

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE DE BADJI MOKHTAR ANNABA

Année 2010

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'électrotechnique

MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

**Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour
l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques**

Option

Réseaux Electriques

Par

Mouloud MECHATI

DIRECTEUR DE THESE : Mourad HOUABES

UNIVERSITE DE ANNABA

DEVANT LE JURY

Président	: El Bahi Azzag	M.C.A. Université Badji Mokhtar Annaba
Rapporteur	: Mourad Houabes	M.C.A. Université Badji Mokhtar Annaba
Examineurs	: Mohamed Adjabi	M.C.A. Université Badji Mokhtar Annaba
	Hamid Razem	M.C.A. Université Badji Mokhtar Annaba
	Abdallah Abderrazak	M.C.A. Université Badji Mokhtar Annaba

ملخص

البرق هو ظاهرة مثيرة لقلق هام لعمل جميع التركيبات الكهربائية وذلك لأسباب عدة (ويسبب انقطاع مؤقت في استمرارية الخدمة ، وتدهور نوعية الخدمة ، وتدمير المعدات ، وخطرا على الناس). الارتفاع الناجم عن البرق أو المناورات التي تسبب تعطل الأجهزة على حد سواء بالنسبة للمستهلك ، وبالتالي على نوعية الطاقة. وقد أدى ذلك إلى استخدام وسائل وقائية أكثر فعالية وتحسين خصائصها.

ويعتبر الواقي من صواعق ذو أكسيد الزنك حاليا الأكثر استخداما ، ويميل إلى تعويض الواقي من الصواعق ذو كربيد السيلسيوم والمتفجر. ومع ذلك، فإن القدرة على امتصاص الطاقة من السيراميك تتغير وفقا لشكل معقدة اعتمادا على حجم وكثافة التيار والتوحيد للكتلة.

الغرض من هذه المذكرة هو دراسة الواقي من الصواعق ذو أكسيد الزنك و تحسين خصائصه وذلك بحساب تغيرات قدرة المقاومة المتغيرة على امتصاص الطاقة والمحددة بالجموح الحراري و التفتيق والانشقاق في حالة أنصاف أقطار ودرجات عدم انتظام مختلفة .من أجل هذا قمنا باستعمال نموذج بسيط لتعيين التغيرات الكهروحرارية للمقاومة المتغيرة حيث إن الجانب الكهربائي اعتمد على علاقة تقريبية للتيار بدلالة التوتر والتي تأخذ بعين الاعتبار ارتباطها بالحرارة . أما الجانب الحراري فقد اعتمد على حل معادلة انتشار الحرارة بطريقة الفوارق المنتهية .

الكلمات المفتاحية : الواقي من الصواعق، المقاومة المتغيرة ، قدرة

امتصاص الطاقة ، نمذجة ، درجة عدم الانتظام.

ABSTRACT

Lightning is a disturbing phenomenon important for the functioning of all electrical installations, for several reasons (causing temporary disruption in the continuity of service, the deteriorating quality of power, destruction of equipment, a hazard to people). The surge caused by lightning or maneuvers are causing disruption to both the hardware for the consumer and hence to the quality of energy. This has led to the use of protective devices more efficient and to improve their characteristics.

Actually, ZnO surge arrester is the most used in protecting equipment against transient overvoltages and tends to replace spark-gap and SiC surge arrester. Zinc oxide varistors, which are the active elements in the arrester, have excellent properties with high non linear coefficient, short time response and high energy absorption capability. However, energy absorption capability of this ceramics reveals a complex dependence of dimensions, current density and non uniformity degree.

The objective of this dissertation is to determine, by simulation, the energy absorption capability of ZnO varistors as function of dimensions, current density and non uniformity degree and in terms of three failure modes, thermal runaway puncture and cracking. A simple electrothermal model, describing the electrical and thermal behavior, is used. The electrical behavior is represented by an empirical $I(V)$ characteristic which takes into account his temperature dependence. In the other hand, the thermal model is based on the heat equation solution by finite difference method. Non uniformity is represented by a filament extending axially through the bloc and representing the hot spot region and current localization.

Keywords : surge arrester, varistor, energy absorption capability, modelling, , non uniformity degree.

Résumé

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres (l'origine de perturbation momentanées dans la continuité de service, la dégradation de la qualité des alimentations, destructions de matériel, un danger pour les personnes).

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. Ce ci a conduit à l'utilisation des appareils de protection de plus en plus performants et à l'amélioration de leurs caractéristiques.

Le parafoudre ZnO est actuellement le plus utilisé et tend à remplacer les parafoudres SiC et les éclateurs. 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 du bloc.

L'objectif de ce mémoire est la détermination par voie de calcul des variations de la capacité d'absorption de l'énergie en terme de l'emballage thermique, la perforation et le craquement pour des rayons et des degrés de non uniformité différents. A cette fin un simple modèle, décrivant le comportement thermoélectrique de la varistance, a été utilisé. Le modèle électrique est basé sur une relation $I(V)$ empirique qui tient compte de l'effet de la température. Tandis que le modèle thermique est basé sur la résolution de l'équation de chaleur par discrétisation par la méthode de différences finis. La non uniformité de la varistance est pris en considération par un filament qui parcourt le bloc et représente un chemin à faible impédance et en conséquence la localisation du courant.

Mots-clés : parafoudre, varistance, capacité d'absorption d'énergie, modélisation, coefficient de non linéarité.

Dédicace

A mes très chers parents

A mes sœurs,

A mes frères,

Et à mon épouse.

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadreur monsieur Mourad Houabes pour ses conseils et de m'avoir fait part de son expérience dans le domaine des matériaux et particulièrement les varistances.

Je remercie également Mr. E-B.Azzag d'avoir accepté de présider le jury et je remercie tous les membres du jury Mr. M.Adjabi , Mr. H.Razem et Mr. A.Abderrazak d'avoir accepté de faire partie du jury, ainsi que tous les enseignants de département d'Electrotechnique de Badji Mokhtar.

Je remercie Mr Miloud Kachi pour son aide. Enfin je remercie mes collègues de Magister en électrotechnique à l'université de Badji Mohktar - Annaba.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX	TITRES	N°
1.1	- Tensions normalisées du réseau national français ligne BT, HTA et HTB.	3
1.2	- Propriétés des oxydes souvants utilisés.	37
2.1	- Les compositions chimiques en pourcentages.	54
2.2	- Principales propriétés physico-chimiques des oxydes.	55
2.3	- Masses atomiques des dopants.	56
2.4	- Formulation classique.	56
2.5	- La variation du flux en fonction du courant.	67
4.1	- Données pour le calcul du diagramme d'équilibre.	93
4.2	- Grandeurs critiques.	98

LISTE DES FIGURES

<i>FIGURES</i>	<i>TITRES</i>	<i>N°</i>
1.1	- Réseau d'un électrique simplifié.	5
1.2	- Schéma d'un réseau électrique complet.	7
1.3	- Onde de manœuvre	8
1.4	- Onde de foudre	9
1.5. a	- Enclenchement d'une ligne à vide.	10
1.5. b	- Réamorçage après déclenchement d'une ligne à vide.	10
1.5. c	- Oscillation de déclenchement amortie.	10
1.6	- Ordre de grandeur des surtensions électrique.	11
1.7	- Circuit équivalent d'un tronçon élémentaire d'une ligne.	12
1.8	- Augmentation de la tension à la sortie de la ligne.	15
1.9	- Schéma d'un réseau électrique.	15
1.10	- Schéma électrique.	16
1.11	- Défaut monophasé dans un système avec neutre à la terre.	17
1.12	- Schéma de défaut monophasé.	18
1.13	- Onde du courant de foudre.	20
1.14	- Coup de foudre direct.	22
1.15	- Coup de foudre sur un câble de garde.	23
1.16	- Photo d'un éclateur à air.	25
1.17	- Schéma d'un éclateur.	25
1.18	- L'allure de courbe I(V) d'un éclateur.	26
1.19	- Caractéristique de la tension d'amorçages de l'éclateur.	27
1.20	- Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.	28

1.21	- Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs.	31
1.22	- Parafoudre à oxyde de zinc ZnO.	33
1.23	- Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection.	34
1.24	- Niveau de protection et niveau d'isolement.	35
1.25	- Coordination des isolement : détermination exacte du niveau de protection et d'isolement.	36
1.26	- Procédé de fabrication des varistance ZnO .	38
1.27	- Cycle de frittage d'une varistance ZnO.	40
1.28	- Caractéristique J(E) d'une varistance ZnO.	43
1.29	- Variation de la résistivité d'une varistance ZnO en	43
1.30	- Microstructure d'une varistance dopée de bismuth.	47
1.31	- Types de joints de grains.	48
1.32	- Représentation simplifié de la microstructure.	50
1.33	- Schéma équivalent de la varistance ZnO.	51
2.1	- Cycle thermique de recuit.	59
2.2	- Montage de mesure pour les faibles courants.	60
2.3	- Montage de mesure en impulsionnel.	61
2.4	- Forme d'onde de la tension et du courant en régime impulsionnel.	62
2.5	- Schéma de principe d'un circuit de manœuvre.	63
2.6	- Courbe de la tension en fonction de temps.	64
2.7	- Courbe du courant en fonction du temps.	64
2.8	- Schéma électrique pour l'étude des surtensions.	65
2.9	- Surtension aux bornes de disjoncteur.	65
2.10	- Schéma représente la tension et le courant de source.	66
2.11	- La caractéristique $\phi(I)$	67
2.12	- Schéma d'un circuit électrique	68

2.13	- Schéma de la ferrorésonance.	68
2.14	- Les variations des tensions en fonction de temps.	69
2.15	- L'intensité de courant du générateur.	69
3.1	- Effet de la température sur la caractéristique I(V).	78
3.2	- Variation de la conductivité avec la température, grandeur mesurée.	80
3.3	- Variation de la conductivité avec la température sur échelle linéaire.	80
3.4	- Effet de la température sur la caractéristique I(V).	82
3.5	- Variation de la conductivité en fonction de la température.	83
3.6	- Microstructure de la varistance ZnO.	84
3.7	- Evolution du champ de seuil en fonction de la concentration du Sb_2O_3 et de la Tf.	85
3.8	- Variation de la capacité d'absorption en fonction de la concentration du Sb_2O_3 et de la Tf.	86
3.9	- Evolution de l'intensité du courant I_f en fonction du taux de Sb_2O_3 dans la varistance.	87
3.10	- La caractéristique I(V) de composants ZnO-CoO et ZnO-Bi ₂ O ₃ .	88
3.11	- Perforation des varistances par dépassement de la capacité énergétique.	90
4.1	- Caractéristique J(E) typique pour trois températures.	92
4.2	- Variation du coefficient de non-linéarité α avec la tension et la température.	92
4.3	- Diagramme d'équilibre calculé pour une température ambiante.	95
4.4	- Diagramme d'équilibre thermique calculé pour une température ambiante.	95
4.5	- Températures limites donnant l'égalité des puissances en fonction de la tension appliquée.	97
4.6	- Variation des pertes avec la tension.	98
4.7	- Marge de stabilité.	99
4.8	- Variation de la capacité d'énergie en fonction de la tension.	99
4.9	- Variation avec le rayon (a) des pertes, (b) de la densité de courant.	100
4.10	- Effet de la longueur sur les températures limites de stabilité.	101
4.11	- Effet de la longueur sur les pertes et la convection.	101

4.12	- Distribution spatiotemporelle de la température et la densité de courant.	104
4.13	- Distribution spatiotemporelle des contraintes : Radiales, tangentielles et axiales.	105
4.14	- Valeur maximale de la température du filament.	106
4.15	- Contraintes maximales sur les trois dimensions radiales. tangentielle, et axiale.	107
4.16	- Capacité d'absorption d'énergie et temps de défaillance.	109
4.17	- Température du filament.	111
4.18	- Courant impulsionnel, et champ résiduel.	112
4.19	- Densité de courant J_{moy} et champ résultant.	113
4.20	- Température et contraintes maximales.	113

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Désignation
P_p	- Perte de puissance par effet de Joule.
R	- Résistance.
I	- Courant électrique.
U	- Tension électrique.
P	- Puissance électrique.
L	- Inductance.
C	- Admittance.
ω	- Pulsation.
k	- La conductivité thermique du matériau.
γ	- Constante de propagation de l'onde.
G	- Conductivité.
S	- Puissance apparente.
φ	- Déphasage.
q	- Charge électrique.
t	- Temps
U_r	- Tension résiduelle.
$I_{déch}$	- Courant de décharge.
$R_{tot p}$	- Resistance totale de parafoudre.
α	- Coefficient de non-linéarité.
E	- Champ électrique.
J	- Densité de courant électrique.
Φ	- Flux magnétique.
μ	- Perméabilité magnétique.

σ	- Conductivité électrique.
T	- Température.
Q	- Pertes volumique.
c_p	- Chaleur massique.
ρ	- Densité.
K_B	- Constante de Boltzmann.
W_c	- Energie d'activation.
σ_0	- Conductivité initiale.
S	- Surface latérale de la varistance.
h_c	- Coefficient de convection naturelle.
T_s	- Température à la surface de varistance.
T_a	- Température ambiante.
Q_c	- Chaleur transmise par convection.
Q_r	- Chaleur transmise par rayonnement.
s	- Nombre aléatoire tenant compte le non uniformité.
A^*	- Constante effective de Richardson.
h	- Constante de Planck.
Φ_B	- Hauteur de la barrière de potentiel.
ε	- Permittivité.
σ_s	- Conductivité shunt.
σ_g	- Conductivité du grain.
i	- Indice de discrétisation dans le temps.
n	- Indice de discrétisation dans l'espace.
m	- Nombre totale de pas de discrétisation.

TABLEAU DES MATIERES

Introduction générale	1
<i>Chapitre 1 : Recherche bibliographiques</i>	2
1. Les réseaux de transports électriques	3
1.2. Nécessité de transporté l'électricité à une tension élevée.....	3
1.3. Structures des réseaux électriques.....	4
1.4. Le réseau de transport.....	4
1.4.1. Caractéristiques générales du transport électrique.....	4
1.5. Organisation globale	5
1.5.1. La production.....	6
1.5.2. Le transport.....	6
1.5.3. La distribution.....	6
1.5.4. La consommation	6
1.6. Le réseau électrique réel	6
2. Les surtensions transitoires	7
2.1. Définitions.....	7
2.2. Exemples des surtensions	9
2.2.1. Surtension internes.....	11
2.2.2. Surtension externes	11
3. Les surtensions temporaires.....	12
3.1. Surtension sur une longue de ligne à vide (effet Ferranti).....	12
3.2. Pertes de charges	15
3.3. Défaut monophasé à la terre	17
3.4. Ferrorésonance.....	17
4. Surtensions de manœuvre.....	17
4.1. Calcul et analyse d'une surtension de manœuvre.....	18
5. Surtension transitoires de foudre.....	19
5.1. Nature et comportement de la foudre.....	19
5.2. Paramètres électriques de la foudre	20

5.2.1. La forme d'onde.....	20
5.2.2. Valeur de crête du courant	20
5.2.3. Temps de montée (temps de front).....	20
5.2.4. Temps de décroissance (temps de queue).....	21
5.2.5. Pente du courant (raideur du courant)	21
5.2.6. Energie spécifique	21
5.2.7. Charge totale	21
5.3. Le coup de foudre direct.....	21
5.4. Le coup de foudre indirect.....	22
6. Protection des réseaux électriques contre les surtensions	24
6.1. Principe de protection	24
6.1.1. 1 ^{ère} niveau de protection	24
6.1.2. 2 ^{ème} niveau de protection	24
6.1.3. 3 ^{ème} niveau de protection	24
7. Les éclateurs	25
7.1. Fonctionnement	28
7.2. Avantages.....	28
7.3. Inconvénients	28
8. Les parafoudres.....	29
8.1. Définitions et caractéristiques.....	29
8.1.1. La tension d'amorçage	29
8.1.2. La tension résiduelle	30
8.1.3. La tension d'extinction	30
8.1.4. Le pouvoir de décharge	30
8.1.5. Le courant de suit.....	30
8.1.6. Courant de décharge d'un parafoudre.....	30
8.2. Parafoudre à Carbure de Silicium (SiC)	31
8.2.1. Constitution	31
8.2.2. Principe de fonctionnement	31
8.3. Les parafoudres à oxydes de zinc (ZnO).....	32
8.3.1. Constitution.....	32

3. Méthode de fabrication	56
3.1. Pesée des poudres d'oxydes	56
3.1.1. Broyage	57
3.1.2. Séchage	57
3.1.3. Tamisage	57
3.1.4. Pressage	57
3.1.5. Frittage	57
3.1.6. Métallisation des électrodes	58
3.1.7. Enrobage	59
4. Relèves des caractéristiques I(V)	59
4.1. Mesure à faible courant	60
4.2. Mesure à forts courants	61
5. Utilisation de l'logiciel ATP-EMTP	62
6. Réalisation des essais avec ATP	63
6.1. Surtension transitoires de manœuvres	63
7. Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs	65
7.1. Coupure sur une charge capacitive	65
7.2. Surtension par ferorésonance	66
8. Conclusion	70
Chapitre 3 : Etat de l'art	71
1. Introduction.....	72
2. Méthode de simulation	72
2.1. Solution de l'équation de chaleur	74
2.2. Discrétisation par la méthode des différences finis	75
2.3. Condition initiales et aux limites	77
3. Modèle proposé pour le calcul	77
4. Relation ente les propriétés électriques des varistances ZnO et leur composition.....	83
4.1. Tension de seuil.....	83
4.2. Augmentation du champ de seuil	84

4.3. Diminution de la capacité d'absorption en énergie.....	85
4.4. Intensité du courant de fuite	86
4.5. Coefficient de non-linéarité	87
5. Modes de défaillance des varistances ZnO	89
5.1. L'emballement thermique	89
5.2. La Perforation	89
5.3. Le craquement.....	90
5.4. Le Contournement.....	90
6. Conclusion	91
Chapitre 4 : modèle proposé et simulations	92
1. Introduction.....	93
2. Equilibre de puissances et emballement thermique	93
2.1. Effet des dimensions.....	91
2.2. Procédure de simulation	100
2.3. Distribution de la température, densité de courant et contraintes	102
2.4. Capacité d'absorption d'énergie.....	106
2.5. Régime impulsionnel	110
Conclusions générales	114
Bibliographie	116

Introduction générale

La consommation de l'énergie électrique sans cesse croissante, a entraîné l'extension du réseau de transport et 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 électrique et peuvent être dangereuses pour les usages [8].

