Capacité d'absorption de l'énergie des varistances ZnO pour parafoudres HT

Miloud Kachi [1], Mourad Houabes [2]

[1] Laboratoire de génie électrique LGEG, Université de Guelma, Algérie
[2] Dep. Electrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie

E-mail : [1] kachi.karim@gmail.com [2] houabes@yahoo.fr

Résumé—**Dans ce travail nous déterminons l'allure de variation de la capacité d'absorption de l'énergie des varistances ZnO pour les parafoudres MT et HT. Le comportement électrique, thermique et mécanique a été simulé à travers un simple modèle qui tient en compte l'échauffement non uniforme ainsi que la dépendance de la température de la caractéristique I(V). L'évolution dans le temps de la température et des contraintes, issue de la solution de l'équation de chaleur, permet de déterminer le temps de défaillance de la varistance et par conséquent le calcul de sa capacité d'absorption de l'énergie. La défaillance de la varistance est considérée dans ce cas comme la conséquence des trois phénomènes : emballement thermique, perforation et craquement. Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats publiés dans la littérature.**

Mots clés—**Varistance ZnO, Capacité d'absorption, Modèle thermoélectrique, Modes de défaillance.**

I. INTRODUCTION

Les varistances à base d'oxyde de zinc sont des céramiques polycristallines obtenues par frittage du ZnO mélangé avec d'autres oxydes additifs de faibles quantités. La caractéristique I(V) résultante est fortement non linéaire. Aux faibles valeurs de la tension (champ) la varistance impose une forte résistivité au passage du courant ($\rho_s = 10^{10}$- 10^{12} Ωcm [1]), permettant ainsi la réalisation de parafoudre sans éclateurs avec des caractéristiques remarquables. Les parafoudres à varistances ZnO sont actuellement les plus utilisés pour la protection des réseaux et des appareils électriques contre les surtensions. Leur fonctionnement consiste à réduire l'amplitude de la surtension par écrêtement en dissipant l'énergie associée sous forme de chaleur. Donc la capacité d'absorption de l'énergie est une caractéristique d'importance capitale. Elle est définie comme étant l'énergie que la varistance (parafoudre) est capable d'absorber avant sa destruction [2, 3].

La destruction de la varistance peut être due essentiellement à trois phénomènes : emballement thermique perforation et craquement [2]. L'emballement thermique résulte globalement du déséquilibre entre la puissance perdue par effet joule et la puissance évacuée vers l'extérieur sous forme de chaleur. En effet, l'augmentation de la température entraîne celle du courant de fuite et donc des pertes. Lorsque la température de la varistance dépasse la température limite de stabilité les pertes joule deviennent supérieures à la quantité de puissance évacuée et le phénomène est enclenché. La perforation du matériau, résultant de la fusion locale due à l'échauffement non uniforme, se traduit par de petits trous d'environ 20µm de diamètre et qui peuvent s'étendre le long du bloc [2, 4]. L'échauffement non uniforme entraîne également le développement des contraintes thermiques qui, lorsqu'ils sont assez intenses, peuvent provoquer le craquement du bloc varistance [2, 3].La non uniformité du matériau qui se présente comme la cause d'apparition des phénomènes de perforation et de craquement apparaît sur plusieurs niveaux : microscopique, intermédiaire et macroscopique [2, 5]. Les causes de la non uniformité du matériau sont diverses, dépendant naturellement de la composition et du processus de fabrication du matériau. A l'échelle microscopique la non uniformité est due à la variation statistique de la taille des grains constituant le matériau [5, 6, 7]. Au niveau macroscopique la non uniformité apparaît suite au mauvais processus de fabrication (pressage, frittage …etc.) [5]. Lors de fonctionnement sur la zone non linéaire de la caractéristique I(V) le courant tend à se concentrer sur des chemins préférentiels, ayant une fiable impédance, entraînant par conséquent l'échauffement non uniforme du bloc [1, 6].

La capacité d'absorption de l'énergie des varistances ZnO varie de manière complexe en fonction de l'amplitude du courant et de sa durée. Initialement la capacité d'absorption diminue avec l'augmentation du courant, mais lors de courants intenses avec de courtes durées la capacité d'absorption augmente de nouveau.

