et nous l'avons dit au paragraphe précédent les varistances susceptibles d'avoir un bon fonctionnement devront être élaborées à l'aide de la poudre B.

IV-5 Vieillissement en continu

Les varistances sont aussi utilisées pour la protection des dispositifs sous tension continue, comme les circuits électroniques, les centrales photovoltaïques... Ce genre d'application est très fréquent pour les basses tensions.

Afin d'avoir une estimation de leur durée de vie sous tension permanente et à la température ambiante, nous avons entrepris une étude de vieillissement accéléré. La démarche reste identique à celle utilisée pour le vieillissement en alternatif.

Comme d'autres auteurs, nous avons choisi la tension appliquée égale à 0,8XU_s. Nous avons également travaillé aux trois températures qui sont : 100, 120 et 150°C.

Comme conditions initiales, et ceci pour les trois poudres utilisées, nous avons un courant de fuite I_F(0) à peu près identique qui est de l'ordre de 5.10⁻⁷A/cm² à la température ambiante. Ce même courant devient égal à 3.10⁻⁶ A/cm² pour une température de 100°C, 8.10⁻⁶ A/cm² pour 120°C et 9.10⁻⁵ A/cm² pour 150°C. Les

puissances dissipées correspondant à ces trois courants sont respectivement : 20mw/cm³, 39mw/cm³ et 60 mw/cm³.

Les échantillons sont placés dans trois étuves différentes, réglées chacune à une des températures indiquées ci-dessus. Nous mettons les échantillons sous tension, et nous suivons l'évolution en fonction du temps, du courant de fuite, de la tension de seuil et du coefficient de non linéarité, comme pour l'étude du vieillissement en alternatif (62, 63,74).

L'examen des caractéristiques donnant la variation du courant de fuite $\Delta I_F / I_F$ en fonction du temps fig. IV-18 nous permet de faire les remarques suivantes :

Jusqu'à une tension appliquée de 0,8 x U_s, le courant se stabilise à 100°C pour les échantillons réalisés à l'aide de la poudre B.

L'accroissement de la pente de $\Delta I_F / I_F(t)$ est d'autant plus grande que la température est élevée.

Le tableau IV-6 donne la valeur des pentes pour les trois températures utilisées. Ces pentes sont calculées en prenant le point t = 0 et t = 30 h.

T°C	100	120	150
POUDRES			
Poudre A	0.15	0.78	4.5
Poudre A ₁	0.13	0.68	3.3
Poudre B	0.08	0.3	2

Tableau IV-6 : Valeur des pentes $\Delta I_F / I_F$ pour les trois températures d'utilisation.

Les figures IV-19 et IV-20 donnent la variation de la tension de seuil et du coefficient de non linéarité en fonction du temps. Les commentaires émis dans l'étude du vieillissement en alternatif restent valables pour ces caractéristiques.

IV-5-1 Caractéristiques de durée de vie :

Comme pour le cas de la tension alternative, le critère de durée de vie en tension continue est basé sur la dérive de la tension de seuil, celle-ci ne devant pas excéder 10%.

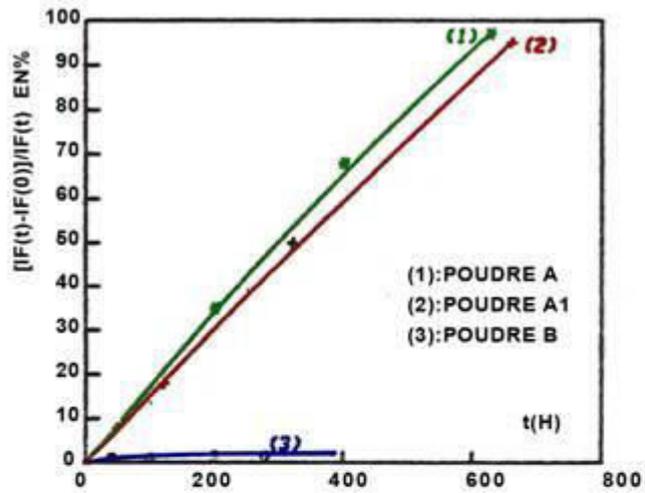
A partir des caractéristiques donnant la variation de la tension de seuil, en fonction du temps fig. IV-21 nous avons pu tracer la durée de vie en fonction de la température, la relation :

$D.V = A \exp (C/T)$ reste toujours valable.

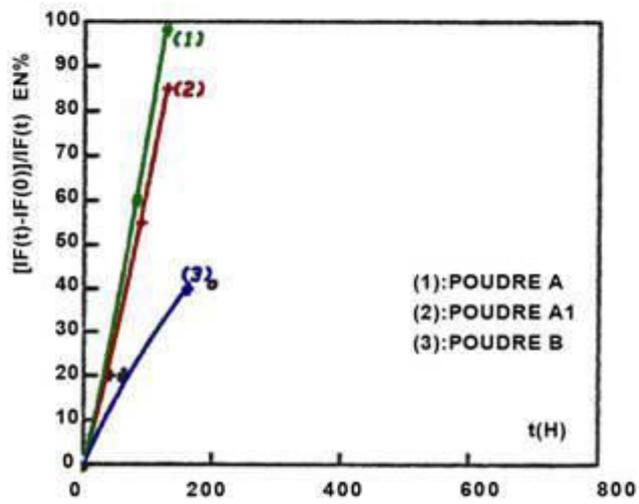
De ces caractéristiques tracées pour les trois poudres étudiées, nous déduisons la durée de vie à une température de 45°C ; ces valeurs sont données au tableau IV-7 :

POUDRES	DUREE DE VIE
Poudre A	55 ans
Poudre A1	65 ans
Poudre B	120ans

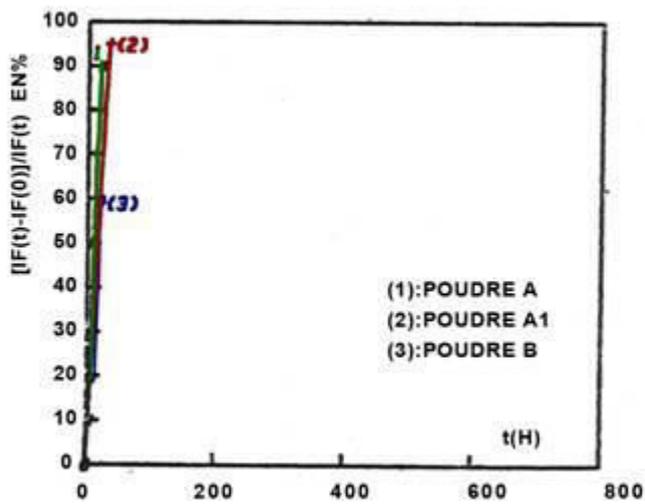
Tableau IV-7 : Durée de vie pour T = 45°C



a) $T=100^\circ\text{C}$



b) $T=120^\circ\text{C}$



c) $T=150^\circ\text{C}$

Fig. IV-18 : Evolution du courant de fuite en fonction du temps pour $u=0.8x u_s$