Le réseau électrique a été d'abord protégé par les éclateurs ; puis par des parafoudres associant des éclateurs et des parafoudres à carbure de silicium (SiC), mais maintenant les parafoudres à oxydes de zinc (ZnO) ont remplacé avantageusement les éléments antérieurs. Ce dernier appareil au début des années soixante-dix, est devenu très séduisant, dans un premier temps, en haute tension, puis assez rapidement en moyenne tension. Sauf très rares exceptions le marché des parafoudres n'est aujourd'hui plus constitué que les parafoudres à oxyde de zinc [5].

Les parafoudres ZnO offrent en effet des caractéristiques remarquables du point de vue tel que : la non-linéarité, temps de réponse très rapide, élimination de courant de suite, stabilité des caractéristiques et capacité d'absorption de l'énergie.

La capacité d'absorption de l'énergie est l'une des caractéristiques les plus importantes, elle traduit leur limite énergétique au-delà desquelles ils sont détruits.

L'objectif de ce travail est la modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de ses propriétés électriques.

Ce travail est reparti sur quatre chapitres : le premier chapitre donne un général sur les réseaux de transports électriques et les surtensions transitoires de manœuvres et de foudres, et les dispositifs de protection (éclateurs et parafoudres) contre les surtensions transitoires. Dans le deuxième chapitre on a présenté la méthode de manipulation, le matériel utilisées, et on a réalisé quelques essais avec l'ATP. Le troisième chapitre représente le modèle thermoélectrique proposé et la solution de l'équation de chaleur par la méthode de différence finie. Et finalement le quatrième chapitre comporte l'application du modèle proposé à la prédiction des limites de fonctionnement des parafoudres destinés à la moyenne et haute tension.

Chapitre 1

Recherche bibliographiques

1. Les réseaux de transports électriques

1.1. Généralités

Un réseau électrique est un ensemble de d'infrastructure permettant d'acheminer l'énergie électrique vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à plusieurs niveaux de tension, connectées entre elle dans des postes électriques.

Un réseau électrique étant composé de machines de production et de consommation, ainsi que de structures (ligne, transformateur) pour les relier, les réseaux électriques ne sont apparus.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production (centrales hydrauliques, thermique,...) avec les centres de consommation (villes, usines...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension (HT) et très haute tension (THT) pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité de courant) puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final.

1.2. Nécessité de transporté l'électricité à une tension élevée

Le transport d'électricité génère des pertes par effet de Joule, qui dépend de l'intensité de courant I , de la tension U et de la résistance R de la ligne.

Pour du courant triphasé on obtient :

$$P_p = RI^2 = R \frac{P^2}{3U^2} \quad (1.1)$$

P_p : la puissance perdue par effet de Joule dans la ligne.

P : puissance transportée.

U : tension au départ de la ligne.

R : résistance de la ligne.

Pour une même puissance électrique transmise par la ligne, les pertes par effet de Joule diminuent rapidement dès que l'on travaille avec des tensions élevées.

Le transport de puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées, il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre.

1.3. Structure des réseaux électriques :

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci-dessous :

- a) Structure maillée : les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.
- b) Structure radiale ou bouclée.
- c) Structure arborescente.

1.4. Le réseau de transport

Les réseaux de transport sont basés sur une structure de réseau maillée.

Les réseaux de transport sont à très haute tension de (150 KV à 800 KV) et on peut transporter l'énergie électrique des grands centres de production vers les régions de consommation d'électricité, les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit.

1.4.1. Caractéristiques générales du transport électrique

Les réseaux électriques, en très grande majorité, transportent l'énergie électrique sous la forme de systèmes triphasés, les dispositions et grandeurs caractéristiques de ces systèmes sont [2] :

- La fréquence.
- Les niveaux de tension.
- Les différents types de couplage.

a. Fréquence normalisée

Les grands réseaux électriques sont des systèmes interconnectés qui présentent une fréquence uniforme afin de garantir le bon fonctionnement de leurs appareillages, ces derniers étant optimisés pour une valeur précise de la fréquence.

Dans le monde, deux valeurs distinctes de fréquence.

- Le 50Hz caractérise les réseaux Européens, Asiatiques, Russes et Africains.
- Le 60Hz caractérise les réseaux Américains, Canadiens et Japonais (en réalité au Japon les deux fréquences sont utilisées).

b. Tension normalisées

Chaque réseau électrique est organisé à partir de quelques niveaux de tension normalisés :

	Usage	Tensions Normalisées	Noms (standard Européen)	Aspect visuel des lignes
HTB	Grand transport national et interconnexion	225 kV / 400 kV (THT) 90 kV / 63 kV (HT)	HTB (50 kV à 400 kV) HTB 3 : 400 kV HTB 2 : 225 kV HTB 1 : 90 et 63 kV	 Ligne 225 kV
HTA	Lignes interrégionales et répartition régionale	33 kV / 20 kV / 15 kV (MT)	HTA (1 kV à 50 kV)	 Poste de répartition 90 kV
BT	Répartition locale, distribution et consommation	400 V 230 V Mono (BT)	BT < 1 kV	 Pylône 230/400 V 4 fils

Tableau 1.1 : Tensions normalisées du réseau national français ligne BT, HTA et HTB.

1.5. Organisation globale

Les réseaux de production d'énergie électrique sont organisés grossièrement suivant Le schéma ci-dessous :



Figure 1.1 : Réseau d'un électrique simplifié.

1.5.1. La production

Consiste à utiliser des énergies diverses de manière à faire tourner des alternateurs qui produisent des tensions et des courants électriques triphasés. On distingue centrales de productions : thermiques, nucléaires, hydrauliques, éoliennes, géothermiques...etc.

1.5.2. Le transport

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de productions auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans. Le grand transport consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux.

1.5.3. La distribution

Consiste à acheminer produite par des lignes ou des câbles jusque chez les consommateurs tout en réalisant le moins des pertes possibles.

1.5.4. La consommation

Représente l'ensemble des utilisateurs de l'énergie électrique. Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive.

1.6. Le réseau électrique réel

Le réseau électrique réel est constitué de divers centrale de production d'électricité.les tensions produites par les alternateurs sont élevées en haute tension (HT) puis en très haute tension (THT) pour être transportées sur de longues distances. Après cela, on rabaisse la tension dans la gamme des moyennes tensions (MT) de façon à alimenter directement des agglomérations des industries. Dans chaque quartier on trouve des postes de transformation abaisse qui délivrent la tension domestique basse tension (BT) à un certaine nombre de pôles de consommation.

Il est noté que les trois phases de distribution MT et BT sont réparties sur l'ensemble des utilisateurs de façon équilibrer au maximum le réseau. En effet il est impératif d'imposer l'équilibre des courants pour éviter le déséquilibre des tensions inévitable lié à l'absence du neutre sur les lignes HT et THT.

On représente le schéma d'un réseau complet sur le schéma suivant :

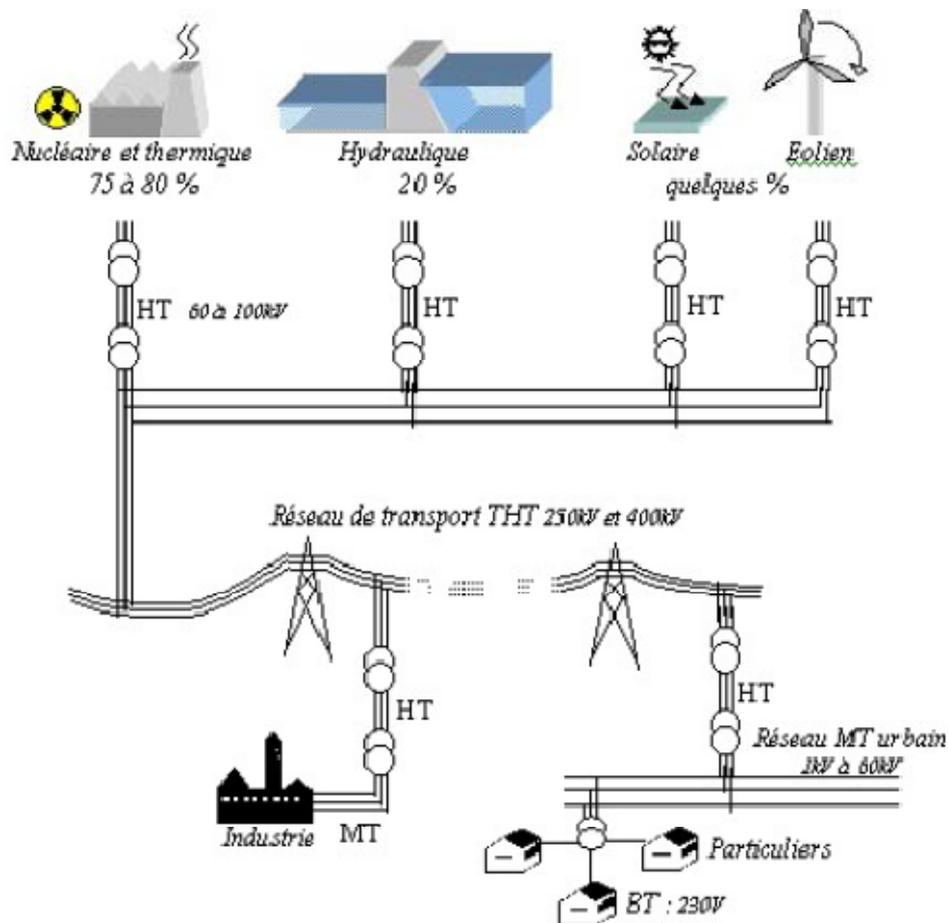


Figure 1.2 : Schéma d'un réseau électrique complet.

2. Les surtensions transitoires

2.1. Définitions

On désigne par surtension toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (ligne, machines, transformateurs, câbles, etc....) [3].

On distingue deux sortes de surtensions :

- **Surtensions transversales** apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.

- **Surtensions longitudinales** ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur.

On qualifié de surtension transitoire toute surtension dont la durée est inférieure à la demi période et variant généralement de $1\mu\text{s}$ au $1/10\text{s}$ [6]. Les surtensions transitoires sont dues aux opérations de manœuvres et des coups de foudre.

Pour le teste du matériel et la simulation des surtensions transitoires, ces dernières sont représenté par des formes normalisées caractérisées généralement par un temps de monté et un temps de descente à une valeur de la surtension égale la moitié de la valeur crête figures (1.3).et (1.4).

Les surtensions de manœuvres de durée relativement longue, par rapport aux surtensions de foudre, sont représenté par une onde ayant un temps de monté $T_p=250\mu\text{s}$ et un temps de descente à demi onde $T_2=2500\mu\text{s}$, avec une tolérance respectivement 20 % et 60 % [6].

Les surtensions de foudres sont représentées par les formes d'ondes données par la figure (1.4). Les ondes à front et à queue coupés sont utilisées pour simuler l'onde issue de la rupture de l'isolement ou du phénomène de contournement.

Le temps de montée T_1 est déterminé par l'intersection de la pente sur le front avec l'axe de temps, en O1, et 90% de l'amplitude en B. Les constantes de temps T_1 et T_2 généralement utilisées sont $8/20\mu\text{s}$, $4/10\mu\text{s}$ pour représenter les courants $1.2/50\mu\text{s}$ pour représenter les surtensions de foudre. La tolérance dans ce cas set de 30% pour T_1 et 20% pour T_2 [6].

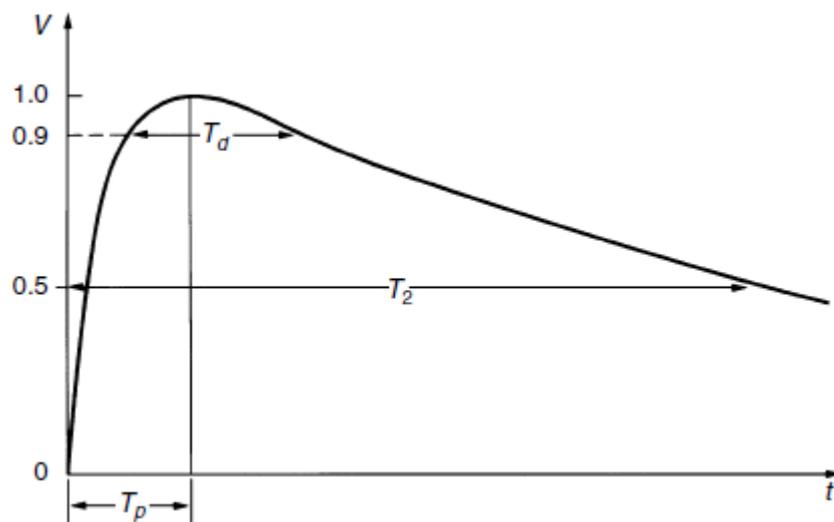
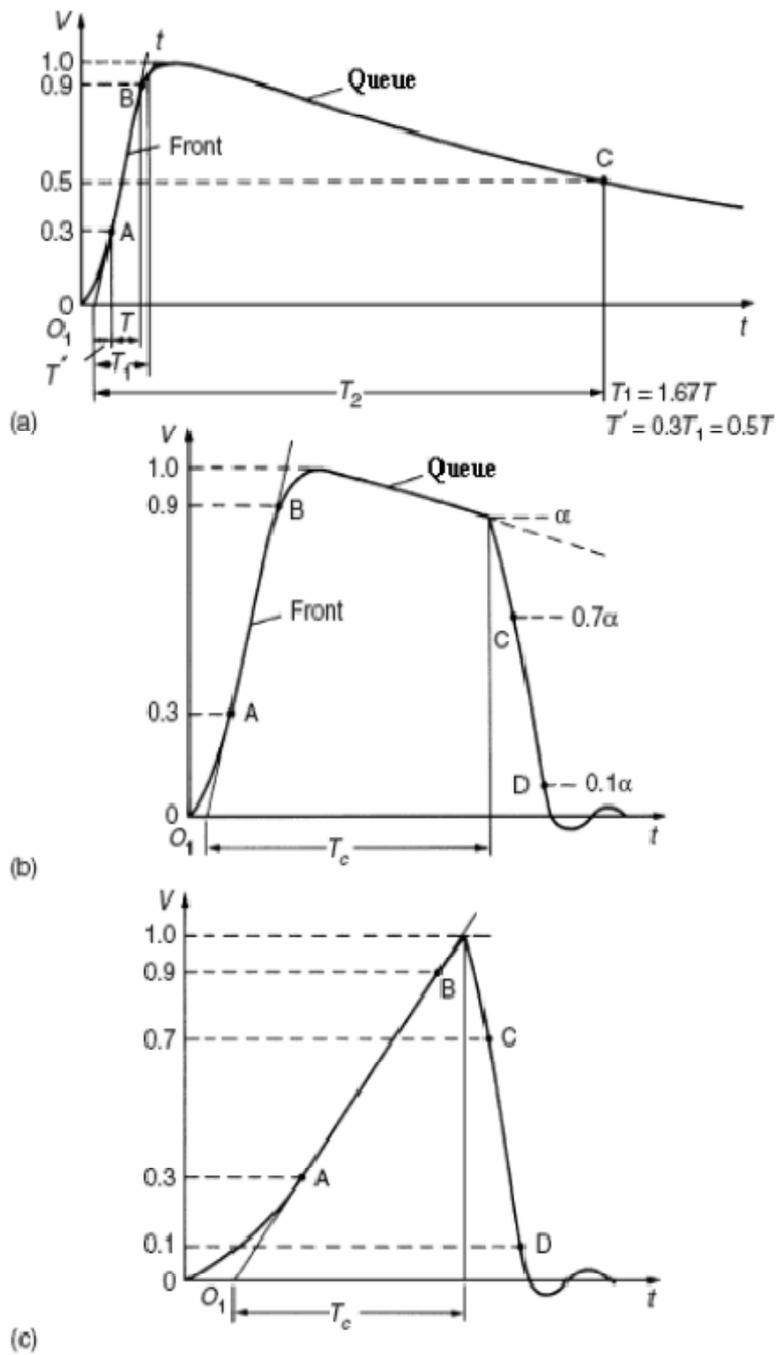


Figure 1.3 : Onde de manœuvre, T_p : temps de montée au pic, T_2 : temps à la demi onde T_d : Durée de tension supérieure à 90% [6].