II. MODELISATION DE LA VARISTANCE

A. Transfert de chaleur

La varistance est considérée à symétrie cylindrique de hauteur L et de rayon R. Le transfert de chaleur est supposé radial étant donné que la composante axiale est généralement négligée [2, 8]. Dans ce cas l'équation de chaleur prend la forme [9]

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+P(r,t)=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (1)$$

Où k : conductivité thermique (5.69 W/m°C [8])
ρ: densité du matériau (500kg/m^3).
cp: chaleur massique (5500 J/kg°C).
T : température en °C.

Les pertes joule P(r,t) sont distribuée suivant le rayon et variable dans le temps. L'échange de chaleur avec le milieu environnant se fait par convection et par radiation. La linéarisation de la composante radiative permet de mettre les conditions aux limites sous la forme [9, 10]

$$-k\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R}=S\left(h_c+4\sigma\varepsilon T_a^3\right)\left(T_s-T_a\right) \qquad (2)$$

Avec R le rayon, S surface latérale, σ constante de Stefan-Boltzmann (5.67.10^{-8} W m^{-2} °K^{-4}), ε facteur d'émission de surface (≈0.8), T_s température à la surface du bloc, T_a température ambiante égale à 20°C durant la simulation. Dans ces conditions la solution de (1) par la méthode de différence finie d'après [10] est comme suit

$$X_n^{i+1}=X_n^i+C_1\left[nX_{n+1}^i-\left(2n-1\right)X_n^i+\left(n-1\right)X_{n-1}^i\right]+C_2Q_n^i \qquad (3)$$

Où X=T/T_a , $C_1=\frac{4\Delta t.k.m}{\rho.c_pR^2}$; $C_2=\frac{\Delta t}{\rho.c_pT_a}$, m et Δt, pas d'échantillonnage sur le rayon et sur le temps. Avec condition aux limites :

$$X_m^{i+1}=X_m^i+C_2.Q_m^i+\frac{4.m.\Delta t}{\rho.c_pR^2}\left[k\left(m-1\right)\left(X_{m-1}^i-X_m^i\right)-k_0T_a^{0.25}m\left(X_m^i-1\right)^{1.25}\right] \qquad (4)$$

B. Caractéristique I(V)

La caractéristique I(V) doit représenter naturellement la conduction non linéaire mais aussi l'effet de la température. La caractéristique I(V) est simulée par

$$J(E)=E.\left(\sigma_s(T)+0.5.\sigma_g.\left(1+\tanh\left(s\left(\frac{E}{E_s}-1\right)\right)\right)\right) \qquad (5)$$

$$\sigma_s(T)=\sigma_c\exp\left(\frac{\Phi_B}{k_B}\left(\frac{1}{Tc}-\frac{1}{T}\right)\right) \qquad (6)$$

Avec J densité de courant en A/m^2, E champ électrique aux bornes de la varistance en V/m, σ_s conductivité shunt en Ω^{-1} m^{-1}, σ_g conductivité des grains de ZnO (10^2 à 10^3 Ω^{-1} m^{-1} [1]), E_s champ de seuil pris égale à 1870 V/cm, s facteur tenant compte du degré de non linéarité, σ_c conductivité de la varistance à la température Tc (T et Tc en °K), k_B constante de Boltzmann, Φ_B énergie d'activation (≈0.8eV). Le système d'équation (5), (6), que nous proposons pour représenter la caractéristique I(V), présente l'avantage de tenir compte à la fois de l'effet de la température et des différentes grandeurs électriques et physiques du matériau. La caractéristique I(V) résultante pour différentes températures est donnée par la fig.1.