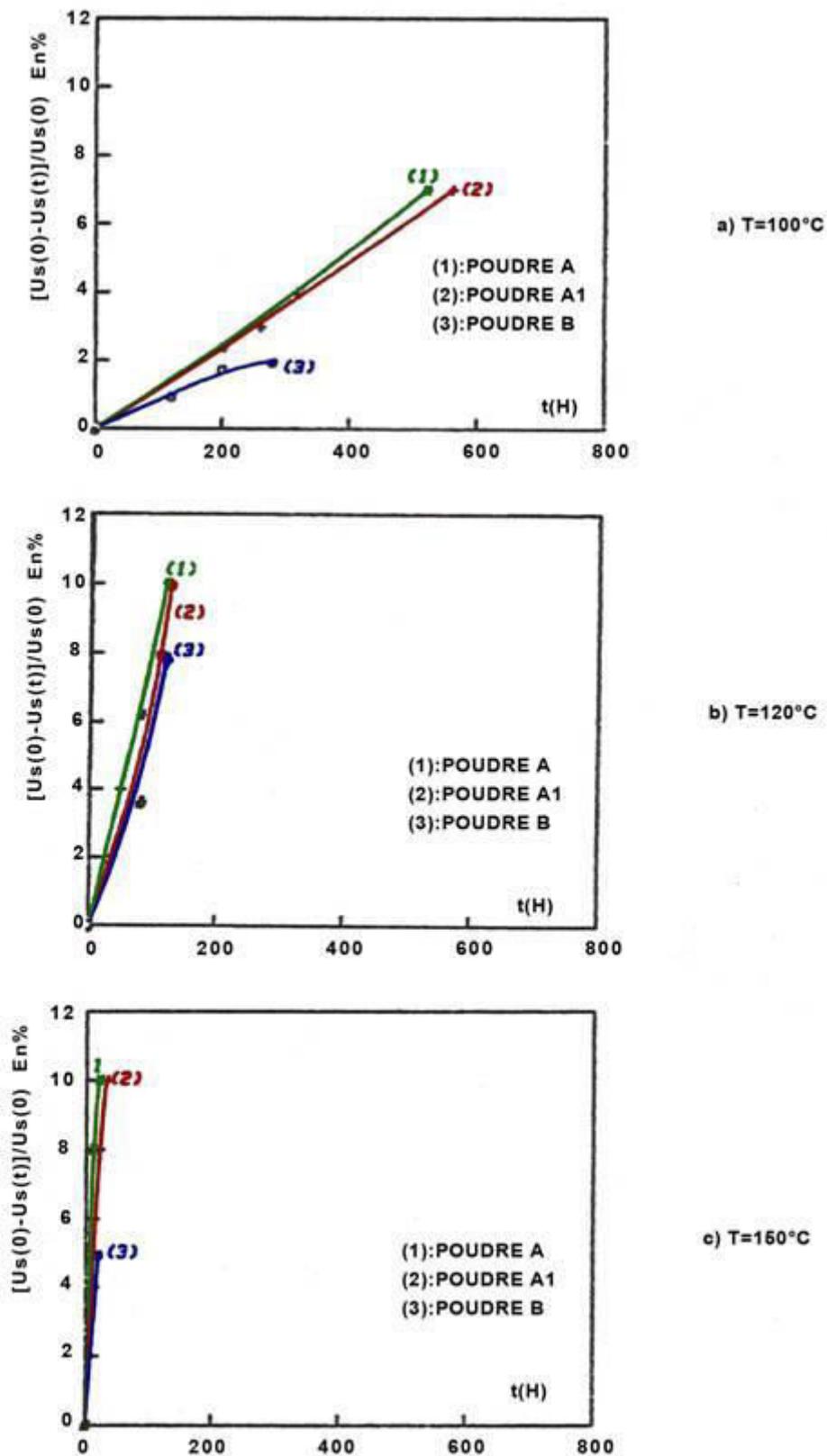
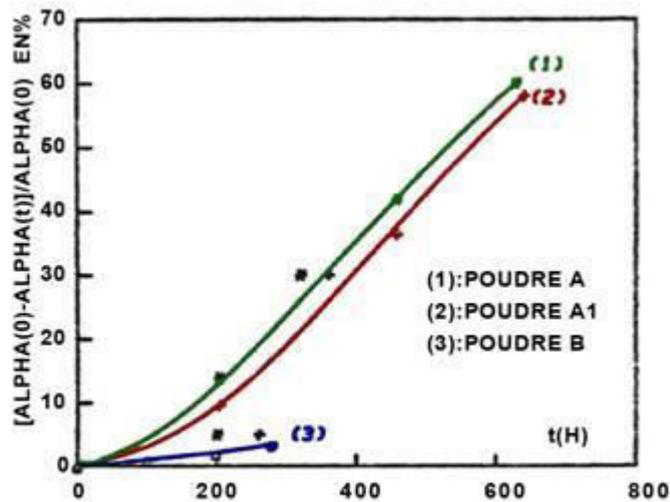
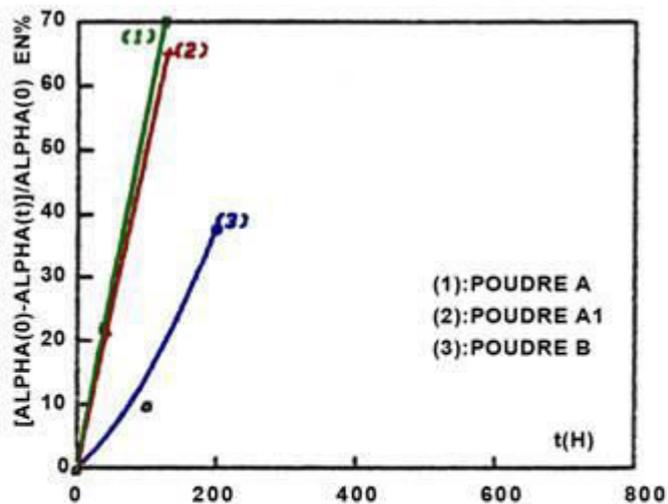


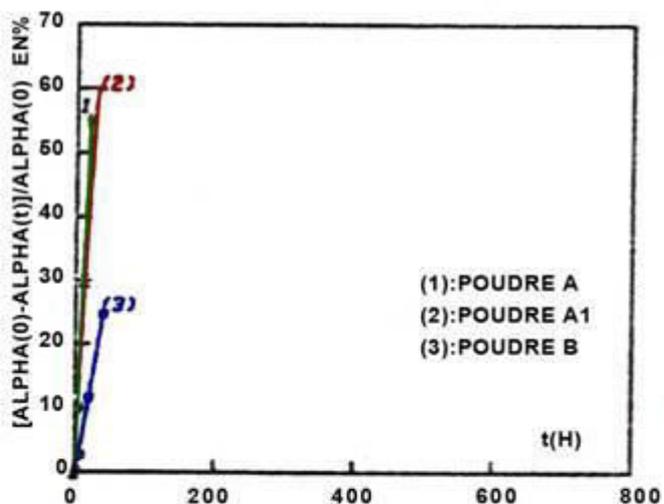
Fig. IV-19 : Evolution de la tension de seuil en fonction du temps pour $u=0.8 \times u_s$



a) $T=100^\circ\text{C}$



b) $T=120^\circ\text{C}$



c) $T=150^\circ\text{C}$

Fig. IV-20 : Evolution du coefficient de non linéarité en fonction du temps pour $u=0,8x_u$

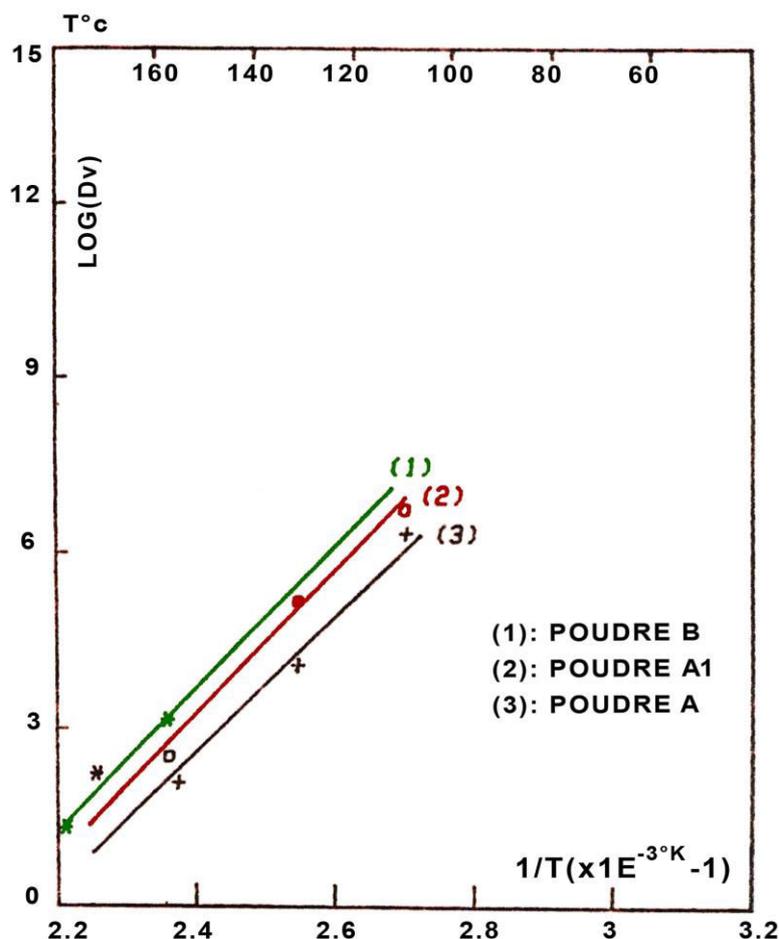


Fig. IV-21 : Trace de la courbe de durée de vie en fonction de la température

Nous remarquons que ces durées de vie peuvent être comparables à celles trouvées pour une tension alternative de $0,55 U_{\text{seff}}$.

IV-5-2 Durées de vie des varistances soumises à une surtension temporaire :

Il s'agit dans ce paragraphe d'étudier la durée de vie des varistances sous tension alternative.

Dans ce cas la durée de vie est définie comme étant le temps qui sépare l'instant de l'application de la tension d'essai à l'instant de la défaillance catastrophique de l'échantillon.

Notons la différence par rapport au cas précédent où l'on considère qu'un échantillon est défaillant lorsque la dérive de la tension de seuil dépasse 10 %. Cet essai est

justifié par le fait qu'il existe, dans le cas des réseaux électriques à fréquence industrielle, des surtensions momentanées dont la valeur dépasse largement celle prise en régime permanent. C'est le cas par exemple, d'un réseau triphasé à neutre isolé et dont une phase est subitement mise à la terre.

Le circuit qui nous a permis de réaliser cette manipulation est représenté sur la figure IV- 22.

L'élément principal est un transformateur de puissance 220V-3,5KV- 5A ; un rhéostat (300Ω) permettant d'ajuster la tension aux bornes du transformateur, donc aux bornes de la varistance.

A la température ambiante, nous fixons la tension d'essais, qui est une fraction de la tension de seuil, aux bornes de la varistance ; nous mesurons ensuite le temps au bout duquel la varistance est détruite.

Nous avons répété cette opération pour plusieurs fractions de la tension de seuil, et cela pour les trois poudres A, A₁ et B fig. IV-23. Nous ne remarquons pas une différence notable de durée de vie pour ces trois types de poudres. Pour une tension de l'ordre de 0,7 x U_S Il apparaît une asymptote horizontale.