**Figure 1.4 : Onde de foudre (a) pleine (b) coupée sur la queue et (c) coupée sur le front.
 T_1 : temps de front, T_2 : temps de queue, T_c : temps de coupe et O_1 origine fictive [6].**

2.2. Exemples des surtensions

Pour éviter que les surtensions n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtensions à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installera à l'entrée des postes de couplage des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtensions à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse.

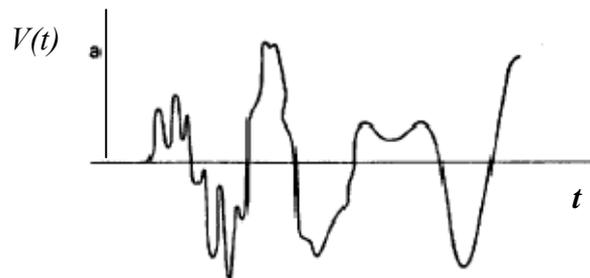


Figure 1.5.a : Enclenchement d'une ligne à vide.

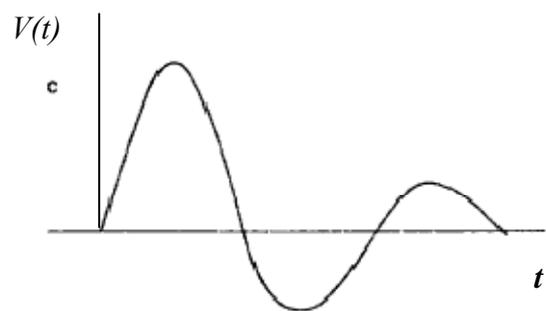


Figure 1.5.b : Réamorçage après déclenchement d'une ligne à vide.

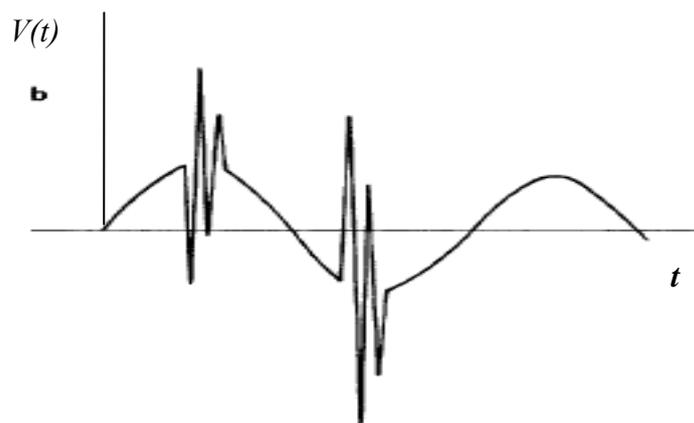


Figure 1.5.c : Oscillation de déclenchement amortie.

Les surtensions se caractérisent par des ondes de courant ou de tension. En générale la durée de ces ondes est inversement liée à leur amplitude, ce qui est assez heureux, car l'isolation

de l'équipement protégé supporte mieux les tensions d'autant plus élevées que leur est le plus court.

Les surtensions sont classées généralement en :

2.2.1. Surtension internes, qui dépend du réseau :

- Surtensions temporaires.
- Surtensions de manœuvres.

2.2.2. Surtensions externes, généralement d'origine atmosphérique.

- Surtensions de foudre.

Les surtensions sont classées aussi selon leur durée d'application.

- Les surtensions transitoires, de durée inférieure à 0.1s comprenant les ondes de foudre et de manœuvres.
- Les surtensions temporaires de durée supérieure à 0.1s de nature périodique ou oscillatoire.

L'ordre de grandeur des amplitudes et des durées est donné par la figure (1.6) suivante :

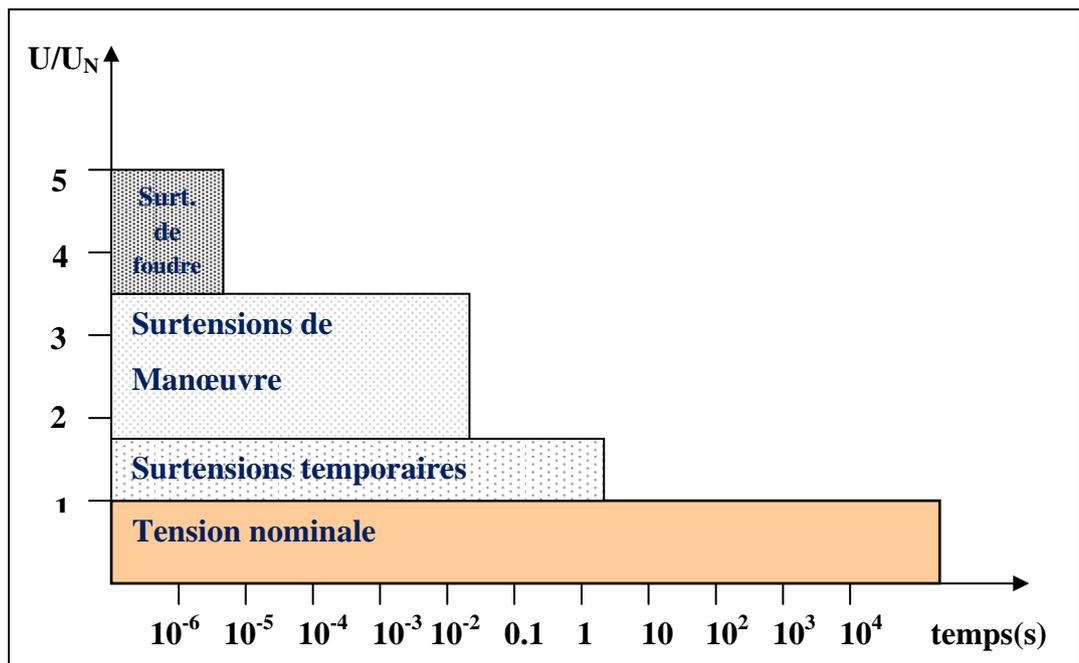


Figure 1.6 : Ordre de grandeur des surtensions électrique.

3. Les surtensions temporaires

Ces surtensions peuvent avoir des formes alternatives ou oscillatoires, et se présentent soit à la fréquence industrielle, soit à d'autres fréquences plus élevées. Elles apparaissent, lors de la modification brusque de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre :

- Défauts entre phase et terre (déplacement du point neutre).
- Déclenchement brusque d'une charge.
- Alimentation d'une charge capacitive au travers d'une impédance élevée (surtout en THT).

3.1. Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti)

Une surtension peut produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le long de la ligne.

Considérons une ligne triphasée, dont l'étude peut être ramenée à celle d'une seule phase, figure (1.7).

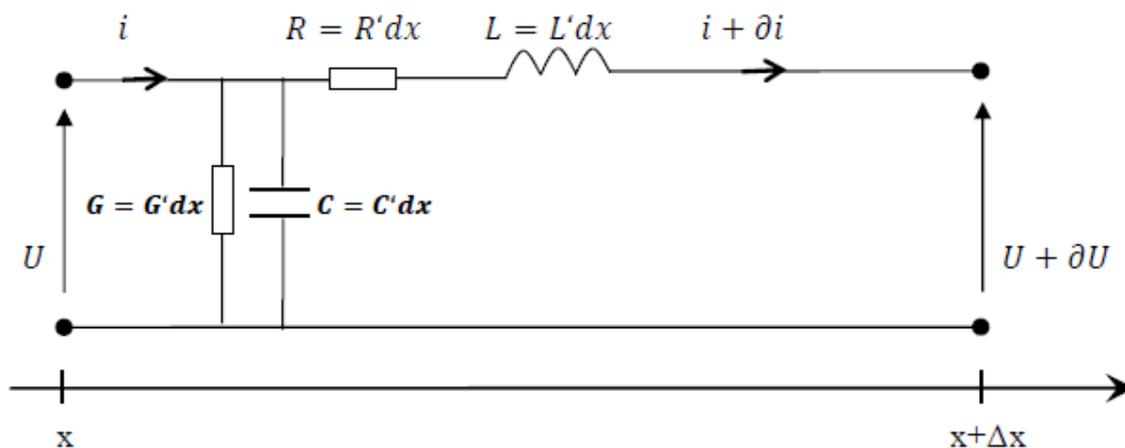


Figure 1.7 : Circuit équivalent d'un tronçon élémentaire d'une ligne.

Les équations des télégraphistes s'écrivent pour ces éléments tel que :

$$\begin{cases} -\frac{\partial U}{\partial x} = R'i + L'\frac{di}{dt} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G'U + C'\frac{dU}{dt} \end{cases} \quad (1.2)$$

En régime sinusoïdale avec :

$$\begin{cases} u(x, t) = U_0 e^{j(\omega t - kx)} \\ i(x, t) = I_0 e^{j(\omega t - kx)} \end{cases} \quad (1.3)$$

Et en posant :

$\bar{U} = U_0 e^{j\omega t}$ et $\bar{I} = I_0 e^{j\omega t}$ on obtient :

$$\begin{cases} -\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = (R' + j\omega L')\bar{I} \\ -\frac{\partial \bar{I}}{\partial x} = (G' + j\omega C')\bar{U} \end{cases} \quad (1.4)$$

Soit :

$Z' = R' + j\omega L'$: L'impédance complexe de la ligne par unité de longueur.

$Y' = G' + j\omega C'$: L'admittance complexe de la ligne par unité de longueur.

On posant :

$\gamma = \sqrt{Z'Y'}$: Constante de propagation de l'onde de tension et de courant.

On obtient les deux équations de propagation :

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \gamma^2 \bar{U} = 0 \\ -\frac{\partial^2 \bar{I}}{\partial x^2} + \gamma^2 \bar{I} = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Ces équations admettent comme solutions :

$$\begin{cases} U(x) = U_0 \cosh \gamma x - Z_c I_0 \sinh \gamma x \\ I(x) = I_0 \cosh \gamma x - \frac{U_0}{Z_c} \sinh \gamma x \end{cases} \quad (1.6)$$

Avec :

$$\begin{cases} \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \\ \sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \end{cases} \quad (1.7)$$

Où: $Z_C = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}}$: impédance caractéristique de la ligne en (Ω).

U_0 et I_0 respectivement la tension et le courant en $x = 0$.

La ligne de longueur l , étant ouverte, on a : $I(l) = 0$

Et on cherche : $U(l)$, on obtient :

$$U(l) = U_0 \frac{1}{\cosh \gamma l} \quad (1.9)$$

Le développement limite de $\cosh \gamma l$ est tel que :

$$\cosh \gamma l = 1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2!} + \dots \quad (1.10)$$

$$U(l) = U_0 \frac{1}{\cosh \gamma l} = U_0 \frac{1}{1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2!}} = U_0 \frac{1 - \frac{\gamma^2 l^2}{4}}{1 + \frac{\gamma^2 l^2}{4}} \quad (1.11)$$

Pour $\gamma^2 l^2 \ll 1$

D'où on peut faire l'approximation

$$U(l) = U_0 \left(1 - \frac{\gamma^2 l^2}{2} \right) \quad (1.12)$$

Comme : $G = 0$ et $R \ll L$

$$\gamma^2 \approx -L'C^2\omega^2 \quad (1.13)$$

On obtient finalement :

$$U(l) = U_0 \left(1 + \frac{L'C^2\omega^2 l^2}{2} \right) \quad (1.14)$$

Avec : $\omega = 2\pi f$ pulsation du régime sinusoïdale absorbé.

f : étant la fréquence du réseau.

- Pour les lignes aériennes : $L'C' = 0.3$ à $0.7 \Omega/km$ et $C'\omega = 1.8$ à $4.5 \mu s/km$.
- Pour les câbles : $L'C' = 0.06$ à $0.25 \Omega/km$ et $C'\omega = 9$ à $300 \mu s/km$.

Application numérique :

$$U(l) = U_0(1 + 55.l^2) \quad (1.15)$$

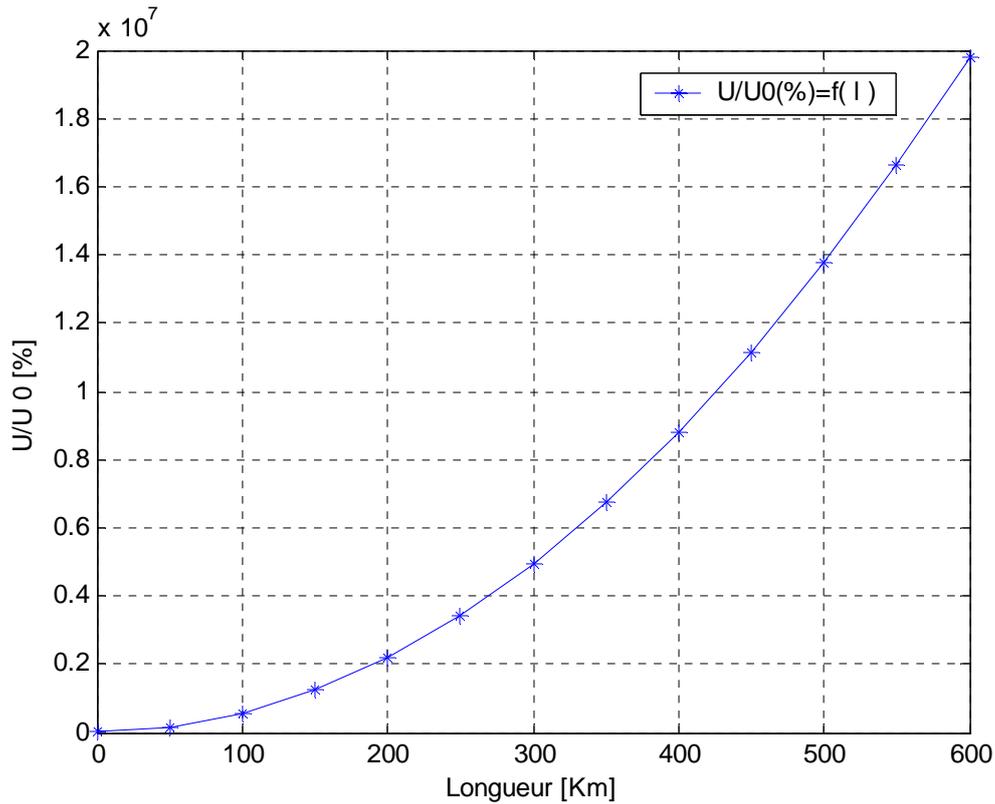


Figure 1.8 : Augmentation de la tension à la sortie de la ligne.

3.2. Pertes de charges

Le transit de puissance électrique dans un réseau provoque des chutes des tensions. Considérons une puissance apparente :

$$\bar{S} = P + JQ \tag{1.16}$$

Qui transit le long d'une ligne d'impédance : $\bar{Z} = R + jX$ sous une tension U .

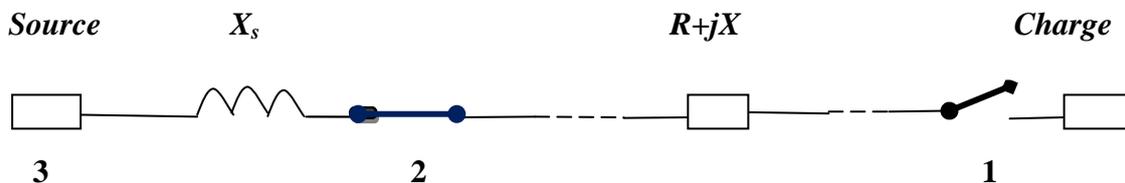


Figure 1.9 : Schéma d'un réseau électrique.