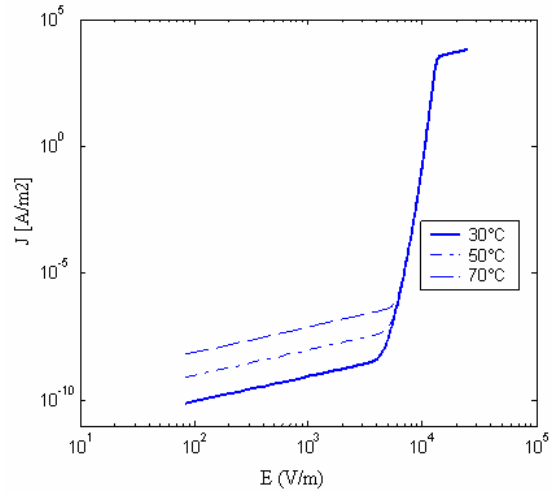

Fig.1. Caractéristique J(E) donnée par le modèle et sa dépendance en température.

La non uniformité de la varistance est prise en compte par l'introduction d'un filament qui s'étend axialement au centre de la varistance [2, 4]. Ce filament représente un chemin à faible impédance ayant un champ de seuil inférieur au champ de seuil de la varistance, typiquement de 5% [3]. La caractéristique I(V) globale de la varistance est

$$J_{moy}=\frac{2}{R^2}\left(\int_0^{R_f}rJ_f(E)dr+\int_{R_f}^{R}rJ(E)dr\right) \qquad (7)$$

Où J_{moy} la densité moyenne de courant, J_f densité de courant au filament, R_f rayon du filament.

C. Contraintes thermiques

La distribution spatiotemporelle de la température permet de calculer les contraintes thermiques résultantes de la distribution non uniforme de la température et d'identifier donc le phénomène de craquement. En effet les régions chaudes ont tendance à se dilater et d'autre part les régions les moins chaudes empêchent cette dilatation et ainsi des forces de compression et d'extension se développent. Si ces forces sont suffisamment intenses elles peuvent entraîner la fissuration et éventuellement le craquement du bloc. Pour une distribution radiale de la température les contraintes sont évaluées par [2] :

$$S_{rr}(r)=\frac{\gamma Y}{1-\nu}\left(\frac{1}{R^2}\int_0^R rT(r)dr-\frac{1}{r^2}\int_0^r rT(r)dr\right) \qquad (8)$$

$$S_{\theta\theta}(r)=\frac{\gamma Y}{1-\nu}\left(\frac{1}{R^2}\int_0^R rT(r)dr+\frac{1}{r^2}\int_0^r rT(r)dr-T(r)\right) \qquad (9)$$

$$S_{zz}(r)=S_{rr}(r)+S_{\theta\theta}(r) \qquad (10)$$

Avec S_{rr}, $S_{\theta\theta}$ et S_{zz} contraintes radiales, tangentielles et axiales respectivement. γ coefficient de dilatation thermique en unité par °K approximé par la relation empirique suivante :

$\gamma = \left(-b1 - b2T + b3\ln T\right).10^{-6}$, avec : b1=23.75, b2=3.76 10^{-3}, b3=5.11 et T en °K. Y = 11955 kg/mm^2, module de Young, ν = 0.25 rapport de Poisson du matériau.

Pour déterminer la capacité d'absorption de l'énergie avant le craquement de la varistance il est nécessaire de connaître la rigidité du matériau. En réalité c'est une grandeur statistique qui varie d'une varistance à une autre. Cependant une estimation de 10.5485 à 14.0646 kg/mm^2 pour les contraintes d'extension tangentielle et de 49.225 kg/mm^2 pour les contraintes de compression axiales a été donnée par [2].

D. Modes de défaillance

Pour une densité de courant moyenne donnée le champ résiduel est calculé à partir de (5). La connaissance du champ électrique, et pour une distribution de la température donnée, permet de calculer la distribution locale de la densité de courant et les pertes joule P=E.J. Ce ci permet alors de calculer la nouvelle distribution de la température à partir de (3) et (4) et par conséquent les contraintes résultantes à partir de (8), (9) et (10). Ce processus est répété le long du temps de simulation jusqu'à l'apparition de la défaillance. Les trois modes de défaillance sont considérés : le craquement, soit par compression ou par extension, lorsque la rigidité du matériau est atteinte, la perforation lorsque la température maximale du filament atteint 800°C qui est environ la température de fusion du bismuth [2, 4],
et l'emballement thermique lorsque la température moyenne de la varistance donnée par (11) atteint la température limite de stabilité thermique.