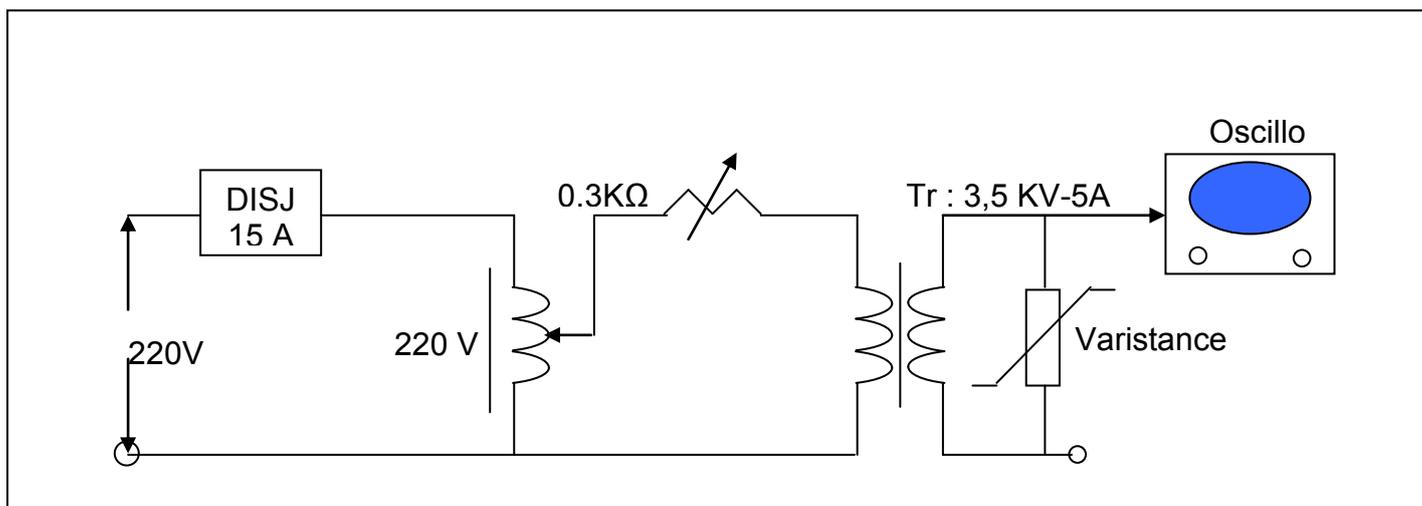


Fig. IV-22 : Schéma de principe du circuit permettant de tracer la durée de vie pour différentes surtensions permanentes.

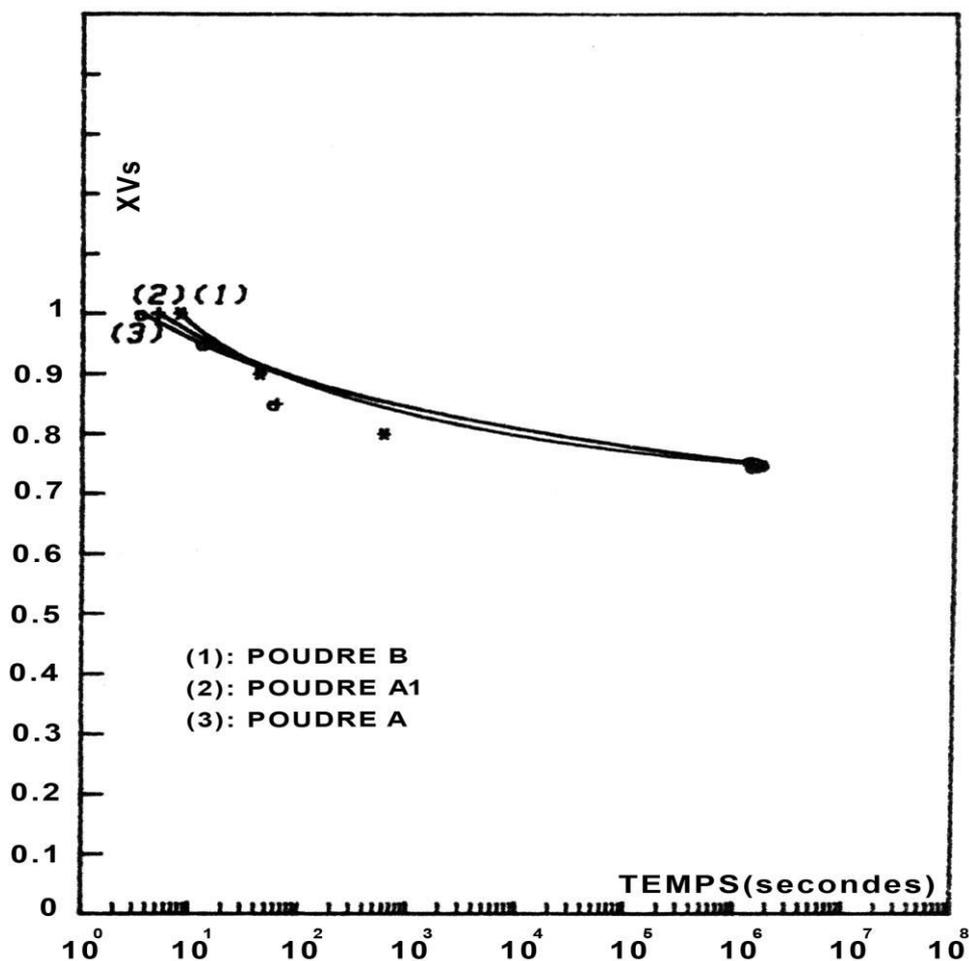


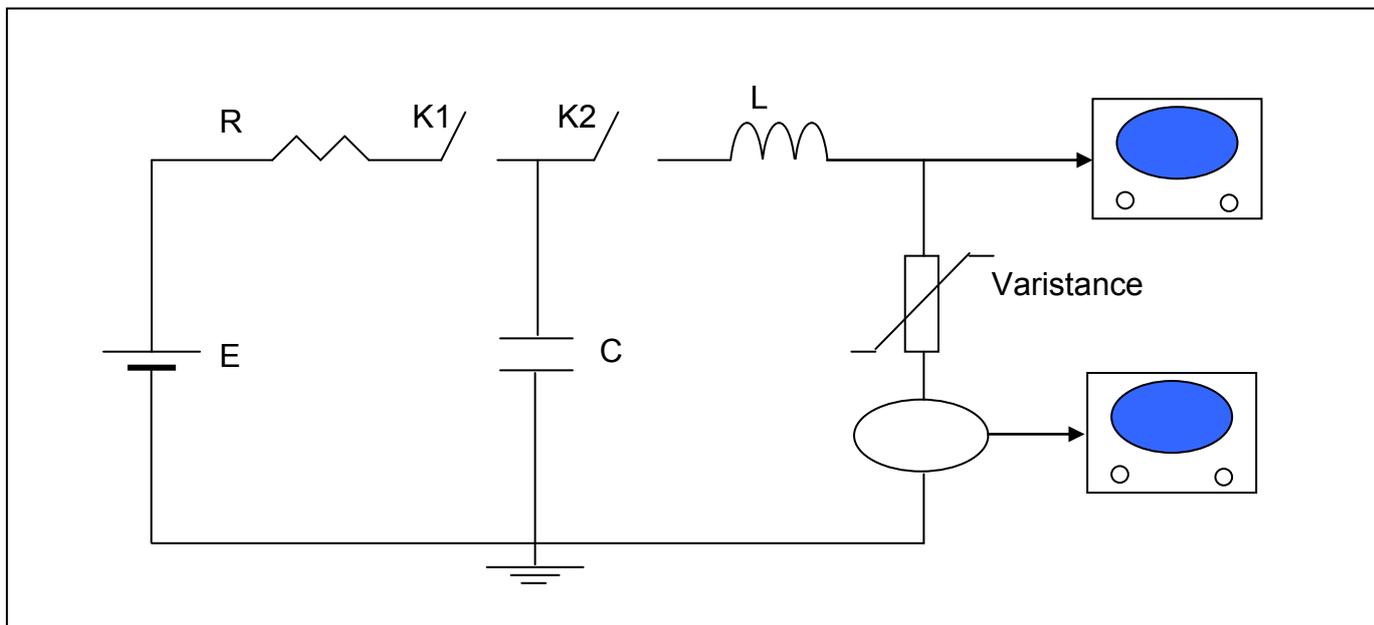
Fig. IV-23 : Durée de vie pour des surtensions permanentes

V-6 Essais aux chocs de tensions :

Dans les applications industrielles ou domestiques les varistances sont soumises à une tension continue ou alternative d'amplitude constante dans le temps.

A cette tension peuvent s'ajouter des surtensions, soit d'origine aléatoire (ex : foudre,...), soit d'origine connue, telle que la commutation dans des circuits électroniques. Si l'énergie véhiculée par ces chocs est trop importante, il se produit un échauffement et éventuellement une dégradation du matériau, et le courant de fuite à la tension nominale se trouve multiplié par un facteur important. La varistance ne pourra plus dissiper toute la puissance qu'elle reçoit du réseau et sera détruite très rapidement, entraînant le cas échéant un endommagement de l'installation qu'elle devait protéger.