En fonctionnement normal, les deux disjoncteurs 1 et 2 sont en position fermées.

Le courant tel que :

$$I = \frac{S^*}{U} = \frac{P-JQ}{U} \quad (1.17)$$

La chute de tension relative :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\bar{Z} \cdot \bar{U}^*}{U} = \frac{(R+JQ)(P-JQ)}{U} \quad (1.18)$$

La tension à la source au point 2, est inférieure à la tension aux bornes de la charge au point1, U_1 .

A l'ouverture du disjoncteur1, le courant s'annule et avec lui la chute de tension, U_1 .augmente à cause de la perte de charge.

La ligne retrouve à vide et il y a une autre augmentation de U_1 , en raison de l'effet Ferranti.

- Instantanément, au point 2, la ligne représente une charge capacitive pour la source d'impédance :

$$Z_2 = \frac{1}{JC'\omega l} \quad (1.19)$$

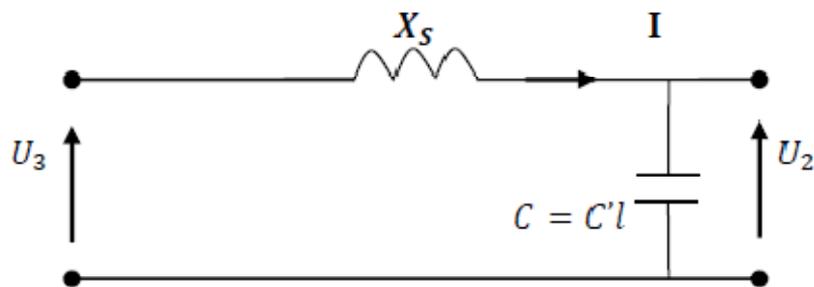


Figure 1.10 : Schéma électrique.

Si X_s : est la réactance de la source, la tension au point 3 est :

$$U_3 = J \left(X_s - \frac{1}{C'\omega l} \right) I \quad (1.20)$$

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{1}{1 - X_s C' \omega l} \quad (1.21)$$

- Une tension apparaît au point 2. Elle est d'autant plus élevée que la réactance de la source est petit (une tension faible de petit puissance présente une grande réactance), la longueur de la ligne élevée, la capacité de la ligne grande (câble).

3.3. Défaut monophasé à la terre :

Lorsque une phase, d'un système triphasé est à la terre (défaut monophasé, sa tension V_1 s'annule .Les deux autres phases dites saines, la tension simple des phases saines augmente et peut atteindre la tension composée, $\sqrt{3}$ fois à la tension simple, figure (1.11).



Figure 1.11 : Défaut monophasé dans un système avec neutre à la terre.

3.4. Ferrorésonance

La saturation des matériaux magnétiques des transformateurs déforme la tension et crée donc des harmoniques, une d'elles peut entrer en résonance avec le réseau et des surtensions apparaît c'est la ferrorésonance.

4. Surtensions de manœuvre

Trois valeurs qui caractérisent l'onde de choc : le temps de crête, la valeur de tension de crête, la valeur de 50 %.

Les manœuvres d'interrupteurs ou des disjoncteurs entraînent des changements dans la configuration électrique des réseaux ces changements provoquent des surtensions de plus ou moins élevées.

- Coupures des courants à vide
- Coupure sur une charge capacitive ou inductive.

Ces surtensions se caractérisent généralement par un échelon de tension d'une amplitude 1,3 à 3,4 fois la tension nominale du réseau.

Les surtensions de manœuvres sont moins dangereuses que celles de foudre.

4.1. Calcul et analyse d'une surtension de manœuvre :

Considérons un point de défaut monophasé d'une ligne triphasée alimentée par une tension : $v(t) = V\sqrt{2} \sin \omega t$

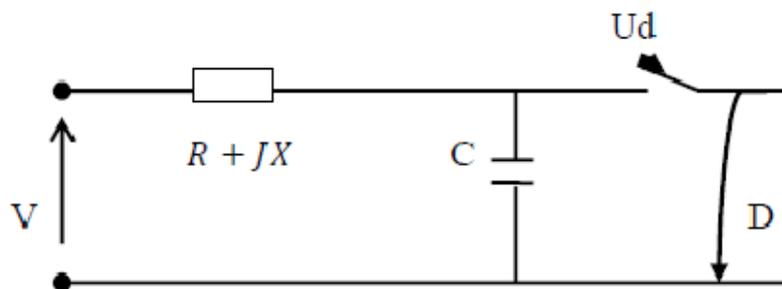


Figure 1.12 : Schéma de défaut monophasé.

$$V\sqrt{2} \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt} + U_d \quad (1.22)$$

$$i = C \frac{dU_d}{dt} \Rightarrow LC \frac{d^2 U_d}{dt^2} + RC \frac{dU_d}{dt} + U_d = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad (1.23)$$

La solution de l'équation différentielle (1.23) est :

$$U_d = U_{d1} + U_{d2} \quad (1.24)$$

L'équation caractéristique : $LC\alpha^2 + RC\alpha + 1 = 0$

$$\Delta = R^2 C^2 - 4RC$$

Δ : est généralement inférieur à zéro.

$$\alpha_{1,2} = \frac{-RC \pm J\sqrt{\Delta}}{2LC} = \alpha_r \pm \alpha_i$$

$$u_{d1}(t) = U_{d1} e^{\alpha_1 t} \sin(\alpha_i t + \varphi) \quad (1.25)$$

$$U_{d2}(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (1.26)$$

La solution de l'équation différentielle :

$$\mathbf{u}_d(t) = U_{d1} e^{\alpha_1 t} \mathbf{sin}(\alpha_i t + \varphi) + V\sqrt{2} \mathbf{sin}(\omega t) \quad (1.27)$$

$$tg(\varphi) = \frac{X}{R} \approx 10 \Rightarrow \varphi = 90^\circ \quad (1.28)$$

5. Surtension transitoires de foudre

5.1. Nature et comportement de la foudre

La foudre est une décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages. A la différence d'un conducteur, où les décharges sont à la surface des électrodes conductrices, dans un nuage orageux, les charges sont portées par les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace ; leurs déplacements sont relativement lents, de telle sorte qu'une décharge ne met en jeu qu'une partie des charges contenues dans le nuage.

Ainsi, un coup de foudre est généralement constitué d'une série de décharges, utilisant le même trajet d'éclair, et séparées les unes des autres d'un temps variant entre quelques dizaines de microsecondes jusqu'à quelques dixièmes de secondes.

Les décharges entre nuage et sol sont négatives dans 90% des cas ; elles frappent ainsi les points de l'électrode opposée aux points où le champ électrique est le plus fort : c'est-à-dire les points (arbres, clochers, pylônes, files de lignes électriques, etc....).

On peut chiffrer approximativement les grandeurs d'un coup de foudre :

- 10^8 à 10^{10} V pour le potentiel d'un nuage.

- 5 à 10 kV/m pour le champ «électrique au voisinage du sol pendant les orages.
- 20 à 60 kA pour l'intensité d'une décharge.
- 10 à 300 C pour les charges des nuages.

L'onde de choc présente un front de 1 à 5 μs et une durée de demi-amplitude de 20 à 50 μs (durée jusqu'à ce que la tension ait atteint la moitié de sa valeur maximum).

Les décharges négatives, partant du nuage suivant un canal nommé streamer, descendent vers le sol par échelons, avec une allure bifurquée. La vitesse de l'éclair est de 20 à 110 $m/\mu s$, correspondant à une vitesse en ligne droite entre 15 et 65 $m/\mu s$.

5.2. Paramètres électriques de la foudre

5.2.1. La forme d'onde

La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microseconde à 20 microsecondes) suivie d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes figure (1.13). Donc le courant est de nature impulsionnelle. et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée), et un temps de décroissance.

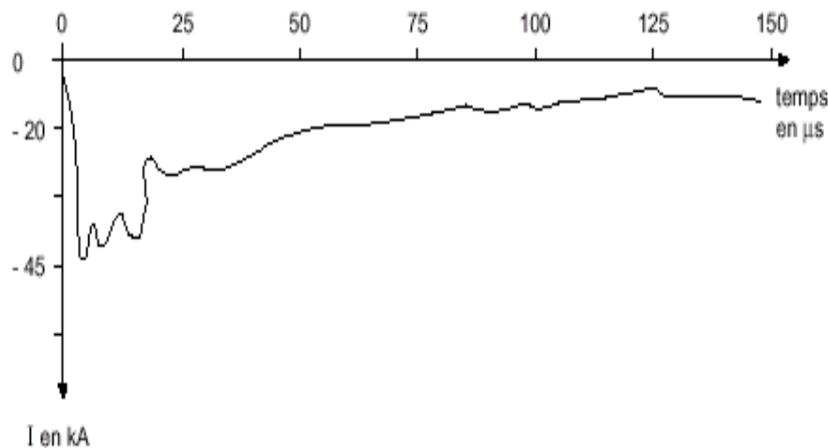


Figure 1.13 : Onde du courant de foudre.

5.2.2. Valeur de crête du courant

La valeur maximale atteinte par l'intensité d'une impulsion de courant. Cette valeur est variable d'un coup de foudre à l'autre, pour traiter des problèmes de surtensions et des problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre.

5.2.3. Temps de montée (temps de front)

Durée entre l'instant du début de l'impulsion de courant atteint sa valeur maximale.

5.2.4. Temps de décroissance (le temps de queue)

Durée entre l'origine conventionnelle et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50% de la valeur de crête. Il est lié aux efforts mécaniques, et sert à déterminer la durée d'application de la force électromagnétique.

5.2.5. Pente du courant (raideur du courant)

Elle s'exprime en kilo ampères par microseconde. la raideur maximale à toujours lieu à la cours du front de monté.

5.2.6. Energie spécifique

Pour calculer l'échauffement d'un conducteur, la grandeur utilisée est le « i^2t ». Elle s'exprime en joule par ohm, et elle représente l'énergie que le courant d'un coup de foudre peut dégager dans une résistance de 400Ω ; ce paramètre sert à l'estimation des effets thermiques de la foudre.

5.2.7. Charge totale

Ce paramètre exprimé en coulombs(C) permet de déterminer l'énergie transformée en chaleur par l'arc électrique en surface de conducteur .Il permet notamment de déterminer les risques liés à la perforation des conducteurs au des point d'impacts.

La charge totale est égale à :

$$q = I \cdot t \quad (1.29)$$

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

5.3. Le coup de foudre direct :

Dans le cas où la décharge frappe directement la ligne. Lorsque le foudre d'intensité $i(t)$, frappe une ligne électrique, celle-ci propage une surtension dans les deux directions de part et d'autre du point d'impact et véhicule un courant d'intensité $i(t)/2$ dans chacune de ses deux branches.

On admet que le canal de foudre se comporte comme un générateur de courant à forte impédance interne. Après du point le foudroiement de la ligne, le courant se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long du conducteur (figure 1.14).

Il entraîne avec lui une onde de tension dont la valeur instantanée est approximativement égale à :

$$v(t) = Z \cdot \frac{i(t)}{2} \quad (1.30)$$

Où Z : est l'impédance de l'onde en (Ω).

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 100 μ s pour les coups de foudre à polarité négative.

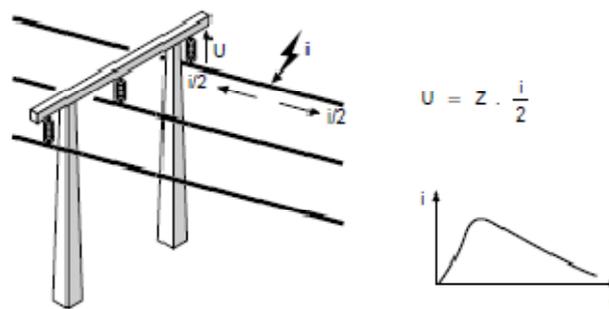


Figure 1.14 : Coup de foudre direct.

Exemple : foudre d'intensité 20 kA, ligne d'impédance 100 Ω , montée du front d'onde 10 μ s. Comme le courant se coupe en deux dans des sens opposés sur la ligne, l'intensité parcourant celle-ci est 10 kA. La tension vaut donc $U = 100 \times 10 = 1$ MV, avec un gradient de montée $1 \text{ MV}/10 \mu\text{s} = 100 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

5.4. Le coup de foudre indirect (sur câble de garde ou pylônes)

Dans le cas où la décharge frappe un fil de garde ou un support. Il se produit alors un amorçage en retour dans le cas de réseaux MT et BT (figure : 1.15). Quand le coup de foudre frappe le sol au voisinage d'une ligne, il apparaît une surtension par couplage électrostatique (150 à 500kV) et électromagnétique jusqu'à 100kV.

Il en résulte une élévation du potentiel de la tête du pylône dont la valeur dépend de l'inductance propre L du pylône et de la résistance R de la prise de terre :

$$U(t) = x \left[R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (1.31)$$

x : rapport du courant de contournement sur le courant de foudre.

La tension U peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs et provoquer un claquage. Il s'agit de l'amorçage en retour. Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorçées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre direct.

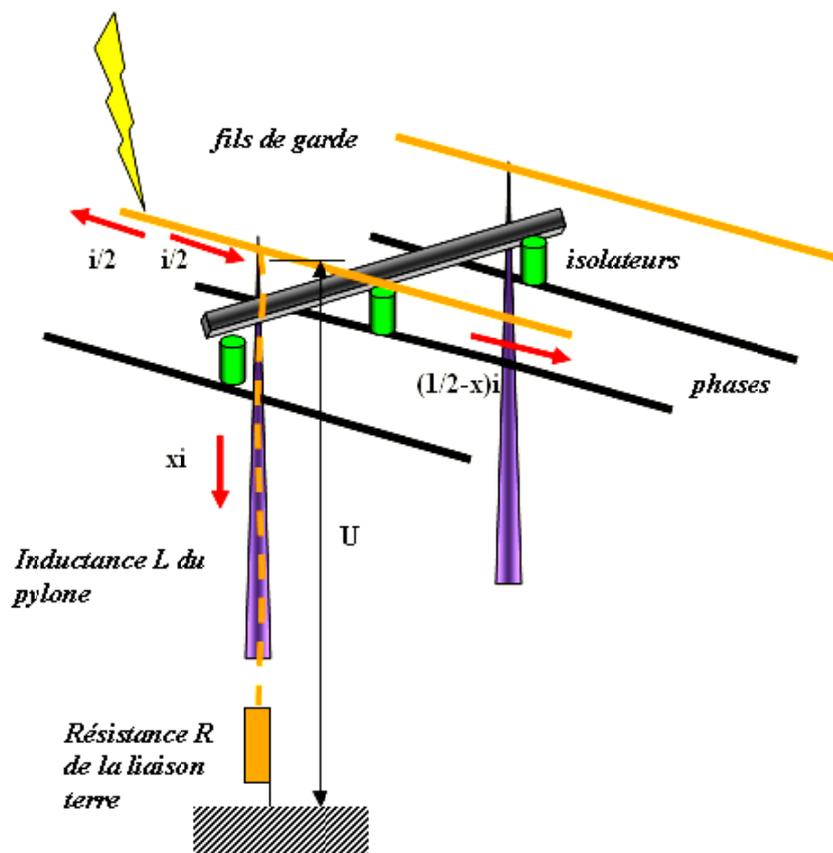


Figure 1.15 : Coup de foudre sur un câble de garde.

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 défauts à la terre ou de contacts entre HT et BT.

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.

6. Protection des réseaux électriques contre les surtensions

6.1. Principe de protection :

La protection des installations et des personnes contre les surtensions est d'autant meilleurs qu'un écoulement des surtensions vers la terre est assuré [4].

On distingue trois niveaux de protections contre les surtensions :

6.1.1. 1^{er} niveau de protection

L'objectif est l'éviter l'impact direct les ouvrages en captant la foudre et en l'orientant vers des lieux d'écoulement privilégiés, au moyen de :

Paratonnerres, dont le principe est basé sur la distance d'amorçage ; une tige placée en haut de la structure à protéger capte la foudre et l'écoule à travers le réseau de terre.

- Cage de Faraday.
- Câble de garde.

6.1.2. 2^{ème} niveau de protection

Son but d'assurer que le niveau d'isolement au choc des éléments du poste n'est pas dépassé.

Il est réalisé en HT au moyen d'éléments assurant de l'onde de foudre à la terre tels que :

- Eclateurs.
- Parafoudres HT.

6.1.3. 3^{ème} niveau de protection

Utilisé en BT comme protection complémentaire des équipements sensibles (informatique, appareils de télécommunications...).

Il est réalisé au moyen de :

- Filtres série.
- Limiteurs de surtensions.
- Parafoudres BT.