$$T_{moy} = \frac{2}{R^2}\int_0^R rT(r)dr \qquad (11)$$

La température limite de stabilité est déterminée à partir du diagramme d'équilibre thermique fig.2. Les températures limites de stabilité sont déterminées à partir de l'équilibre entre la puissance perdue par effet joule et la puissance évacuée vers le milieu ambiant sous forme de chaleur. De la fig.2 il apparaît que 190°C est une valeur représentative de la température limite et par conséquent elle est adoptée pendant la simulation.
La capacité d'absorption de l'énergie est l'énergie par unité de volume calculée par l'expression

$$W = \int_0^{t_f} J_{moy}(t)\,E(t)dt \qquad (12)$$

Avec t_f temps de défaillance.

III. CRAQUEMENT EMBALLEMENT THERMIQUE ET PERFORATION

A. Distribution spatiale de la température, de la densité de courant et des contraintes.

Pour une varistance de dimensions R=1.6cm, L=4.5cm et rayon de filament R_f = 0.25cm soumise à une densité moyenne de courant de 1.67A/cm^2 pendant 45ms on représente

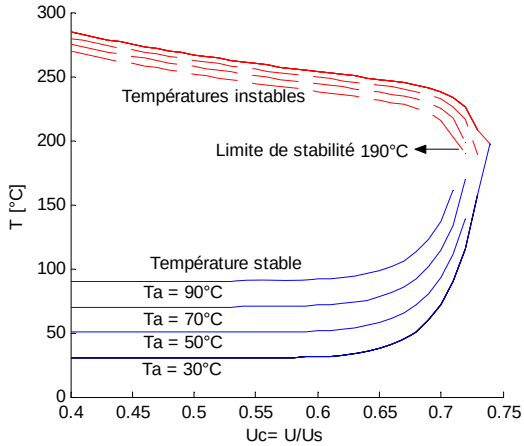

Fig.2. Température stable et instable issues du diagramme d'équilibre calculées pour plusieurs températures ambiantes (Ta), Uc rapport de la tension appliquée à la tension de seuil. 190°C est une valeur représentative de la température limite.

l'évolution dans le temps de la distribution de la température, la densité, et les contraintes sur les figs.3 et 4. Vu le court temps la température ne diffuse à travers tout le bloc et se localise au filament où elle entraîne l'augmentation de la densité de courant. Au filament la densité de courant dépasse 100 fois la densité de courant au reste du bloc. L'échauffement non uniforme de la varistance entraîne la dilatation des régions chaudes et par conséquent

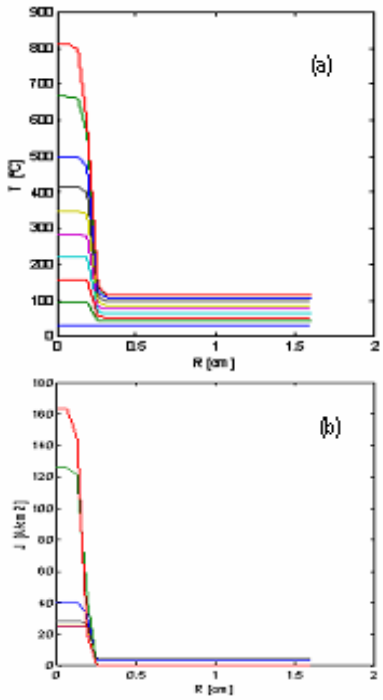

Fig.3. Distribution le long du rayon de la température et de la densité de courant pour J_{moy} = 1.67A/cm^2. La distribution est représentée à un intervalle de temps de 5ms.