L'essai consiste à simuler des chocs de tension de forte amplitude. Ces essais ont pu être réalisés à l'aide d'un générateur de chocs, fig. IV-24 dont le principe de fonctionnement est le suivant :



$C = 180 \mu\text{F}-6\text{kV}$

K_2 : Eclateur

$R = 375\text{k}\Omega$; $L=1\mu\text{H}$

Tr : Transformateur de courant

Fig. IV-24 : Schéma de principe du générateur de chocs

On charge le condensateur C de forte énergie ($180\mu\text{F}$, 6KV) à travers la résistance de charge R en utilisant une source de tension continue E , $5 \text{ KV}-10\text{mA}$. Cette première phase de l'opération se fait en fermant K_1 , K_2 restant ouvert. Une fois le condensateur C chargé à une tension fixée par l'opérateur, on ouvre l'interrupteur K_1 et on ferme K_2 , toute l'énergie emmagasinée dans le condensateur se trouve restituée à la varistance, à quelques pertes près, dues à l'effet Joule dans le circuit. Le courant est mesuré au moyen du transformateur Tr et la tension directement aux bornes de la varistance des formes d'ondes recueillies par les deux voies de l'oscilloscope est représentée sur la figure IV-25.

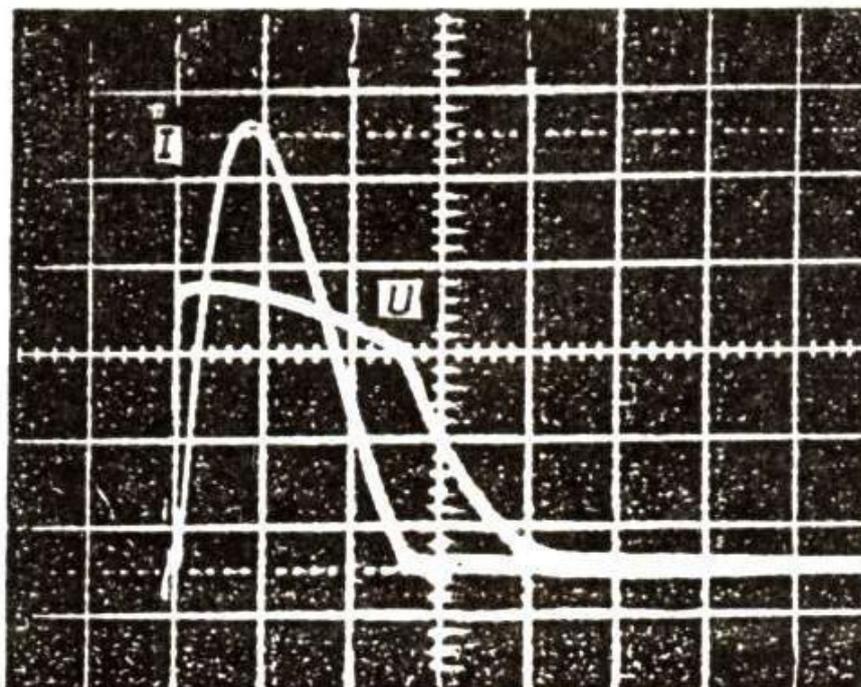


Fig. IV-25 : Forme d'onde de tension et de courant 8/20 μ s
1000A/division pour I et 900V/division pour U

La figure IV-26 montre l'influence de ces chocs sur la caractéristique J (V).

Nous avons vu au paragraphe précédent que seules les varistances réalisées à l'aide de la poudre B sont en mesure d'assurer une bonne stabilité du courant de fuite en cours de fonctionnement, pour cela les résultats concernant les chocs seront présentés uniquement pour ce type de varistance.

Des mesures de tensions résiduelles nous ont permis de calculer le rapport U_R/U_S ; où U_R représente la tension résiduelle et U_S la tension de seuil. Le tableau IV-8 donne les valeurs de ce rapport pour différentes amplitudes de courant :

I (kA)	U_R/U_S
5 KA	1,5
10 KA	1,80
65 KA	2,21

Tableau IV-8 :

Valeurs de U_R/U_S pour différents courants de chocs.

On peut observer sur les caractéristiques de la figure IV-26 que les varistances testées restent encore assez stables pour le nombre de chocs qu'elles ont subis ;

pour deux chocs de 65 KA le courant de fuite passe de $7 \cdot 10^{-7}$ à $7 \cdot 10^{-6}$ A/cm². L'énergie correspondant à un choc d'une telle Amplitude est de l'ordre de 150 J/cm³. La dégradation se traduit par une perte de la non linéarité ; ce coefficient dans notre cas, passe de la valeur 60 à la valeur de 28 pour deux chocs de 65 KA ; cette perte est suivie d'une augmentation de la densité de courant, à tension égale.

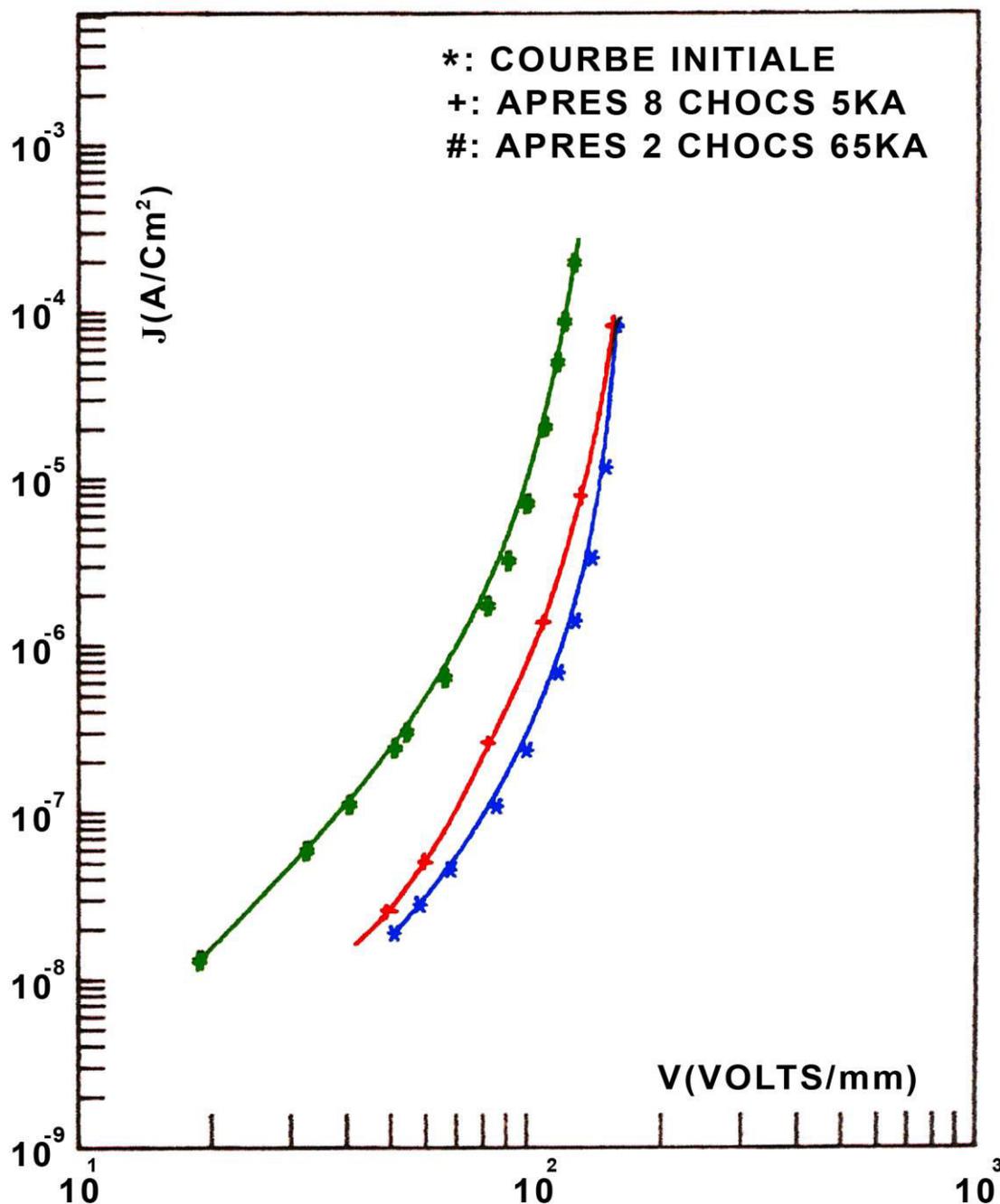


Fig. IV-26 : Evolution de la caractéristique courant-tension en fonction du nombre de chocs

La mesure expérimentale de la pente de $\text{Log } J = f(1/T)$ permet de connaître E_B Fig. VI -27. Dans la zone fortement non linéaire, le processus proposé par MAHAN et LEVINSON est un phénomène à deux étapes, pendant lesquelles les électrons passent du grain de ZnO dans l'interface, puis dans le grain voisin. L'accroissement brutal du courant s'explique ainsi :