7. Les éclateurs

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes face à face dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateur à air), la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre.



Figure 1.16 : Photo d'un éclateur à air.

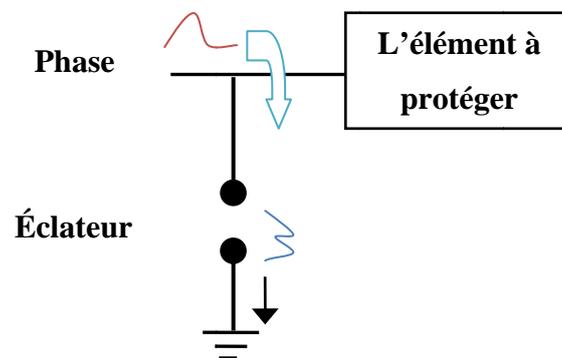


Figure 1.17 : Schéma d'un éclateur.

La forme des électrodes est très variable selon les conditions, on utilise généralement des électrodes sous forme cornes qui sont destinés à provoquer un allongement de l'arc afin d'en faciliter l'extinction.

L'allure de la caractéristique courant-tension d'un éclateur est représentée par la figure (1.18) suivante :

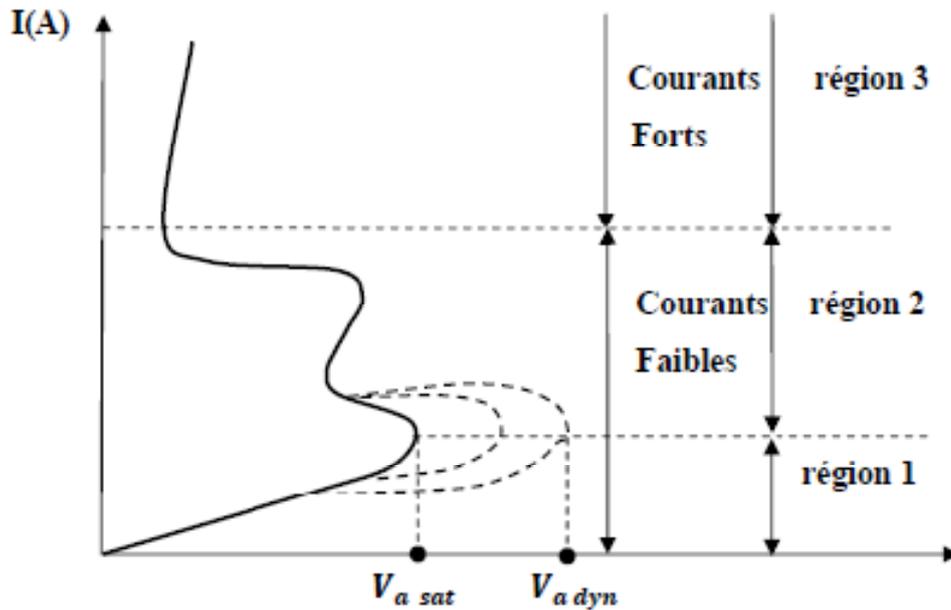


Figure 1.18 : L'allure de courbe I(V) d'un éclateur.

- **Région 1** : l'allure commence par une région où l'éclateur présente son fonctionnement en régime permanent, le courant est très faible ($< 10^{-9}A$) et une tension d'amorçage très variable selon la raideur d'onde.
- **Région 2** : c'est la région de transition dans laquelle la décharge initiée provoquant l'amorçage de l'éclateur.
- **Région 3** : c'est la région de forte intensité où l'amorçage provoque un court circuit (il persiste une tension d'arc très faible).

L'intérêt principal des éclateurs est leur coût modéré ainsi que la simplicité (facile de réglage de la tension) mais ils présentent des handicaps importants :

- Les éclateurs en général 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 quelques 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. Il en résulte un dépassement du niveau de protection d'autant plus important que dV/dt soit 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 atmosphérique, de plus le givre en s'accumulant sur les électrodes peut provoquer des fonctionnements intempestifs.

L'évolution des moyens de protection a donc suivi celle des matériaux et cela quelque soit le niveau de protection, l'éclateur vu ces divers défauts à ainsi progressivement laisser place au parafoudre qui est conçus pour la protection contre les surtensions et qui garantit un bon niveau de protection.

Tension d'amorçage V_{am}

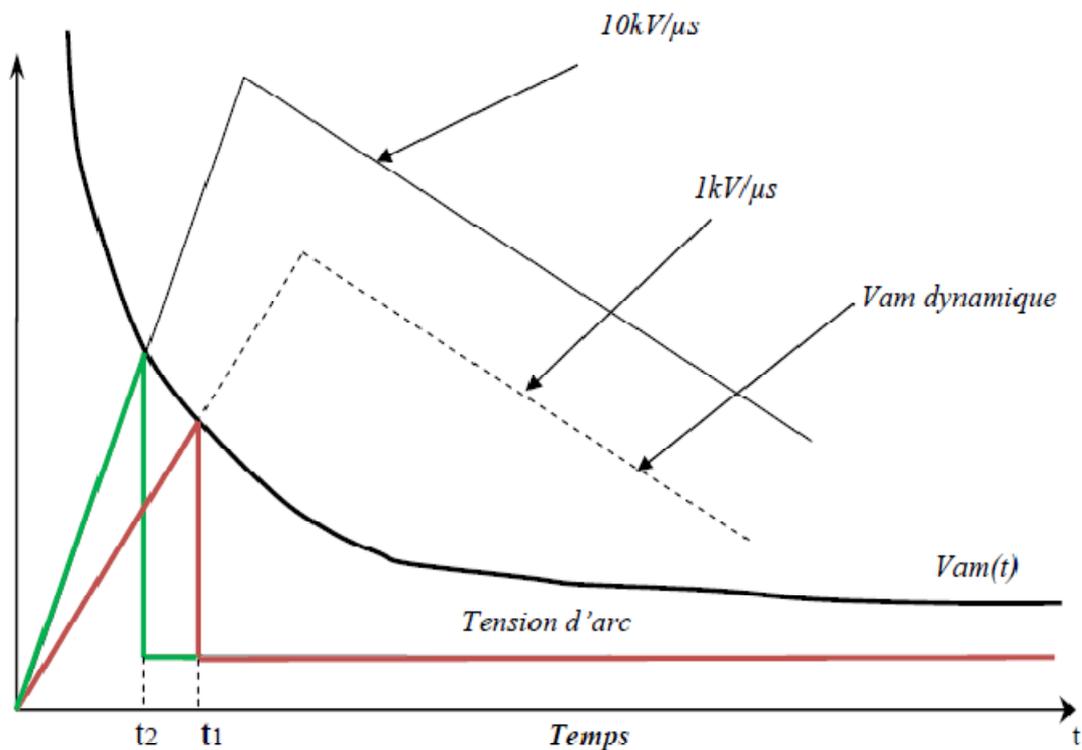


Figure 1.19 : Caractéristique de la tension d'amorçages de l'éclateur.

7.1. Fonctionnement

A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protéger ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur, figure (1.20).

Par exemple, $B=40$ mm sur les réseaux EDF 20KV

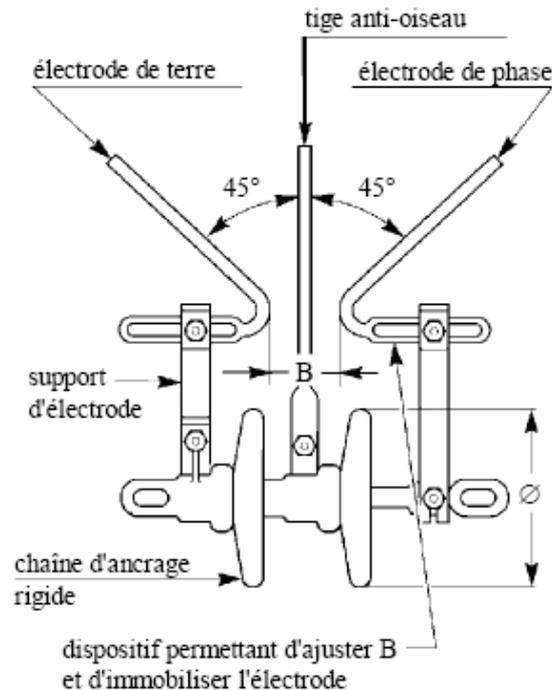


Figure 1.20 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux [4].

7.2. Avantages

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- Leur faible prix.
- Leur simplicité.
- La possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

7.3. Inconvénients

- Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables (jusqu'à 40 pourcent) en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.
- L'élément d'amorçage dépend de la valeur de la surtension.

- L'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son élimination par les appareils de coupure (ce court circuit s'appelle courant de suite). Cela rend nécessaire l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de réenclenchement rapide sur les disjoncteurs situés en amont. De ce fait, les éclateurs sont inadaptés à la protection d'une installation contre les surtensions de manœuvres.
- l'amorçage provoqué par une surtension à front raide n'est pas instantané. En raison de ce retard à l'amorçage, la tension réellement atteinte dans le réseau est supérieure au niveau de protection choisi. Pour tenir compte de ce phénomène, il est nécessaire d'étudier les courbes tension-temps de l'éclateur.
- L'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements des transformateurs ou des moteurs situés à proximité

8. Les parafoudres

Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et bonne continuité de service.

Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations MT et HT en exploitation depuis quelques années.

La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures.

8.1. Définitions et caractéristiques

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres.

8.1.1. La tension d'amorçage est la tension minimum pour laquelle le parafoudre fonctionne. A 50 Hz elle aura pour valeur au moins 2 fois la valeur efficace la plus élevée du réseau .au choc, elle dépend très fortement de la forme d'onde ; elle est généralement définie pour une onde 1,2/50 ou 4/10 ou 8/20 pour des ondes de courant.

8.1.2. La tension résiduelle est la tension maximum aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par :

$$U_r = I_{déch} \cdot R_{tot p} \quad (1.32)$$

U_r : La tension résiduelle.

$I_{déch}$: Courant de décharge.

$R_{tot p}$: Resistance total de parafoudre.

8.1.3. La tension d'extinction ou tension de désamorçage est la valeur la plus élevée de la tension de service pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite.

C'est généralement la valeur qui désigne le parafoudre.

8.1.4. Le pouvoir de décharge est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois de suite, sans être endommagé.

8.1.5. Le courant de suite est le courant fourni par le réseau st qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension.

Un parafoudre doit remplir les conditions suivantes :

- a) à l'apparition d'une surtension, mettre le conducteur à la terre dans un temps très court ($< 0,1 \mu s$).
- b) se désamorcer rapidement après l'écoulement à la terre de la décharge.
- c) avoir une tension d'amorçage et une tension résiduelle aussi stables que possible pendant des années, elles doivent en outre être indépendant de la polarité et de la forme de l'onde, des conditions climatiques.

8.1.6. Courant de décharge d'un parafoudre

Onde de courant écoulee par le parafoudre après amorçage des éclateurs série. Les parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs.

8.2. Parafoudre à carbure de Silicium (SiC) :

8.2.1. Constitution

Ce parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances (résistances non linéaires), au carbure de silicium (SiC), associées en série avec un ou plusieurs éclateurs (figure 1.21), l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote) [5].

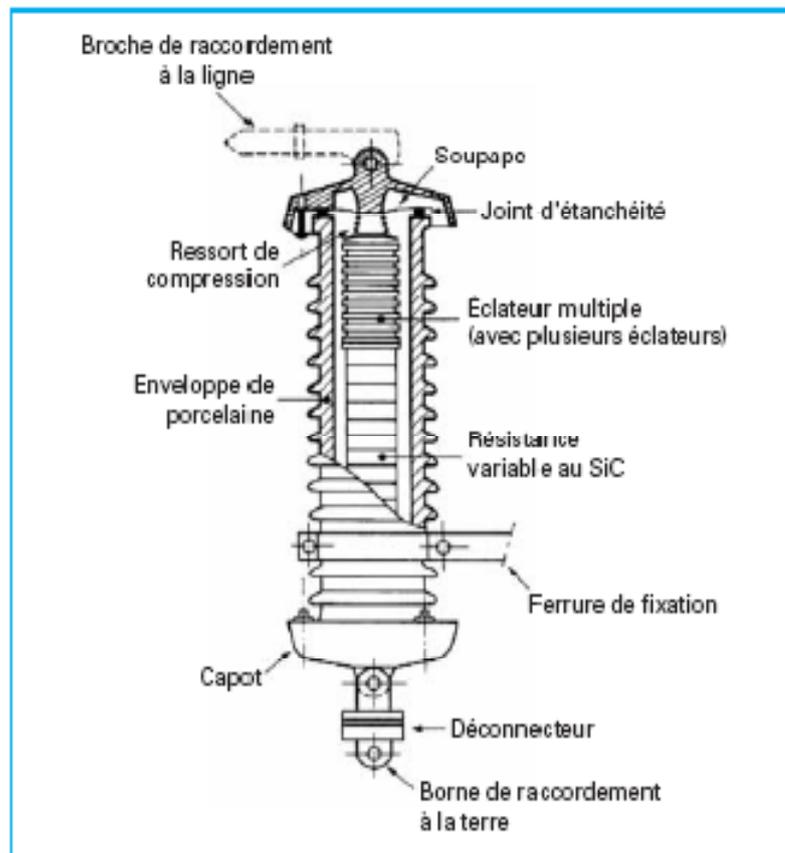


Figure 1.21 : Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [5].

8.2.2. Principe de fonctionnement

En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont conducteurs. Lorsque une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge au travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que la tension est élevée (caractéristique non linéaire), ce qui permet de limiter la surtension.

Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue et la non-linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du

courant qui peut alors être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro. Ainsi, la saturation est écrêtée sans provoquer ni de défaut artificiel, ni d'onde coupée, puisque la présence des résistances en série avec les éclateurs évite l'effondrement de la tension après l'amorçage.

8.3. Les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO)

C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont apparues sur le marché pour la protection des circuits électroniques.

Dés 1970, des constructeurs se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces céramiques. Pour l'électrotechnique, ces composants présentent deux avantages essentiels :

- Un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs, dont la partie active reste sous tensions en permanence.
- Leur capacité d'absorption de l'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'à transport d'énergie à très haute tension (225 ou 400KV).

Le temps de réponse des varistances ZnO est très court (quelques dizaines à quelque centaines de nanosecondes au maximum).

8.3.1. Constitution

Le parafoudre ZnO est composé essentiellement d'un assemblage en série de varistances à base d'oxyde de zinc dont le nombre détermine la tension de fonctionnement. Le tout est encapsulé sous une enveloppe en porcelaine ou en polymère (figure 1.23). Pour augmenter leur d'absorption d'énergie, plusieurs colonnes de varistances sont raccordées en parallèle afin de répartir le courant de décharge.

La fabrication des varistances ZnO avec des caractéristiques remarquables a permis le changement de la constitution des parafoudres. En effet leurs forte non linéarité et leur grande résistivité à l'état bloqué ($10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) ont permis de supprimer l'utilisation des éclateurs, qui constituait un point faible pour les parafoudres SiC, et ce avec un courant de fuite à l'état normale de l'ordre de milliampère, sans l'éclateur le parafoudre ZnO est plus léger et plus facile à fabriquer.