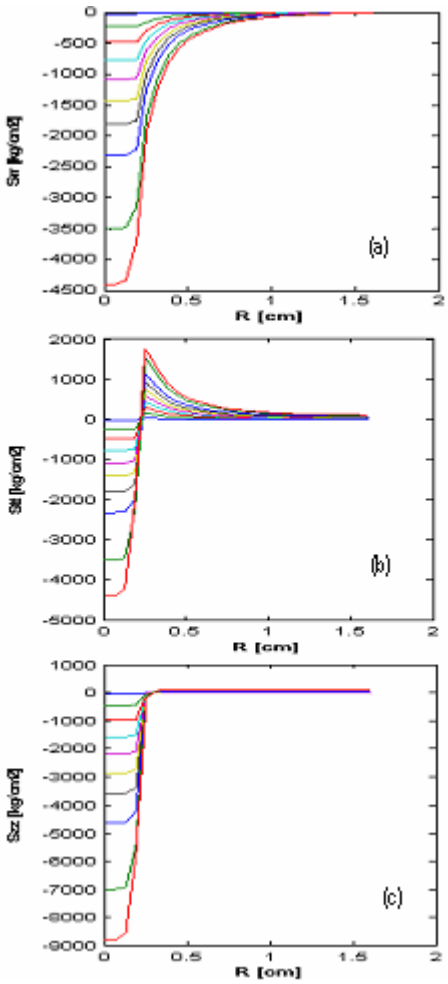

Fig.4. Distribution des contraintes le long du rayon (a) radiale, (b) tangentielle et (c) axiale pour J_{moy}= 1.67A/cm^2, profile tracé à un intervalle de 5ms.

le développement des contraintes sur les trois directions fig.4. Les contraintes négatives correspondent aux forces de nature compressive alors que les contraintes positives correspondent aux forces de nature extensive [2]. La fig.4 indiquent alors que le craquement par compression et par extension est possible. Lorsque les contraintes atteignent les valeurs limites de craquement données par la rigidité mécanique du matériau, 14.0646 kg/mm^2 pour les contraintes extensives et 49.225 kg/mm^2 pour les contraintes compressives, la varistance est considérée détruite par craquement. De la même manière lorsque la température moyenne atteint la température limite de stabilité 190°C la varistance est considérée détruite par emballement thermique. D'autre par la varistance est perforée lorsque la température au filament atteint 800°C.

La fig.5 montre l'évolution dans le temps de l'échauffement maximal au filament, moyen et minimal ainsi que les contraintes maximales sur les trois directions. On indique sur la figure le moment d'apparition de chaque mode de défaillance pour une densité de courant moyenne de 1.67A/cm^2. L'emballement thermique prend naissance après 40ms, alors que la perforation au filament à 800°C apparaît après environ 43ms mais avant ces deux modes le craquement par compression apparaît juste après 5ms ce qui veut dire que dans le cas de J_{moy} =1.67A/cm^2, R=1.6cm, Rhs=0.25cm la varistance est détruite par craquement après 5ms. Connaissant le moment d'apparition de chaque mode, ou temps de défaillance t_f, nous arrivons donc à définir la capacité d'absorption de l'énergie en terme de chaque mode en utilisant (12).

B. Capacité d'absorption de l'énergie

Sur la fig.6 nous représentons la capacité d'absorption de l'énergie en fonction de la densité de courant moyenne et en terme des trois modes de défaillance : emballement W_{th}, craquement W_{cr} et perforation W_p. De la fig.6.a on constate que la capacité d'absorption diminue pour les fiables valeurs de la densité de courant et n'est limité dans ce cas que par l'emballement thermique. A environ 500A/cm^2 le craquement apparaît pour limiter encore la capacité d'absorption à des valeurs un peu plus faibles jusqu'au grandes valeurs de la densité de courant (10^6A/cm^2) où l'emballement thermique revient le mode de défaillance dominant. En réduisant le degré de non uniformité F_p à 2.5% c'est-à-dire rendre la varistance plus uniforme fig.6.b on constate l'augmentation de la capacité d'absorption d'environ 44% relativement au cas précédent. Nous constatons également que dans ce cas seul le phénomène d'emballement thermique limite la capacité d'absorption pour toutes les valeurs de la densité de courant. En effet en rendant la varistance uniforme on réduit les contraintes et en conséquence la diminution de la probabilité d'apparition des phénomènes de craquement et de perforation. La fig.6.c représente le cas d'augmentation du rayon par rapport au premier cas. On constate la diminution de la capacité d'absorption et la dominance du phénomène de craquement, ce qui traduit alors l'augmentation des contraintes dans ce cas.