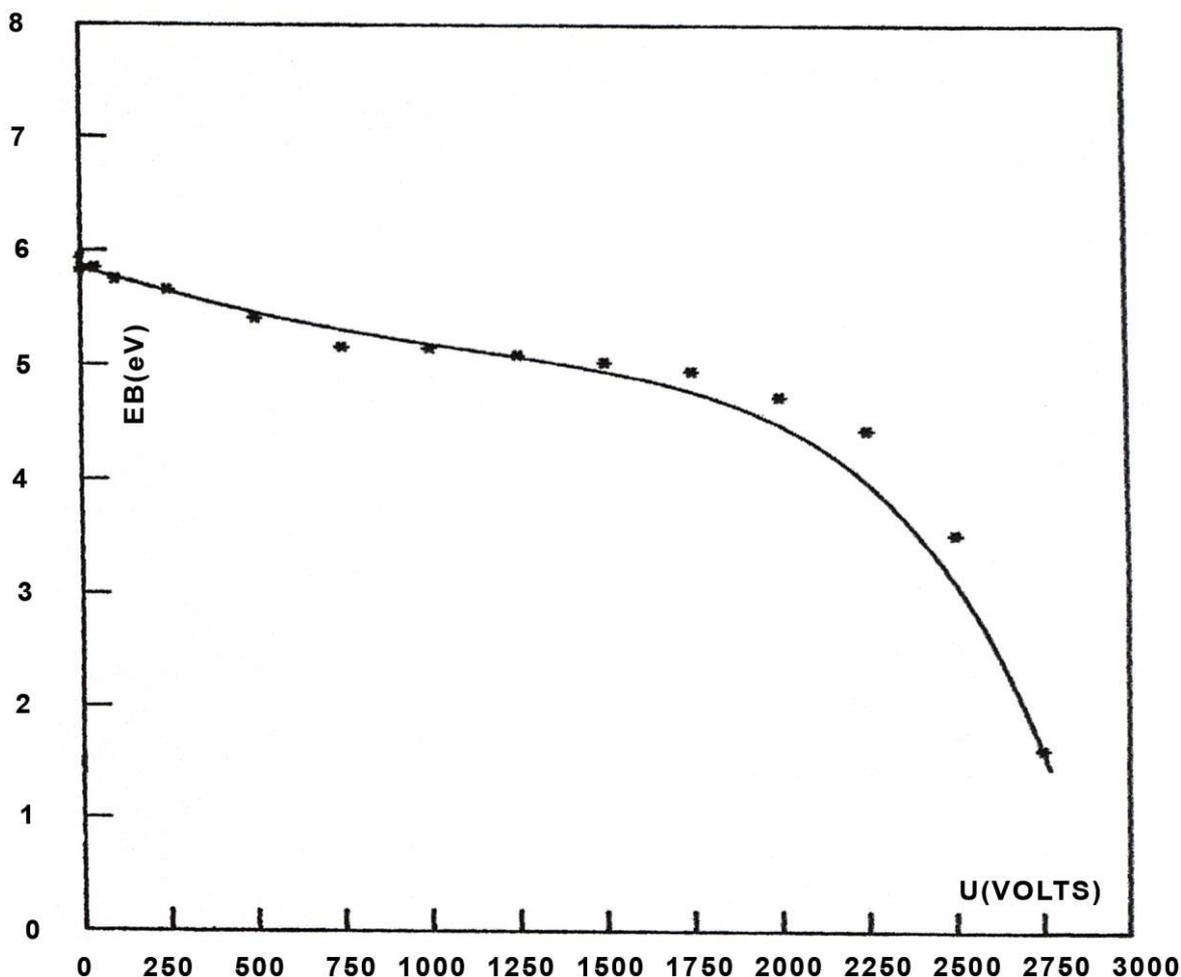


Fig. IV-27 : Energie d'activation en fonction de la tension

Au-dessus d'une certaine tension notée V_s , les électrons qui sont passés dans l'interface par activation thermique, entrent dans la bande de conduction du grain de ZnO voisin avec une énergie suffisante pour exciter les électrons de la bande de valence. Il se crée alors des trous lorsque le bas de la bande de conduction est plus bas que le haut de la bande de valence.

La durée de la vie des trous est assez importante, la recombinaison avec d'autres porteurs se fait très lentement, donc la forte non linéarité observée sur les caractéristiques $J(V)$ est due à un amincissement de la barrière, d'où un effet tunnel important, puisque celui-ci est proportionnel à la largeur de la barrière.

Après une polarisation en continue de l'échantillon, la dégradation se traduit par une déformation asymétrique de la caractéristique fig. VI-28 le champ électrique de polarisation est de 180 V/mm pour une température de 100°C, la durée de l'opération est d'environ 600 heures. Dans le cas d'une polarisation en alternatif, on obtient une variation symétrique fig. VI-29 pour un champ de 180 V_{eff}/mm et $T = 100^\circ C$.

La figure IV-30 montre la variation de la capacité en fonction de la tension, avant et après polarisation en tension alternative.

IV-7 Interprétations des résultats :

Nous avons vu au paragraphe précédent que la conduction dans les varistances était gouvernée par la hauteur des barrières de Schottky situées au joint de grains.

Une variation des caractéristiques $I(V)$ proviendrait d'une modification de ces barrières.

Comme la caractéristique $I(V)$, la capacité d'une varistance est liée d'une part à la hauteur de la barrière de Schottky, d'autre part aux propriétés physiques de la couche intergranulaire riche en Bi_2O_3 . En effet l'expression de cette grandeur est donnée par la relation :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_B - V)}{q \epsilon N_d} \quad (IV-4)$$

Un tracé de $1/C^2 (U)$ fig. IV-31 permet la détermination de la hauteur de barrière dans notre cas $V_B = 0,6$ pour un échantillon avant dégradation, en prenant $\epsilon = 10$, $N_d = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$, et $V_b = 0,3 \text{ eV}$ après dégradation.

L'analyse de résultats expérimentaux $I(V)$, $C(V)$ similaires à ceux qui viennent d'être présentés, et des courants stimulés thermiquement ont montré que la déformation des barrières est due à une migration d'ions.

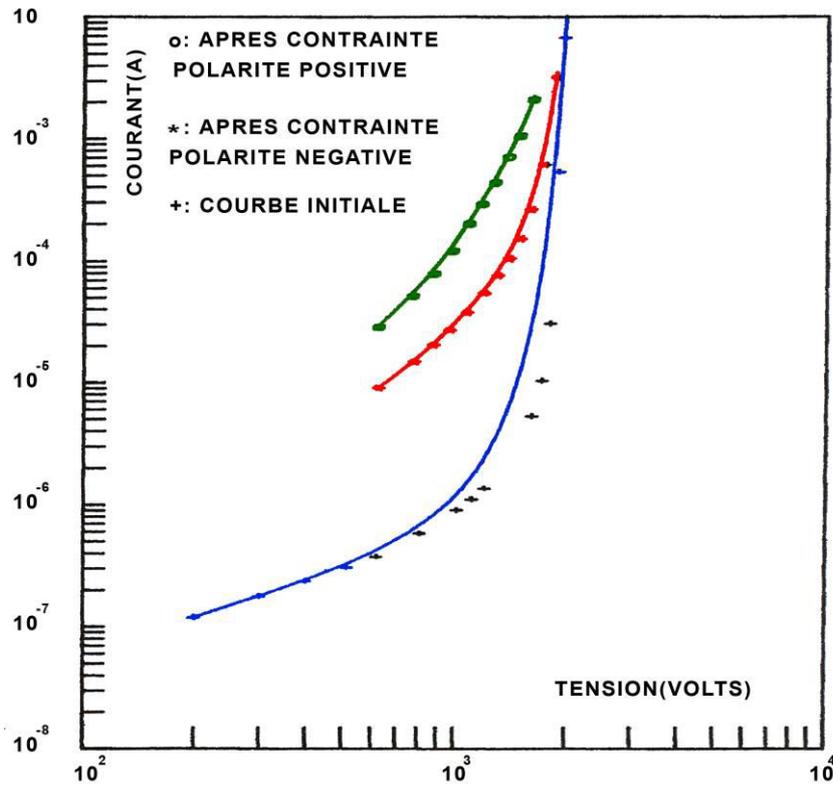


Fig. IV-28 : Caractéristique courant tension avant et après polarisation continue

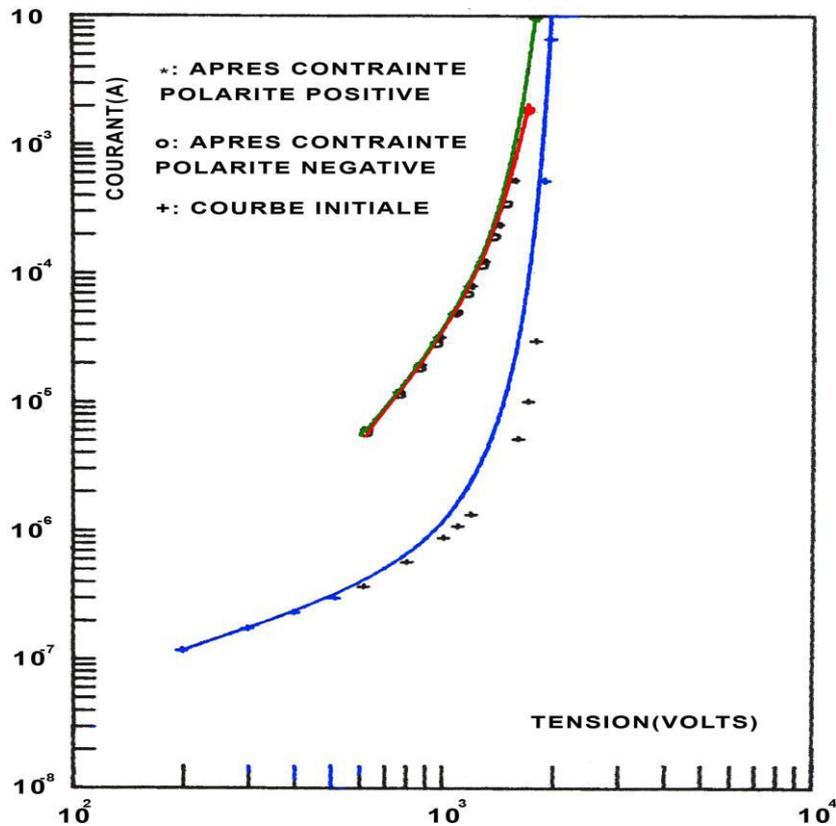


Fig. IV-29 : Caractéristique courant-tension avant et après polarisation sinusoïdale