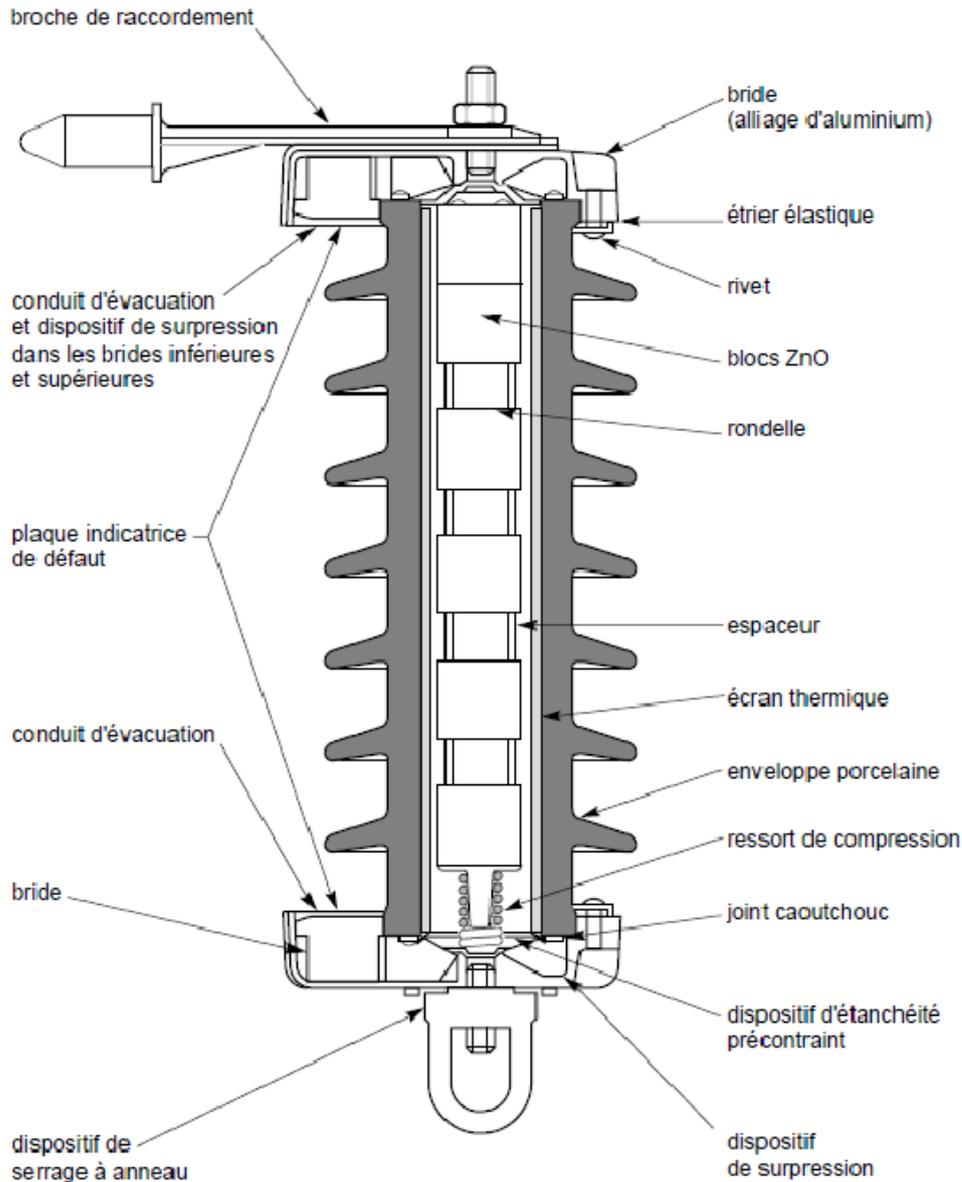


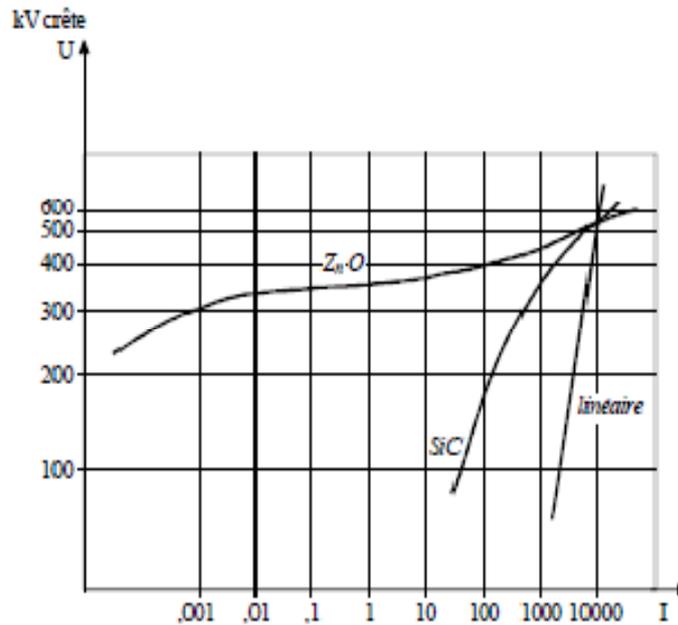
Figure 1.22 : Parafoudre à oxyde de zinc ZnO.

8.3.2. Principe de fonctionnement

La figure (1.23) montre que : La résistance passe de $1.5\text{M}\Omega$ à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10mA) à 15Ω pendant le décharge.

Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre.

Le fort non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension (figure 1.23).



SiC : parafoudre à distance variable avec éclateur constitué varistance à carbure de silicium.

ZnO : parafoudre à oxyde de zinc.

Linéaire : courbe U proportionnelle à I .

**Figure 1.23 : Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection.
550kV/10kA**

9. Notion de niveau d'isolement et niveau de protection

Un dispositif de protection, éclateur ou parafoudre, laisse subsister à ses bornes des surtensions dont l'amplitude est variable en fonction de la durée ou de l'intensité de la contrainte, du type de dispositif utilisé et de son dimensionnement. L'enveloppe de ces surtensions définit le niveau de protection.

Le niveau d'isolement $N_i(t)$ est défini par la tension de tenue au choc et correspond, autrement dit, à la tension de claquage de l'isolation du matériel électrique. Le niveau de protection $N_p(t)$, plus faible, provoque à coup sûr, l'amorçage du dispositif de protection.

$N_i(t)$ est une caractéristique du matériel électrique utilisé et $N_p(t)$ est fixé par l'utilisateur suivant le degré de sécurité souhaité. En outre $N_i(t)$ décroît avec la durée d'application de la tension ce qui correspond à une loi bien connue de la rupture des diélectriques.

Le coefficient de sécurité est représenté par le rapport des niveaux d'isolement N_i et le niveau de protection N_p . Généralement ce coefficient est voisin de 1,2.

Une illustration est donnée dans la figure (1.24) suivante :

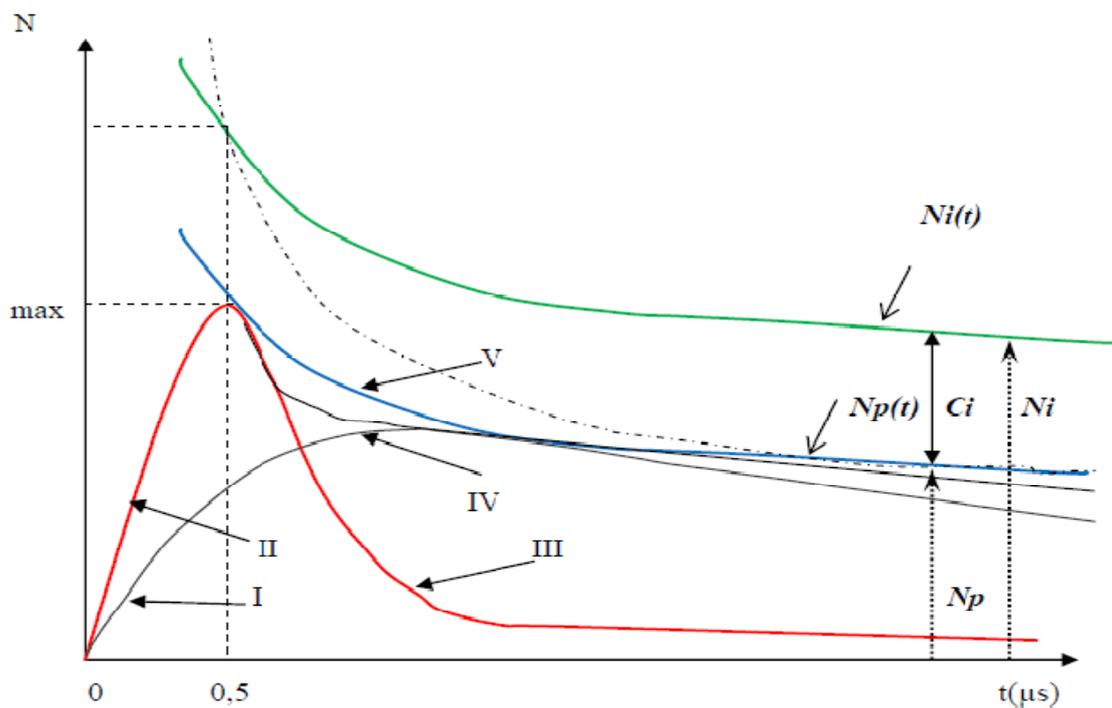


Figure 1.24 : Niveau de protection et niveau d'isolement.

N_i : Niveau d'isolement au choc du matériel (tension de tenue aux chocs sur front d'onde de $0,5 \mu s$;max : $1,2N_i$).

N_p : Niveau de protection au choc (pour $0,5 \mu s$;max: $1,2N_p$).

I : Onde pleine n'amorçant pas l'éclateur (max : N_p).

II : Onde à front très raide amorçant l'éclateur ou le parafoudre (max : $1,2N_p$).

III : Tension résiduelle d'un éclateur.

IV : Tension résiduelle d'un parafoudre à varistance ZnO .

V : Niveau de protection d'un mauvais éclateur (tension d'amorçage sur front raide supérieure à $1,2 N_p$ et pouvant même dépasser $1,2N_i$).

10. Niveau de protection et niveau d'isolement

Etudier la coordination de l'isolement d'une installation électrique c'est donc définir à partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur cette installation, un ou des niveaux de protections contre les surtensions. Les matériels de l'installation et les dispositifs de protections sont alors choisis, figure (1.25).

Le niveau de protection est déduit des conditions : d'installation, d'environnement et d'utilisation du matériel.

L'étude de ces conditions permet de déterminer le niveau de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation.

Le choix du niveau d'isolement adapté permettra s'assurer que, vis-à-vis de la fréquence industrielle et des chocs de manœuvre ou moins, ce niveau d'isolement ne sera jamais dépassé. Vis-à-vis du choc de foudre, un compromis doit généralement être fait entre le niveau d'isolement, le niveau de protection de parafoudres éventuels et le risque de défaillance admissible.

Pour bien maîtriser les niveaux de protection apportés par les limiteurs de surtension, il convient de bien connaître leurs caractéristiques et leur comportement.

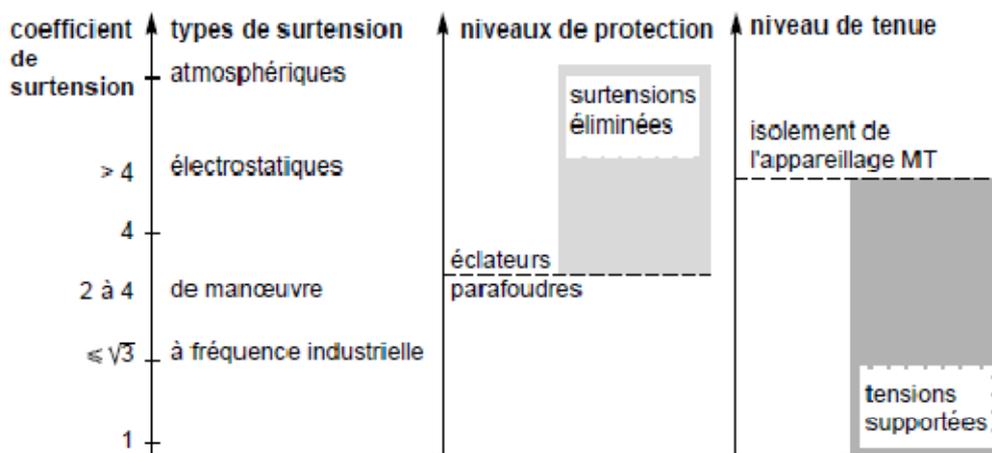


Figure 1.25 : Coordination des isolement : détermination exacte du niveau de protection et d'isolement.

11. Fabrication de la céramique :

La varistance ZnO est fabriquée à partir d'un mélange d'oxydes métalliques dont plus de 90 % est l'oxyde de zinc. Les varistances sont des céramiques polycristallines fabriquées par

le procédé céramique classique à partir d'un mélange d'oxydes. Une formulation standard comporte au moins le ZnO , Bi_2O_3 , Sb_2O_3 , Co_3O_4 , Cr_2O_3 et MnO_2 . Le tableau (1.2) donne les propriétés des poudres souvent utilisées.

Le procédé de fabrication passe par plusieurs étapes enchainées que l'on représente sur la figure (1.26). Ce procédé peut être résumé en trois étapes essentielles : la préparation et le formage de la poudre, le frittage, la finition.

Dans la préparation de la poudre on cherche l'homogénéisation du matériau avec une taille moyenne des grains suffisamment petite ($50 \mu m$ à $200 \mu m$). L'homogénéité du matériau joue un rôle très important dans l'apparition des phénomènes de craquement et de perforation responsable de la destruction des varistances. La poudre préparée est ensuite mise dans un moule de forme cylindrique et pressée sous une pression variant entre 300 et 400 kg/cm.

La varistance crue ainsi obtenue est passée à l'étape de frittage pour assurer la consolidation du matériau. Par rapport aux propriétés électriques finales du produit, le frittage est considéré comme l'étape la plus importante dans le processus de fabrication de la varistance. En effet, suite aux différentes réactions chimiques des additifs, toutes ces propriétés se développent pendant cette étape.

	Formule moléculaire	Masse molaire (g)	Densité (g/cm^3)	Couleur	Température de fusion °C
Oxyde de zinc	ZnO	81,37	5,606	Blanche	1970
Oxyde de bismuth	Bi_2O_3	495,95	8,9	Jaune	820
Oxyde de manganèse	MnO_2	86,93	5,03	Noire	535
Oxyde de cobalt	Co_3O_4	240,8	6,07	Noire	1935
Oxyde de chrome	Cr_2O_3	151,99	5,21	Verte	2435
Oxyde de d'antimoine	Sb_2O_3	291,5	5,2	Blanche	656
Oxyde de nickel	NiO	74,71	6,67	Gris	1850
Nitrate d'aluminium	$Al(NO_3)_3$	375,13	3,9	Blanche	73,5

Tableau 1.2 : Propriétés des oxydes souvants utilisés [8].

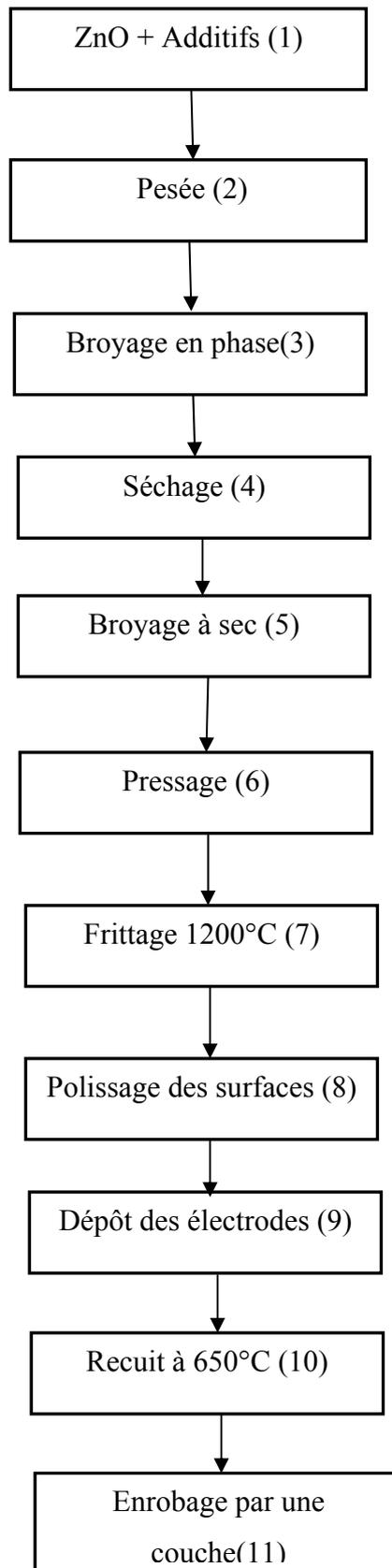


Figure 1.26 : Procédé de fabrication des varistance ZnO [21].

12. Le cycle de frittage

La figure (1.27) est formé d'un ensemble de pentes et de paliers bien définis afin d'avoir les meilleurs caractéristiques .

Le premier palier représente la phase dite de dégraissage [21] nécessaire pour le séchage de la poudre et l'enlèvement du liant organique employé pendant le formage de la poudre.

Le deuxième palier situé au environ de 820°C, correspondant à la température de fusion du bismuth qui permet le frittage en phase liquide. La température augmente encore jusqu'à la température de frittage T_f (1200 à 1300°C), cette dernière dépend de la taille des grains cherchée mais limitée en valeur par l'évaporation du bismuth.

La dernière étape est l'étape de refroidissement au cours de laquelle se forment les barrières de potentiel aux joints de grains .La vitesse de refroidissement influe notamment sur les caractéristiques du produit final, une vitesse de 240°C/h donne les valeurs les plus élevées du coefficient de non linéarité et du champ de seuil [9]. Si à partir de la température de frittage, ou la phase riche en bismuth est liquide, la varistance est refroidie brusquement (trempe), la phase riche en bismuth reste au niveau des joints de grains et recouvre la surface des grains, aucun effet varistance n'est alors observé [10]. Par contre, si l'on refroidie lentement la céramique, la phase liquide se rétracte et ségrégue seulement au niveau des joints triples.