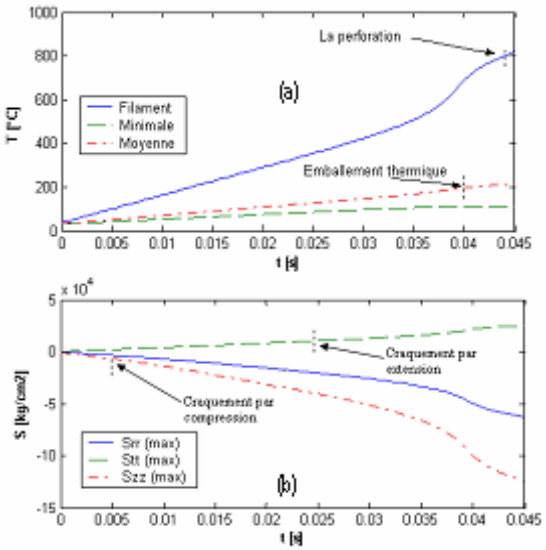

Fig.5. Evolution dans le temps de (a) échauffement maximale, minimal et moyen et (b) des contraintes maximale sur les trois directions pour J_{moy}=1.67A/cm^2

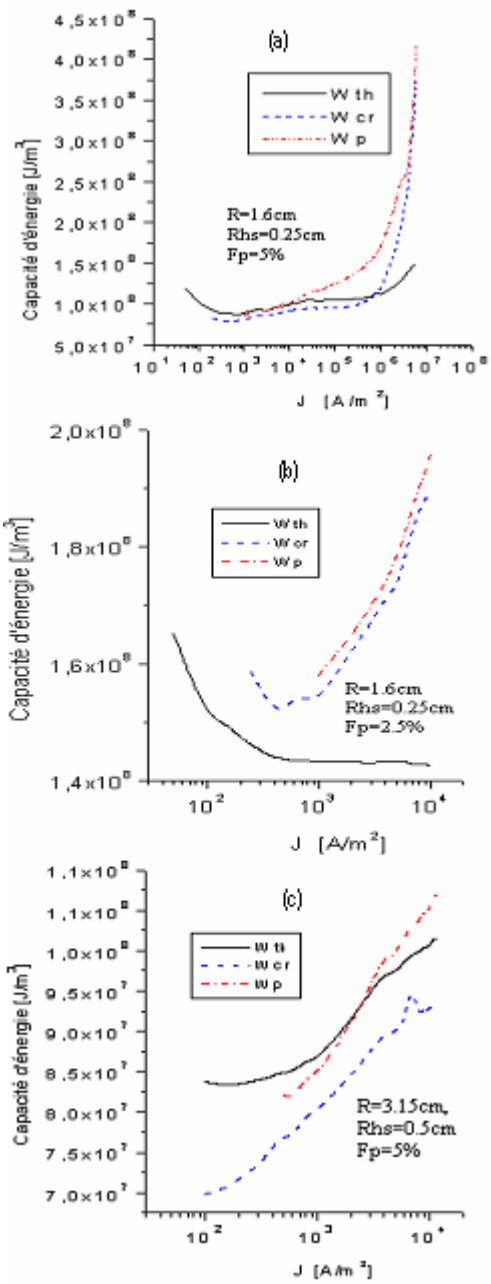

Fig.6. Capacité d'absorption de l'énergie en fonction de la densité de courant moyenne et en terme des trois modes de défaillance.

La fig.7 représente la variation des temps de défaillance correspondants à l'emballement thermique tfth, craquement tfcr et perforation tfp en fonction de la densité de courant pour le cas de la fig6.a. On constate effectivement qu'aux grandes valeurs de la densité de courant la capacité d'absorption d'énergie augmente lorsque le temps à considéré devient faible. Ce ci conduit à dire que la varistance est capable d'absorber une grande quantité d'énergie pendant de très courtes durées.