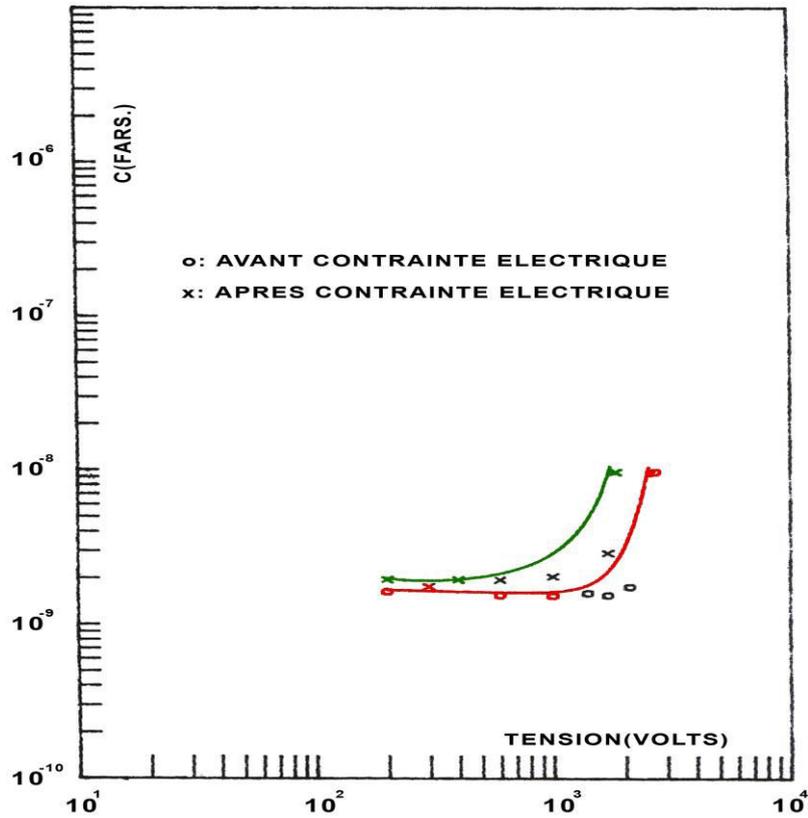


Fig. IV-30 : Evolution de la capacité en fonction de la tension

IV-7-1 Polarisation continue

L'ampleur de la modification de la caractéristique $I(V)$ après polarisation continue, dépend de la quantité de charge déterminée lors de CST. Après cette mesure lorsque les charges piégées ont été libérées, les caractéristiques $I(V)$ retrouve sa valeur initiale. L'origine de ces charges peut être : les électrons piégés, les dipôles orientés et la migration d'ions.

Les électrons piégés ne sont vraisemblablement pas à l'origine de la déformation de la barrière parce qu'il est difficile d'admettre une modification continue de $I(V)$ pour des temps inférieurs à 500 heures, d'autre part l'énergie d'activation qui dépend du niveau des pièges et mesurée sur les CST ne devrait pas changer avec le temps de polarisation comme on l'observe expérimentalement.

Les dipôles orientés, non plus ne doivent pas intervenir dans la modification de la hauteur car si c'était le cas, la croissance de la courbe $I(V)$ dans le sens de la

polarisation devrait être égale à la décroissance de cette même caractéristique en sens inverse.

Dans le premier cas, la migration d'ions se ferait par diffusion dans la couche intergranulaire ou dans la zone de désertion, dans l'autre cas il y aurait absorption d'ions tels que l'oxygène pendant la polarisation, ces ions d'oxygène se trouvant piégés à l'interface.

Des mesures de courant ont permis d'écarter la deuxième hypothèse car il n'y a pas modification de la quantité de charges piégées, que l'échantillon soit polarisé dans l'air ou dans l'azote. En conséquence la dégradation est uniquement due à une migration d'ions par diffusion.

L'expression de la hauteur de barrière est donnée, par la relation

$$V_B = \frac{e^2 N_s^2}{2 \epsilon_0 \epsilon N_d} \quad (IV-5)$$

Les différents paramètres figurant dans cette relation ont été définis dans la partie relative au mécanisme de conduction.

Le rôle des pièges dans la zone intergranulaire riche en $Bi_2 O_3$ est similaire aux états de surface.

L'équation ci-dessus montre qu'une décroissance de la barrière Fig. VI-32 est due soit à une diminution de N_s ou de charges négatives à l'interface, soit à une croissance de la concentration de donneurs (N_d) ou de charges positives dans la zone de désertion.

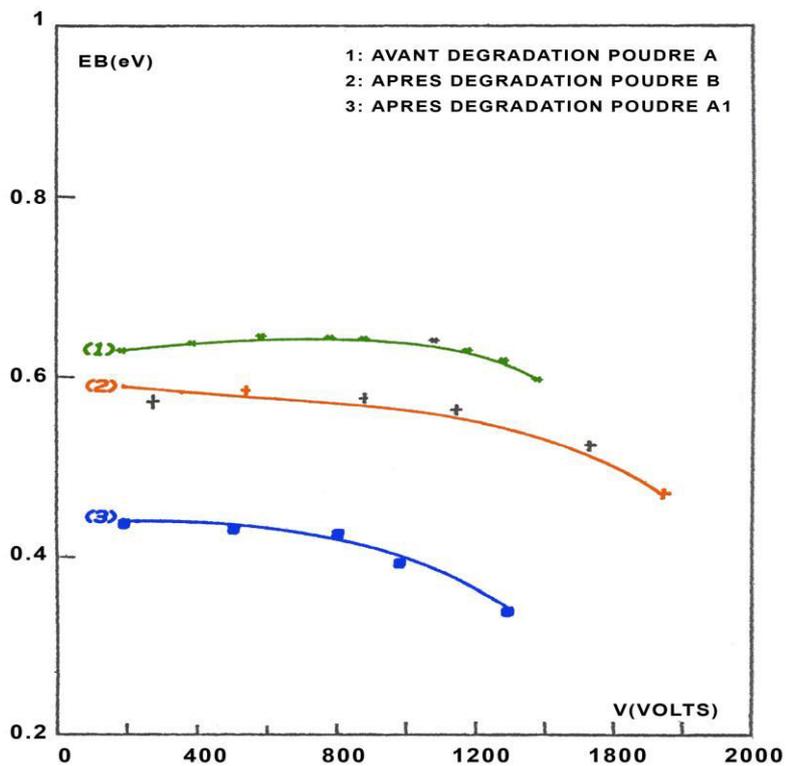


Fig. IV-31: Variation de l'énergie d'activation en fonction de la tension

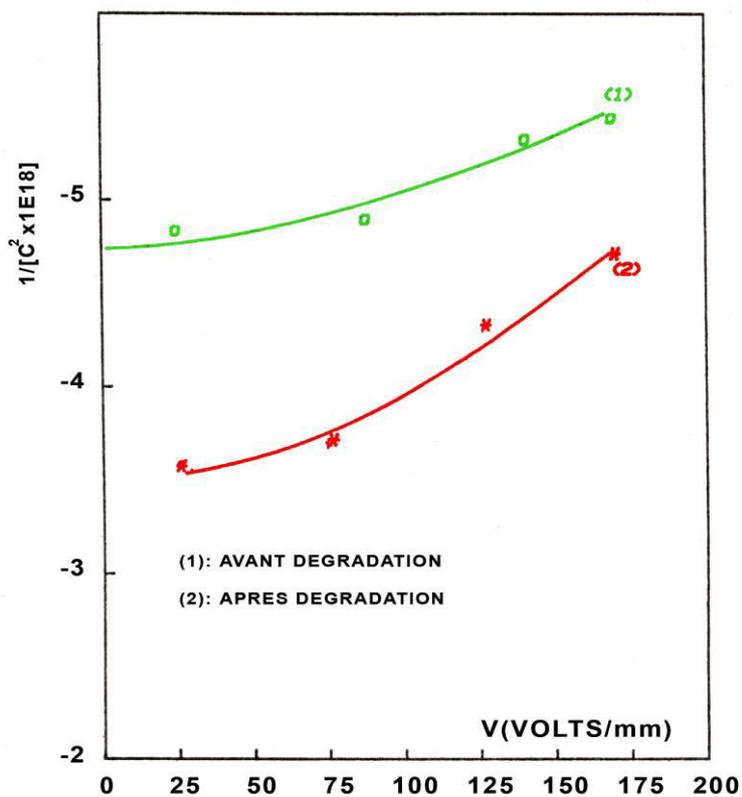


Fig. IV-32 : Variation de l'inverse de la capacité en fonction de la tension

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Depuis plusieurs années, les travaux effectués sur les varistances avaient pour but d'élucider les mécanismes de conduction dans ces composants et d'améliorer leur tenue énergétique aux diverses contraintes qu'ils peuvent subir. Plusieurs modèles, essayant d'expliquer le mécanisme de conduction des varistances ZnO, ont été développés par les chercheurs. C'est d'ailleurs le domaine de recherche, concernant les varistances, où il y a eu le plus d'investigations. Malgré cela, il n'existe pas encore un modèle qui puisse répondre à toutes les questions posées. Une de ces questions est ; pourquoi l'effet varistance reste lié à la polycristallinité des varistances.