Après frittage, vient la phase de finition qui comporte le dépôt des électrodes, nécessaires aux tests électriques, et l'enrobage de la surface latérale des échantillons. L'enrobage est utilisé pour éviter leur contournement quand les échantillons sont testés sous haute tension.

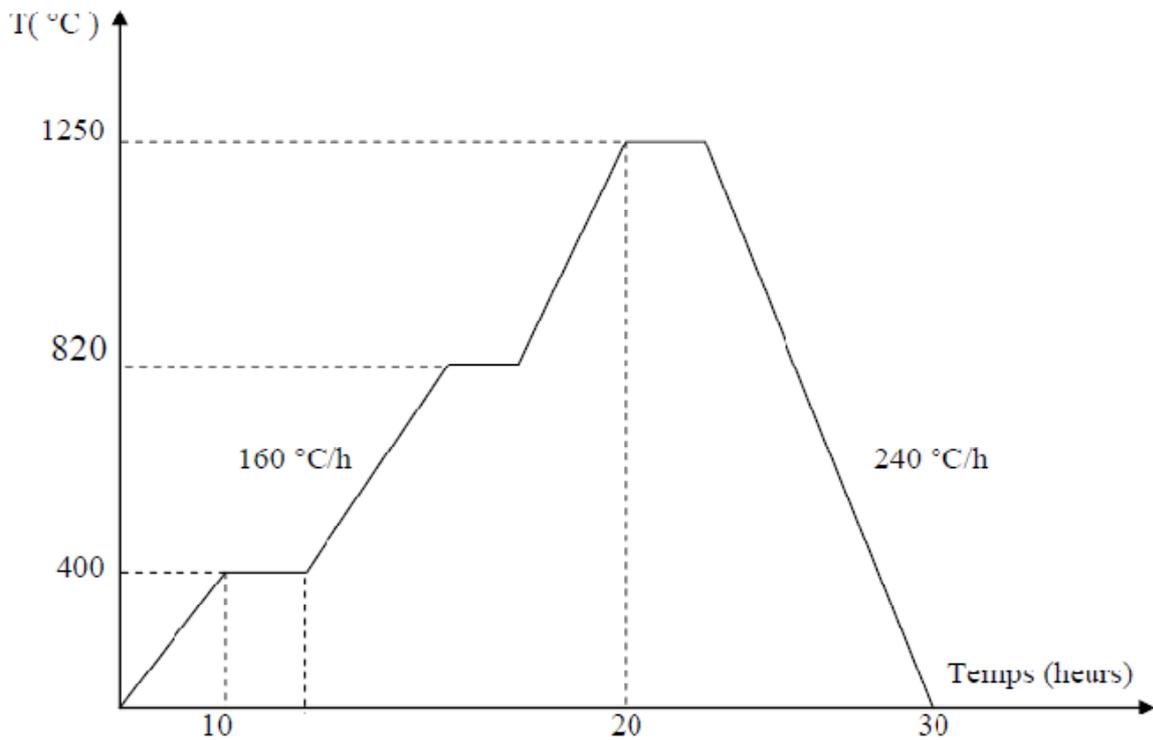


Figure 1.27 : Cycle de frittage d'une varistance ZnO [21].

13. Rôles des oxydes additifs

- **Le bismuth** : Bi_2O_3 toutes les compositions contenant de l'oxyde de bismuth présentent un effet varistance. Les observations au microscope électrique 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 [11].
- **Oxyde d'antimoine** : Le Sb_2O_3 remplit une fonction importante en raison de son amplitude à générer les phases spinelle et pyrochlore. Les phases spinelle jouent le rôle d'un régulateur de taille des grains de ZnO et par conséquent le contrôle de seuil pour une épaisseur donnée.
- **Le cobalt et le manganèse** : les oxydes de cobalt Co_3O_4 et de manganèse MnO_2 , en diffusant l'oxyde de zinc, modifiant la structure électronique de la bande interdite et facilitent la création des barrières de potentiel. Ces oxydes associés à l'oxyde de bismuth permettent d'améliorer considérablement le coefficient de non linéarité.

- **Le nickel** : l'oxyde de nickel permet également le contrôle de la taille des grains tout comme le chrome. Mais il est utilisé essentiellement pour son effet sur l'amélioration à la tenue aux impulsions de courant [21].
- **Le chrome** : le rôle principal de l'oxyde de chrome est d'éviter l'évaporation du bismuth à haute température. Néanmoins, et pratiquement comme tous les dopants, il permet aussi l'inhibition de la taille des grains de ZnO [12].
- **Le bore** : l'oxyde de bore améliore considérablement la stabilisation du courant de fuite dans le temps [21].
- **L'aluminium** : l'aluminium agit essentiellement sur la conductivité des grains ZnO. En qualité bien précise dépendant de la formulation de départ, il se substitue à l'atome de zinc dans le réseau cristallin. Il se comporte alors comme donneur entraînant donc l'augmentation de la conductivité des grains. Au-delà de cette quantité, le nombre de réactions de substitutions atteint son maximum, l'aluminium se place dans les sites interstitiels du réseau cristallin et se comporte alors comme accepteur.

Tous les additifs sont plus au moins responsables de la diminution de la taille des grains de ZnO en s'associant à la formation du spinelle.

14. Le réseau cristallin du ZnO

La varistance ZnO est fabriquée à partir d'un mélange d'oxydes métalliques dont plus de 90 % est l'oxyde de zinc. Vu ses propriétés de piézoélectricité, d'optique, et en tant que semi conducteur, l'oxyde de zinc suscite beaucoup d'intérêt aussi bien pour l'industrie que pour la recherche.

L'oxyde de zinc cristallise dans la structure hexagonale compacte du type wurtzite. La structure du ZnO peut simplement être décrite comme un empilage alternatif, suivant l'axe c.

15. Caractéristiques fondamentales des varistances ZnO

15.1. Caractéristiques électriques

L'effet varistance est défini comme étant la propriété de tout corps dont la varistance électrique évalue d'une façon non linéaire avec la tension appliquée à ses bornes [13].

Ce comportement peut être représenté graphiquement par les caractéristiques courant-tension et résistance-tension illustrés par les figures (1.28) et (1.29).

15.2. La caractéristique courant-tension

La relation courant-tension $I(V)$ constitue la caractéristique la plus important de la varistance, elle traduit en effet la qualité de la varistance essentiellement, du point de vu non linéaire et courant de fuite.

Les figures (1.28) et (1.29) illustrent, respectivement une caractéristique $J(E)$ typique et la variation de la résistivité avec le champ électrique appliqué. Le fonctionnement de la varistance passe par trois phases représentées par les zones 1 , 2 et 3.

- **La zone 1** : représente la phase isolante, elle correspond aux valeurs du champ électrique (tension) inférieures au champ de seuil (tension). Dans cette zone la varistance impose une très grande résistivité au passage du courant de l'ordre de $\rho = 10^{10} - 10^{12} \Omega cm$ [14]. Et seul un courant de faible valeur, dit courant de fuite traverse la varistance. La conduction dans cette zone est linéaire et dépendante de la température. Plus la température de la varistance augmente plus sa résistivité diminue et par conséquent le courant de fuite diminue.
- **La zone 2** : Quand le champ appliqué dépasse le champ de seuil (premier coude), la varistance entre en conduction non linéaire. De ce fait la tension résultante à ses bornes, appelée tension résiduelle reste constante.

Dans cette zone le courant qui traverse la varistance suit une loi exponentielle décrit par une fonction non linéaire de la tension comme :

$$I = K.V^\alpha \quad (1.33)$$

I : Courant traversant la varistance.

V : Tension appliquée.

K : Constante propre au matériau de la varistance.

α : Coefficient de non linéarité ; $30 < \alpha < 100$. [15]

Cette zone représente la phase de fonctionnement où la varistance conduit la surtension vers la terre.

- **Zone 3** : Pour les valeurs élevées du champ (respectivement du courant) la conduction redevient encore linéaire mais avec une très faible résistivité ($\rho = 0,1 - 10 \Omega cm$). Par rapport aux courants de foudre, la varistance fonctionne le deuxième coude de la caractéristique.

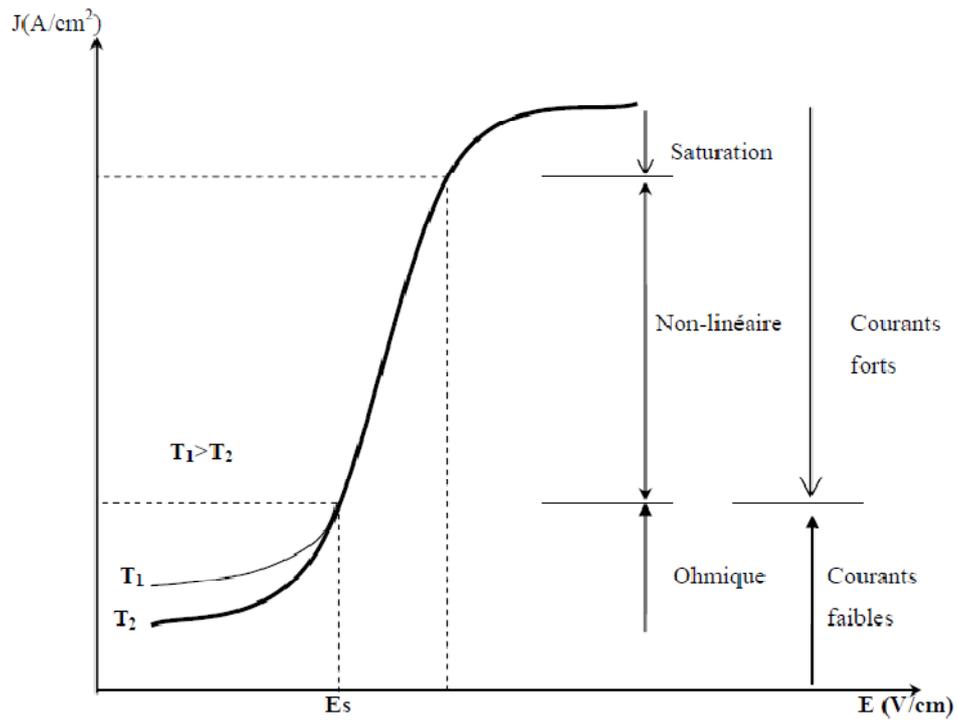


Figure 1.28 : Caractéristique $J(E)$ d'une varistance ZnO.

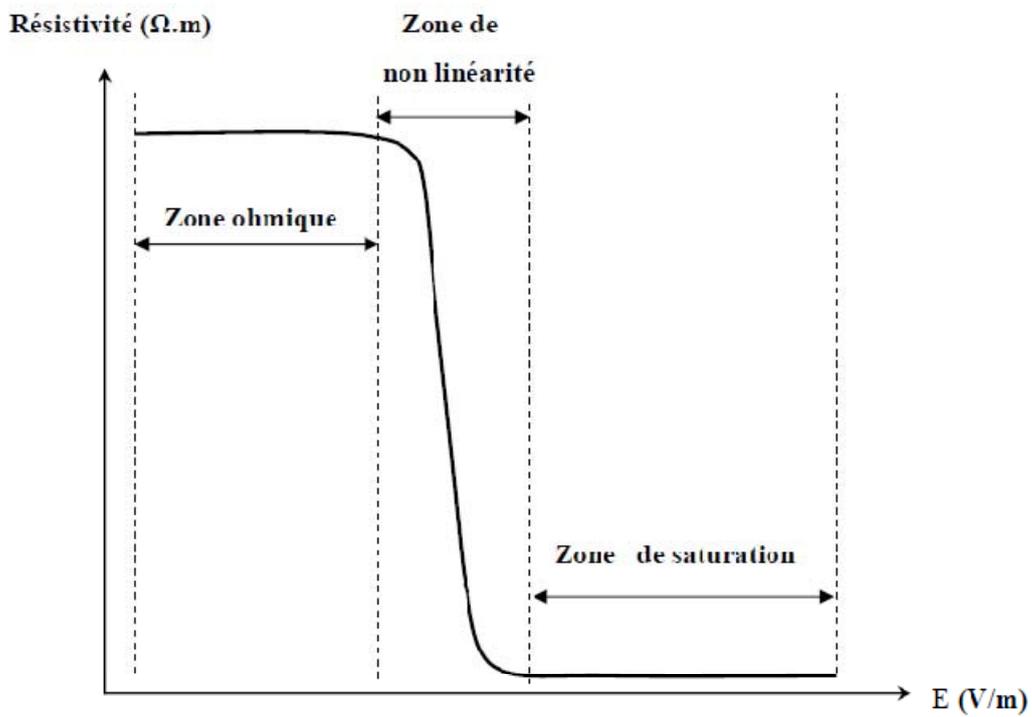


Figure 1.29 : Variation de la résistivité d'une varistance ZnO en fonction de la tension avec le champ électrique appliqué.

15.3. Courant de fuite

En régime normal, et sous la tension de service la varistance laisse un faible courant. Ce courant de l'ordre du micromètre ($10^{-6}A/cm^2$), représente le flux d'électrons qui arrivent à travers les barrières de potentiel par effet thermoïonique. Il est par conséquent tributaire de la température de la varistance (figure 1.30) .d'autre part, l'état degré de la varistance se manifeste essentiellement par une augmentation du courant de fuite et une diminution de la tension de seuil [18].

Le courant de fuite possède deux composantes : une résistive, représentant la conduction linéaire et les pertes, et l'autre capacitive représentant l'effet de la fréquence. Plus ces composantes sont élevées, plus le courant de fuite devient important.

15.4. Champ de seuil

Le champ de seuil de la varistance est la valeur de champ qui correspond à un courant de $1mA/cm^2$ par convention. Le champ de seuil définit la valeur du champ à partir de laquelle on peut considérer que la varistance est en conduction.

La valeur du champ de seuil dépend de plusieurs facteurs : la taille des grains, les dimensions de la varistance et les barrières de potentiel formées aux joints de grains .Ces facteurs impliquent implicitement la formulation chimique et le traitement thermique. La valeur du champ de seuil peut être contrôlée essentiellement par dopage avec l'oxyde d'antimoine. [16-17]

La température de frittage permet également le contrôle du champ de seuil par réduction ou augmentation de la taille de grains, plus que la température de frittage est élevée plus la taille des grains augment. On jouant donc sur la température et la durée de frittage on parvient à contrôler le champ de seuil.

Généralement pour les applications de faible puissance de l'électronique, où on se protège contre des tensions de 10 V, on cherche à réduire la valeur du champ de seuil. Par contre pour la haute tension on veut augmenter le champ de seuil afin de réduire la taille des parafoudres et par conséquent leurs points et le cout. Généralement, pour une varistance ZnO élaborée à partir d'une formulation standard, le champ de seuil est de 1 à 1,5kV/cm. Cela fait que pour protéger un réseau de 220 kV le parafoudre aura une longueur d'environ de 3m.

15.5. Coefficient de non linéarité

La vitesse d'augmentation du courant par rapport à la tension est exprimée par le coefficient de non-linéarité α qui distingue la varistance ZnO des autres résistances non linéaire. Il est défini par la pente de la courbe $I(V)$ (région de non linéarité).

Le coefficient de non linéarité est l'un des principaux indices de qualité de la varistance, puisqu'il traduit l'effet varistance dû à la non linéarité. Pour la varistance ZnO, α est compris entre 30 et 100 selon la formulation et le processus de fabrication [15], mais contrairement pour les anciennes varistances SiC où le coefficient de non-linéarité α compris entre 6 et 10.

La caractéristique non linéarité de la varistance est la résultante des contributions des barrières de potentiel aux joints de grains. L'oxyde de cobalt et de manganèse avec l'oxyde de bismuth permettent l'augmentation de 10 jusqu'à 30.

Le coefficient de non linéarité représente la pente de la caractéristique $I(V)$.

$$I = K \cdot V^\alpha$$

$$\begin{aligned} \log(I) &= \log(K \cdot V^\alpha) \\ \Leftrightarrow \log(I) &= \log(K) + \alpha \cdot \log(V) \end{aligned} \quad (1.34)$$

Les valeurs qui sont utilisées pour la détermination de α sont : $I_1=1$ mA et $I_2=10$ mA généralement. Où (I_1, V_1) et (I_2, V_2) coordonnées de deux points correspondent à I_1 et I_2 .