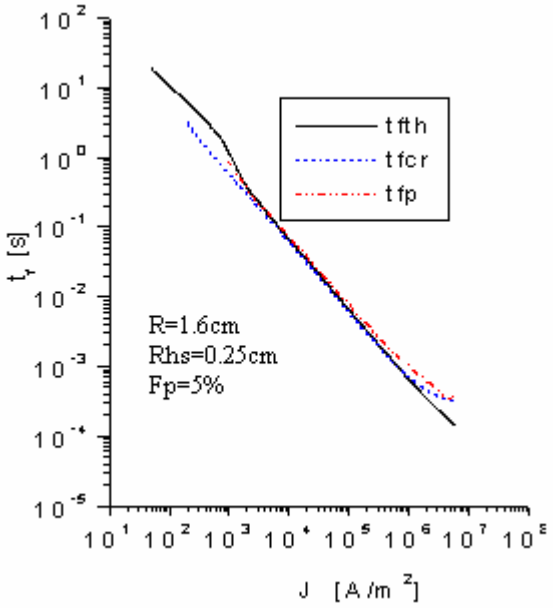

Fig.7. Temps de défaillance en fonction de la densité de courant pour l'emballement thermique tfth, craquement tfcr et la perforation tfp.

IV. CONCLUSION

Un simple modèle thermoélectrique a été appliqué à la modélisation des varistances de MT et HT pour l'étude de leur capacité d'absorption de l'énergie en fonction des dimensions, degré de non uniformité et densité de courant. On a montré que trois phénomènes d'origine thermomécanique sont la cause de destruction des varistances à savoir: l'emballement thermique, le craquement et la perforation. On a montré également que pour les varistances de petites dimensions l'emballement thermique est le mode de défaillance dominant à moins que la varistance soit fortement non uniforme où il y a apparition du craquement. Les varistances les plus uniformes ont une grande capacité d'absorption qui n'est limitée dans ce cas que par l'emballement thermique. D'autre part un rayon grand de la varistance entraîne l'augmentation des contraintes et dans ce cas la varistance est détruite essentiellement par craquement.

REFERENCES

[1] David R. Clarke, "Varistor Ceramics" *J.Am. Cerami. Soc, 82 [3] 485-502 (1999).*

[2] M.Bartkowiak, M.G. Comber, G.D. Mahan "Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors". *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.1, January 1999.*

[3] M.Bartkowiak, M.G. Comber, G.D. Mahan "Influence of Nonuniformity of ZnO varistors on their energy absorption capability", *IEEE Transactions on Power Delivery Vol.16, No4, October 2001.*

[4] Gordon Pike "Breakdown in ZnO varistors by high power electrical pulses", *Sandia National Laboratory SAND 2001-2160, July 2001.*
[5] M. Bartkowiak "Current localization, non-uniform heating, and failures of ZnO varistors ", *Meeting of the Materials Research Society, Boston, MA, December 1-5, 1997.*
[6] H. Wang, M.Bartkowiak, F.A. Modine, R.B. Dinwiddie, L.A. Boatner, G.D. Mahan:" Non uniforme heating in zinc oxide varistors studies by infrared imaging and computer simulation", *J.Am.Ceram. Soc, vol.81, No.8 2013 -22 (1998).*
[7] Jinliang He, R.Zeng, Q.Chen, S.Chen, Z.Guan, S.W.Han, H.G. Cho: "Nonuniformity of electrical characteristics in microstructure of ZnO surge varistors", *IEEE Transaction on Power Delivery Vol.19, No1, January 2004.*
[8] 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, No. 4, October 2003.*
[9] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Bruce R. Munson, David P. DeWitt : *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid, Mechanics and Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Inc 2003.
[10] Abderrahim Fakkar : ' Contribution à l'étude du comportement thermique des varistances à base d'oxyde de zinc simulation et mesures, application aux parafoudres moyenne et haute tension', *Thèse Doctorat, Toulouse 1994*.
[11] M. Houabes, M. Kachi : "Energy absorption capability of high threshold field ZnO varistors- based surge arresters", *First International Meeting on Electronics and Electrical Science and Engineering, Track 3, DC116, IMESE'06, Djelfa, Algeria, Nov.04-06, 2006.*
[12] M. Bartkowiak, G.D.Mahan, F.A.Modine, M.A.Alim, R.Lauf and A.McMillan :"Voronoi network model of ZnO varistors with different types of grain boundaries", *J.Appl.Phys. 80(11) December 1996.*