Tous ces modèles n'ont pas pu faire, ni relation concernant les détails de la structure du joint de grains, ni prédiction des effets du changement dans la formulation ou du procédé de fabrication, par rapport aux propriétés électriques de la varistance.

Jusqu'à présent, le mécanisme de conduction dans les varistances ZnO n'est pas encore très clair. Cependant pour résumer, on peut dire que lorsque la tension est inférieure à la tension de seuil, il est admis par tous, que c'est l'effet thermoélectrique qui rend compte des phénomènes de conduction. Par contre, lorsque la tension atteint ou dépasse la tension de seuil, l'existence d'un effet Tunnel et plus au moins admis. Alors, l'intervention des porteurs minoritaires devient indispensable. Néanmoins, il reste à s'accorder sur la manière de création de tous ces trous.

Les performances électriques, la facilité d'implantation et le faible coût des parafoudres à base d'oxyde de zinc expliquent l'intérêt croissant dont ils font l'objet de la part des distributeurs d'énergie électrique HT pour se protéger contre les surtensions. De plus, pour améliorer la qualité de service, on assiste actuellement à la généralisation de l'emploi de ces parafoudres dans les réseaux électriques.

Un des problèmes majeurs qui se pose à l'utilisation de ces composants est leur échauffement lors du fonctionnement qui, dans le cas d'un dimensionnement mal établi, peut conduire à l'échauffement thermique, en particulier, à la suite des contraintes excessives.

L'objet de cette étude est de suivre le comportement thermique et d'analyser les effets des divers paramètres de fabrication (géométrie, additifs) et d'utilisation (tension nominale, température ambiante, énergie de chocs).

En dépit de quelques hypothèses simplificatrices (matériau supposé homogène, isolation thermique du côté des électrodes, gradient de potentiel le long de la varistance négligé), l'étude montre qu'il est possible de prévoir le comportement thermique d'une varistance avec une bonne approximation pour les deux méthodes utilisées.

La méthode de pulvérisation, nous a conduit à la définition d'une composition de poudre donnant une stabilité et une durée de vie répondant de manière satisfaisante aux des utilisateurs.

Le tracé de l'évolution du courant de fuite, de la tension de seuil et du coefficient de non-linéarité tout au long du vieillissement accélérer nous a permis de déterminer les contraintes maximales des échantillons fabriqués à partir de cette composition.

Pour une durée de vie supérieure à 120 ans, à la température de 45°C, les valeurs maximales des contraintes sont :

- En tension alternative (valeur efficace), $0,55U_s$.
- En tension continu, $0,8U_s$.

Pour ces valeurs, le courant de fuite reste stable au cours du temps et la puissance dissipée de l'ordre de quelques mW sont insuffisants pour provoquer un emballement thermique. De plus, la dérive du coefficient de non-linéarité α et de U_s restant faible, nos échantillons conservent toutes leurs efficacités pour la protection contre les surtensions.

Les essais en chocs avec des ondes 8/20 μ s à 10 KV et avec des ondes 4/10 μ s à 65 KV n'entraînent pas de dégradation importante de nos échantillons. Il conviendrait, cependant, en complément à ce travail d'effectuer des tests en ondes de longue durée qui sont vraisemblablement plus destructrices que les ondes courtes.

En perspective et en vue d'améliorer globalement le comportement thermique des varistances, nous proposons :

- D'étudier l'effet du revêtement pour la mesure des constantes de temps de refroidissement après un échauffement consécutif à un choc de longue durée.
- D'étudier le mécanisme de dégradation, résultant d'une contrainte permanente.
- D'étudier l'influence et les différents types des espaceurs métalliques pour la dissipation de l'énergie dans les varistances.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- (01) Type et origine des surtensions, Technique de l'ingénieur 6-39.
- (02) C. GARY, A. BOILLOT, H. GIGOT, « Lignes et postes: choix et coordination des isolements », Technique de l'ingénieur 6-1993-D670-671.
- (03) M. SERRANO SERVIN, « Etude du comportement électrique et thermique des parafoudres à ZnO », thèse à l'école centrale de Lyon, 1998.
- (04) La foudre : « la comprendre pour s'en protéger », SOULE/TECHNO-NATHAN.
- (05) C. GARY ? « Les connaissances actuelles sur la foudre et les phénomènes orageux », Journée d'étude SEE (Gif-sur-Yvette), 27/05/1998.
- (06) M. GAIN, « Surtensions sur les réseaux HT, » Les surtensions sur les réseaux de distribution, GSTE4ET5 -1999.
- (07) S. TOMINAGA, K. AZUMI, Y. SHIBUYA, M. IMATAKI, Y. FUJIWARA, S. NICHIDA, « Protective performance of metal oxide surge arrested based on the dynamic V-I characteristics », IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, vol. PAS-98? N°6, Nov. 1999.
- (08) C. LEDOUX, «Appareils de protection contre les surtensions», Technique de l'ingénieur, D670.
- (09) G. BOELLMANN, « Protection rationnelle contre les surtensions atmosphériques des postes de transformation HT/ MT des réseaux de distribution », Journée SEE Gif-sur-Yvette, Mai 1998.
- (10) G. PENCHENAT, « Contribution à l'étude de dispositifs de protection à base de varistances à oxyde de zinc et d'éclateurs », CNAM, 1998.

- (11) B. THOREN, « Insulation co-ordination for system voltages of 800 KV, ASEA Power Transmission and Distribution Division Technical Department, Sweden, 8-1996.
- (12) Guide Pratique N° 1 "La protection des installations électriques contre la Foudre, Merlin Gerin, Grenoble, 1995.
- (13) J.ROUSSEAU, I. HENNIBIQUE, « Parafoudres, Réseaux électriques, Techniques de l'ingénieur D 4 405, p.1-12, 1997.
- (14) S. K. CHAKRAVARTHY, C.V. NAYAR, "Parallel (quasi-periodic) ferroresonant oscillations in electrical power systems", IEEE Trans. On Circuits and Systems, Vol.42, N° 9 September 1995.
- (15) Norme CEI 99-4, Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif, Commission électrotechnique internationale, 1996.
- (16) A. MAYER, R.ROUDOLPH, « Des parafoudres sans éclateurs rendent possible une protection optimale contre les surtensions », Revue Brown Boveri, 12-95, p.576-585 1995.
- (17) E.C.SAKSHAUG, J.KRESGE, "A new concept in station arrested design", IEEE Trans. On Power Apparatus and systems, Vol. PAS -96, N° 2, p.647-656 April 1997
- (18) Guide pratique N°1, La protection des installations électrique contre la foudre, Merlin Gerin 1995.
- (19) SHIM .C.H. et col ; Influence des parafoudres à oxyde métallique sur les surtensions De manœuvre dans les réseaux à très haute tension .CIGRE-Rapport 33-03.1992.

- (20) Norme CEI-151. Surtensions et coordination de l'isolement, commission Electrotechnique Internationale. Décembre 1992.
- (21) Norme CEI-168 La foudre et les installations électrique haute tension, Commission Electrotechnique Internationale. Juillet 1993.
- (22) Norme CEI-179 Surtensions et parafoudres en BT. Coordination de l'isolement en BT, Commission Electrotechnique Internationale. Septembre 1995.
- (23) A.FAMKKAR, A.BUI, A. LOUBIERE, G. PENCHENAT, "Modélisation thermique des varistances à base d'oxyde de zinc " R.G.E., janvier 1993, N°1,26-30.
- (24) R. SLADEK, " Frittage des composants électroniques passifs en céramique" L'industrie céramique, 789,12-1994.
- (25) J. HLADIK, "Métrologie des propriété thermo physiques des matériaux ", Masson, HERMANN ,1988.
- (26) E.OLSSON, G.L. DUNLOP, R. OSTERLUND, "Développement of functional microstructure during sintering of a ZnO varistor material", J. Am. Cer. Soc, 76, N°1, 65-71, (1995).
- (27) A. KHEDIM, « Vieillissement des varistances à base d'oxyde de zinc soumises à des décharges partielles dans l'hexafluorure de soufre », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, N°. D'ordre : 1173, Toulouse, 1992.
- (28) M.R. MESHKATODDINI, A. LOUBIERE, A. BUI, »Realisation of an oil-immersed ZnO-based surge ", PSC 95? 10th International Power System Conférence, Tehran, Iran, November 1995.
- (29) S. DINCULESCU, " Etude du champ électrique autour d'une varistance ZnO en fonction de la géométrie des électrodes" Laboratoire de génie électrique, Université Paul Sabatier, Toulouse 1995.

- (30) A. BUI, M.M.MESHKATODDINI, " Degradation study of oil-immersed ZnO based varistors", MEPCOM -96? Fourth Middle East Power Systems Conference, Assiut, Egypt, January 1996.
- (31) J.IEDLER, G. SCHONER, I.BARDI, " Flashover conditions for ZnO – varistors by FEM-analysis", Ninth International Symposium on high voltage engineering, Graz Convention Center, Austria, p. 8455 1-4, august 1995.
- (32) M.R. MESHKATODDINI, A.LOUBIERE, A.BUI," Thermal behaviour of ZnO-based varistors in oil and, under alternative voltage", Eletroceramics V, International Conference on Electronic Ceramics et applications", Aveiro, Portugal, Vol. 2, p 511-514, july 1996.
- (33) R.METZ, C.ELKHATIB, M.MACHADO, jj.counioux, D.DELALU, AL.ABDULLAH.K," Thermal stability of intermediate compounds during sintering of ZnO varistors" Silicates industriels, vol.66,N°. 1-2, p. 15-22, 2001.
- (34) R.METZ, C.MACHADO, M.HASSANZADEH, and R.PUYANE," Direct oxidation of bismuth and zinc powder «Journal of Electroceramics, vol. 13, p.825-827. 2004.
- (35) IEEE Guide for the application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-current systems, IEEE STD C62. 22-1997.
- (36) A.I. IBRAHIM, H.W. DOMMEL, " A knowledge base for switching surge transient ", International conference on power system transients, IPST Montréal Canada 2005.
- (37) R.DAVID, CLARKE," Varistor Ceramics " J.AM. Cerami,Soc, 82 (3) p. 485-502. 1999.
- (38) MATTIAS Elfving. " Nanoscale characterisation of barriers to electron conduction in ZnO varistor materiels ", PHD Thesis, Uppsala university, Sweden 2002.

- (39) ANDERS Larsson. " A Low voltage varistor module for use within ATP-EMTP simulation ", EEUG News, N4, vol 3 , European ATP-EMTP User Group, November 1997.
- (40) Se-Won Han, Jin-Liang HE, Han-Goo CHO, You-Ping TU, Rong ZENG: " Influence of chromium additive on electrical characteristics of ZnO varistor ", Proceedings of the 6th international conference on properties and application of dielectric materials, June 21-26/ 2000 China.
- (41) R. DIAZ, F. FERNANDEZ, J. SILVA : " Simulation and tests on surge arresters in high voltage laboratory ", IPST 2001.
- (42) M.R.MESHKATODDINI, " Etude du comportement de longue-durée des varistances ZnO dans l'huile minérale, application au vieillissement thermique et électrique de la varistances et de l'huile ", Université de Toulouse, 19 et 20 mars 1996.
- (43) A. FAKKAR , " Contribution à l'étude du comportement thermique des varistances à base d'oxyde de zinc : Simulations et mesures, application aux parafoudres HT " Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 1994.
- (44) M.R. MESHKATODDINI, A. LOUBIERE, A. BUI, " Ageing study of the mineral oil with ZnO-based varistors ", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, Proceeding p. 502-504, June 1996.
- (45) M.R. MESHKATODDINI, " Etude des comportements thermique et électrique des varistances ZnO dans l'huile de transformateur ", Lyon, Recueil des articles, p.44-47, Avril 1996.
- (46) A.BAYADI, N.HARID, K.ZEHAR, S.BELKHIAT: " Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behaviour under fast transients ", IPST, New Orleans, USA, 2003.

- (47) J.A. MARTINEZ, D.W. DURBAK: " Parameter Determination for modelling Systems Transients-Part V : Surge Arresters ", IEEE Transaction on power delivery, Vol. 20, N°3, July 2005.
- (48) P. PINCETI, M. GIANNETTONI : " A simplified model for zinc oxide surge arresters ", IEEE Transaction on power delivery, Vol.14, N°2, April 1999.
- (49) M.C. MAGRO, M. GIANNETTONI, P. PINCETI : " Validation of ZnO surge arrester model for overvoltages studies ", IEEE Transactions on power delivery, Vol.19, N°4, October 2004.
- (50) M. HOUABES, " Contribution à l'étude du rôle de l'oxyde de l'aluminium pour l'amélioration des caractéristiques électriques des parafoudres à varistances ZnO " Doctorat d'état, Annaba 2005.
- (51) M. ADJABI, T. BAHI, " Vieillissement des varistances à base d'oxyde de zinc " ICEL 98, USTORAN, 5-7 octobre 1998.
- (52) C.TALHI, H. NGUYEN, M. HOUABES, BUI AI, " Praseodim oxide effect on the electrical properties of zinc oxide-based Varistors " VI International Symposium on lightning protection proceedings IEEE 200-203, 2001.
- (53) J.M. LAFFAARGUE, " Caractérisation de la dégradation des varistances à base d'oxyde de zinc par la spectroscopie d'impédance ", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, N°. 2013, 1995.
- (54) JINLAING HE, RONG ZENG, SHUIMING CHEN, YOUPING TU: " thermal characteristics of high voltage Whole-Solid-insulated Polymeric ZnO Surge Arrester ", IEEE Transactions on power delivery, Vol.18, N°.4, October 2003.
- (55) JINLIANG HE, R.ZENG, Q.CHEN, Z.GUAN, H.G. CHO : " Nonuniformity of electrical characteristics in microstructure of ZnO surge varistors ", IEEE Transaction on power delivery Vol.19, January 2004.

- (56) W.M. BARSOU: Fundamentals of ceramics, Institute of physics publishing Bristol and Philadelphia 2003.
- (57) K.P. MARDIRA, T.K. SAHA, R.A. SUTTON: " Investigation of diagnostic techniques of metal oxide surge arrester ", IEEE Transactions on dielectric and electrical insulation, Vol.12, N°.1, February 2005.
- (58) M.BARTKOWIAK, M.G. COMBER, G.D. MAHAN: " influence of nonuniformity of ZnO varistors on their energie absorption capability ", IEEE Transaction on power delivery Vol.16, N°4, October 2001.
- (59) M.BARTKOWIAK, M.G. COMBER, G.D. MAHAN: " Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors". IEEE Transactions on power delivery, Vol.14, N°.1 January 1999.
- (60) F.A. MODINE " Varistor electrical properties: Microstructural effects ", Encyclopedia of materials: Science and Technology, pp 9508-9513, 2001.
- (61) D.BINESTI, " Les varistances à base d'oxyde de zinc : épreuves de vieillissement et de dégradation " thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 1995.
- (62) A.SEDKY, M.ABU-ABDEEN, ABDELAZIZ.A, ALMULHEM : " Nonlinear I-V characteristics in doped ZnO based-ceramic varistor ", Physica B, J.Physb. 06.149. 2006.
- (63) D.PRISCHING, A.H.PECINA " Temperature behaviour of ZnO varistor before and after post sintering heat treatment ", Material letters 43, 295-302, 2000.
- (64) NGUYEN HUU , A.BUI, A. LOUBIERE: " La tenue aux ondes de chocs des varistances ZnO à haut champ de seuil", J.Phys. D : Appli.phys.28 p 1723-1728, 1995.

- (65) H.T. NGUYEN, " Varistances à base d'oxyde de zinc à champ de seuil élevé ", Th. Doc. Université de Toulouse 1995.
- (66) M. HOUABES, C. TALHI, BUI AI, " Effet de l'oxyde d'antimoine sur les varistances ZnO utilisées dans les parafoudres HT. " 2^{ième} Conf. Nat. Sur la HT. CNHT Tizi-ouzou 1997.
- (67) S.W. HAN, H.B. KANG, K.C KO, H.S. KIM, " The microstructure and conduction mechanism of the nonlinear ZnO Varistor " Proc. 5th Inter. Conf. On Prop. And Appl. Of Diel. Seoul, Koréa, p.867-870, 1997.
- (68) J. HAN, P. Q. MANTAS, A.M.R. SENOS, "Densification and grain growth of Al-doped ZnO ", J.Mater. Res, p 459-468. 2001.
- (69) M. HOUABES, A. BUI, " Influence de la temperature de frittage sur les propriétés électriques des varistances ZnO ". Synthèse N°10 p.248-253 juin 2001.
- (70) I.SKURAOTVSKY, A. GLOT, E. TRAVERSA " Modelling of the humidity effect on the barrier height in SnO₂ varistors" , Materials Science and Engineering B 128 p 130-137, 2006.
- (71) M.BARTKOWIAK " Current localization, non-uniform heating, and failures of ZnO varistors ", Meeting of the materials research society, Boston, MA, December 1-5, 1997.
- (72) E. GUEDES da COSTA, S.R. NAIDU, A. GUEDES de LIMA : " Transm Distrib. Vol.148, N°1, January 2001.
- (73) JEAN MARIE. HAUSSONNE, " Céramiques pour l'électronique et l'électrotechnique, Presses polytechniques et universitaires Romandes 2002.
- (74) M. A. ALIM, S. LI., F. LIU, P. CHENG : " Electrical barriers in the ZnO varistor grain boundaries " phys. Stat. sol .203, N°.2, 410-427 .2006.

(75) Z. ZHENG, S. NISHIWAKI, S. BOGGS, " Effects of heat sinks in metal-oxide surge arresters on ZnO element power delivery Vol.20, N°2. April 2005.

(76) GORDON PIKE : " Brekdown in ZnO varistors by high power electrical pulses", Sandia National Laboratory SAND 2001-2160, July 2001.

(77) MARIU GRUNDMANN, the physics of Semicondutors, Springer 2006.

(78) H. WANG, M. BARTKOWIAK, F.A. MODINE, G.D. MAHAN: " Non uniforme heating in zinc oxide varistors studies by infrared imaging and computer simulation ", J.Am.Ceram.Soc, Vol.81, 2013-32, 1998.