On remplace par les deux valeurs I_1 et I_2 dans l'équation on trouve :

$$\log(I_1) = \log(K) + \alpha \cdot \log(V_1) \quad (1.35)$$

$$\log(I_2) = \log(K) + \alpha \cdot \log(V_2) \quad (1.36)$$

On a fait la soustraction entre (1.34) et (1.34) :

$$\log(I_2) - \log(I_1) = \alpha \cdot [\log(V_2) - \log(V_1)] \Leftrightarrow \log(I_2/I_1) = \alpha \cdot \log(V_2/V_1)$$

$$\text{D'où :} \quad \alpha = \frac{\log(I_2/I_1)}{\log(V_2/V_1)} \quad (1.37)$$

15.6. Capacité d'absorption de l'énergie

Le parafoudre transforme l'énergie accompagnant cette surtension en chaleur. La chaleur maximale de l'énergie que le parafoudre est capable d'absorber avant sa destruction est défini comme étant la capacité d'absorption de l'énergie. Les phénomènes entraînant la destruction appelés modes de défaillances [19]. Sont d'origine thermomécanique.

La capacité d'absorption de l'énergie est donnée par l'équation :

$$W = \int_0^{t_f} E(t).J(t)dt \quad (\text{J/m}^3) \quad (1.38)$$

On désigne par :

t_f : le temps écoulé jusqu'à la destruction du parafoudre.

E : le champ électrique.

J : la densité de courant.

16. La microstructure des varistances ZnO

Les varistances sont obtenues par frittage. Elles se présentent sous la forme de disques compacts constitués essentiellement d'oxyde de zinc ZnO et de faibles ajoutes (0,1 à 5 % en masse) tels que l'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 , l'oxyde de bismuth Bi_2O_3 , l'oxyde de cobalt Co_3O_4 et l'oxyde de manganèse Mn_2O_3 ...etc., le matériau obtenu après frittage polycristalline et hétérogène.

La microstructure des varistances ZnO dépend essentiellement de la composition chimique et du traitement thermique utilisé pour frittage. Au cours d'un procédé de fabrication, la taille moyenne des grains de ZnO oscille autour de $15\mu\text{m}$ et d'épaisseur des joints de grains varie entre 20 et 500 \AA [14].

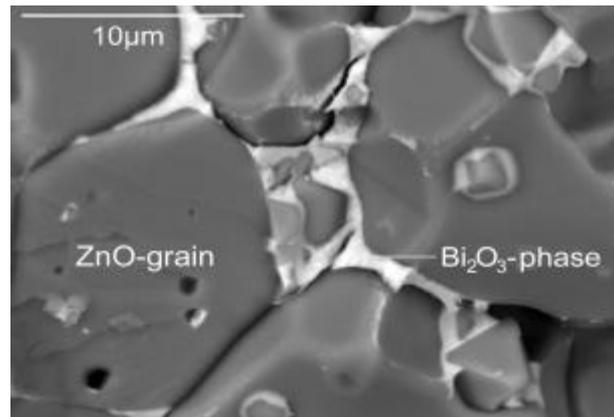


Figure 1.30 : Microstructure d'une varistance dopée de bismuth.

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB), ainsi que celles en diffraction des rayons X (DRX) montrent généralement l'existence de trois phases dans la microstructure d'une varistance ZnO. En plus des grains de ZnO, deux autres phases sont observées entre ces grains ZnO :

- La phase spinelle : $Zn_7Sb_2O_{12}$.
- La phase bi-riche ou pyrochlore : $Zn_2Bi_3Sb_3O_{14}$.
-

16.1. Différents types de joints de grains :

Les joints de grains constituent la partie active de la varistance où les barrières de potentiel se localisent. Selon leur emplacement, les zones intergranulaire peuvent être divisées en trois types de joints ;(figure 1.31).

- Type I : joints triples ou multiples.
- Type II : joints proches du contact des grains.
- Type I : le point de contact entre grains.

La phase riche en bismuth se répartit à travers la varistance sous trois grandes formes :

- Cristalline Bi_2O_3 .
- Pyrochlore $Zn_2Bi_3Sb_3O_{14}$.
- Phase riche en bismuth amorphe.

L'ensemble de ces trois phases forme un réseau tridimensionnel à travers le bloc. Il est montré que la phase cristalline riche en bismuth se localise aux joints triples ou multiples, elle ne joue alors aucun rôle vis-à-vis de la conduction du courant.

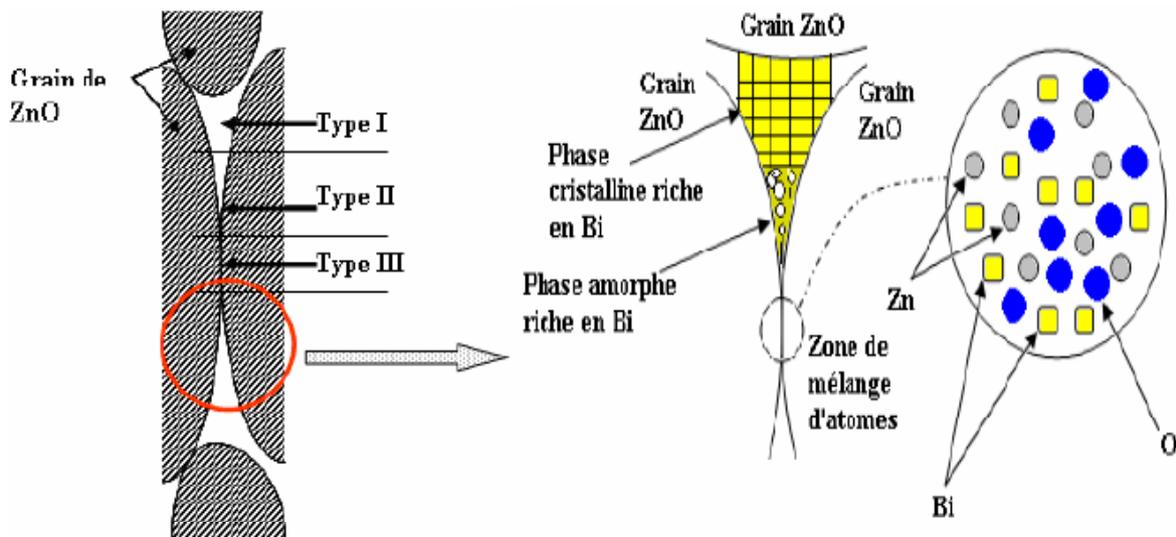


Figure 1.31 : Types de joints de grains.

La phase amorphe de bismuth entoure la phase cristalline et s'étale donc à travers le deuxième type de joints (figure 1.31). Le contact entre grains de ZnO (type III), appelé interface, se présente sous deux formes [15]: la première dans laquelle il y a absence de phase de bismuth et apparition d'une couche de mélange d'atome Zn, Bi et O figure (1.31). Cette zone de mélange, comportant des défauts, contribue à la formation des barrières de potentiel [21]. La deuxième forme dans laquelle la phase amorphe riche en bismuth s'étale continuellement à travers le contact des grains par une faible couche dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques nanomètres [15].

16.2. Représentation simplifiée de la microstructure

Il est reconnu que la base du processus de formation d'une varistance est pendant le frittage des grains de ZnO. Durant ce cycle, les différents éléments chimiques sont distribués dans la microstructure de telle sorte que la région environnante du joint de grains devient fortement résistive et l'intérieur des grains conducteur.

La largeur de cette région, joint de grains plus deux petites parties intérieures des grains adjacents dite zone déplétion est comprise entre 0,05 et 0,1 μ m. Ainsi, à chaque joint de grains, il existe une zone de déplétion à ses deux cotés et qui s'étend jusqu'à l'intérieur du grain. L'effet varistance résulte d'ailleurs de la présence de cette zone de déplétion entre les grains.

Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux bornes de la varistance ZnO, c'est dans la zone de déplétion désertée par les électrons, que se fait la chute de tension. C'est ce qu'on appelle d'ailleurs barrière de potentiel dont la valeur est comprise entre 2 et 4V par joint de grains.

L'existence de la zone de déplétion de part et l'autre du joint de grains, permet à la varistance d'avoir une symétrie de la polarité. Ceci permet à la varistance de représenter une caractéristique électrique semblable à celle de deux diode montées en antiparallèle.

La microstructure peut être approchée par une représentation simple de la distribution des grains à travers le bloc (figure 1.32). Ce modèle suppose que la varistance est un assemblage de grains de ZnO identiques, représentés par des cubes conducteurs identiques. La taille des cubes est égale à la taille moyenne D des grains de ZnO réels. Les grains sont supposés séparés l'un par rapport à l'autre, par une isolation, partout dans la varistance, de la même façon. La séparation ne serait pas une couche physique entre les grains, mais constituée aussi de leurs zones de déplétion, de longueur totale L_0 .

La tension de seuil d'un joint de grains étant V_{gb} , celle de la varistance V_s est facilement calculée à partir de l'expression suivante :

$$V_s = n_j \cdot V_{gb} \quad (1.39)$$

Où n_j est le nombre de joints entre les deux électrodes de la varistance.

L'épaisseur des joints de grains est très petite par rapport à la taille moyenne D des grains de ZnO. Alors si d : est l'épaisseur de la varistance, n_j se calcule aisément tel que :

$$n_j = \frac{d}{D} - 1 \quad (1.40)$$

Généralement, d est beaucoup plus élevé que D , et on peut négliger 1 devant le rapport d/D , tel que V_s peut être calculée par :

$$V_s = \frac{d}{D} \cdot V_{gb} \quad (1.41)$$

Une des propriétés des varistances ZnO est la valeur de seuil par joint de grains V_{gb} qui est toujours compris entre 2V et 4V. On admet généralement une tension moyenne de 3V. Par conséquent le champ de seuil E_s est approximativement égal à :

$$E_s \approx \frac{3}{D} \quad (1.42)$$

L'équation (1.39) ne donne qu'une estimation de seuil car le courant passe en réalité par des chemins préférentiels. Ces chemins comportent le minimum de joints de grain et qui peuvent être en plus bon ou mauvais.

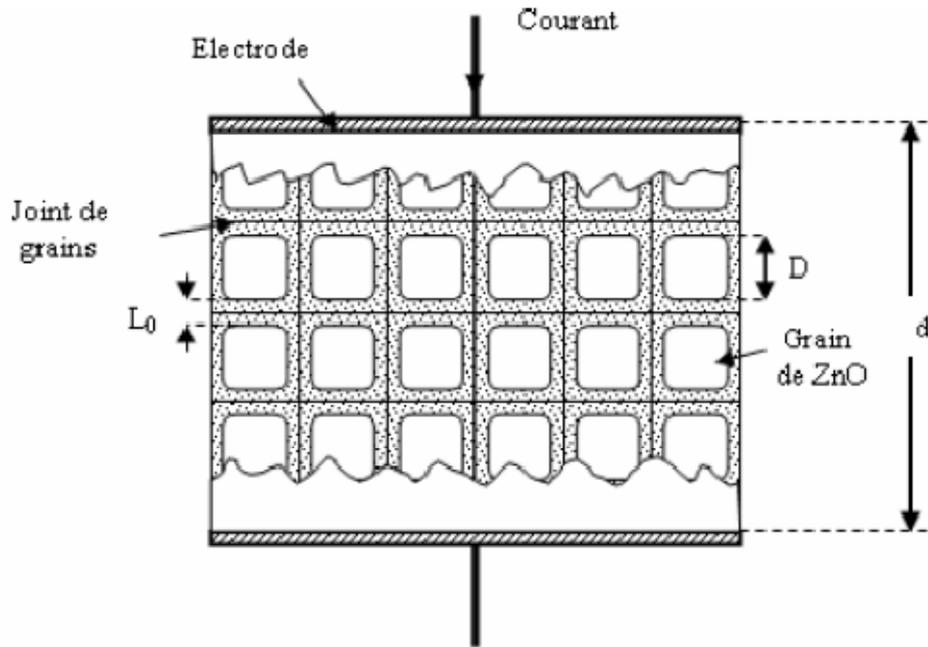


Figure 1.32 : Représentation simplifiée de la microstructure.

16.3. Circuit électrique équivalent

De la corrélation entre la microstructure et la caractéristique $I(V)$, il a été déduit que les courants faibles (inférieurs à 10^{-3} A/cm²) dans la région linéaire sont contrôlés par l'impédance des joints de grains.

Alors que les courants forts (supérieurs à 10^3 A/cm²) dans la région de saturation sont contrôlés par la résistance des grains. Entre les deux il y a bien la résistance non linéaire.

La chute de tension dans le joint de grains possède deux composantes [20].

- Résistive.
- Capacitive.

Le modèle électrique d'une micro varistance couramment admis pour représenter une barrière et les deux grains adjacents comporte une résistance R_g qui représente les grains de ZnO, en série avec un bloc R_j et C_j en parallèle qui simule le joint de grain et représentent son comportement, ces deux éléments varient à la fois avec la tension V , la fréquence f et la température T .

L'inductance série L_e équivalent est ajoutée pour la simulation des régimes transitoires. Cette inductance traduit un effet inductif qui se manifeste par un retard du courant sur la tension qui est observé lors d'un choc de courant de forte amplitude.

Le circuit équivalent de la microstructure de la varistance ZnO est illustré par le schéma électrique équivalent de la figure (1.33).

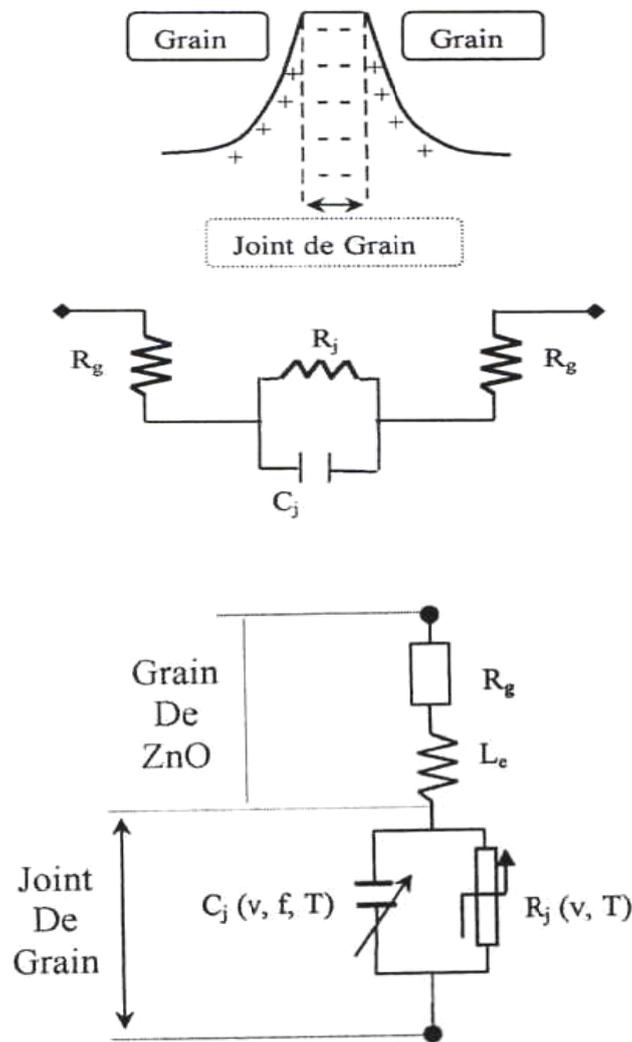


Figure 1.33 : Schéma équivalent de la varistance ZnO.

17. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents types de surtensions qui peuvent surgir dans les réseaux électriques. Ces surtensions sont classifiées selon leurs origines internes ou externes, ou temporaires, transitoires, ou selon leurs durées, leurs amplitudes.

Nous avons aussi montré quelques moyens utilisés pour la protection contre les surtensions,

La principale propriété des varistances ZnO est le fort non linéarité de leur caractéristique de leur caractéristique courant-tension $I(V)$ ou invariablement $J(E)$, la varistance ZnO a permis la suppression des éclateurs dans la construction des parafoudres et avec eux le courant de suite .

Chapitre 2

Etudes expérimentales

1. Introduction

L'utilisation du logiciel ATP (Alternative Transient Program) est indiquée chaque fois qu'il s'agit d'effectuer des simulations sur des phénomènes électromagnétiques non-linéaires, soit une fonction analytique, soit les points discrets issus des mesures [8].

2. Caractéristique électriques

2.1. Présentation de la manipulation

2.1.1. Matériel utilisé

Le matériel pour la manipulation est :

- Moules cylindriques en acier inoxydable de différents diamètres (20, 25, 30,40 mm).
- Barquette, jarres, béciers, pinceaux.
- Spatules.
- Broyer.
- Balance kern ou scout pro.
- Tamiseuse vibrante (différents diamètres : 60 μm , 80 μm , 90 μm , 100 μm , 125 μm).
- Etuve Heraeus.
- Presse mécanique Uniaxiale.
- Four scientifique avec programmeur intégré.
- Polisseuse.

2.1.2. Plan de l'étude expérimentale

L'étude du rôle de l'antimoine et de la température de frittage par rapport au champ de seuil des varistances ZnO.

La première partie du travail expérimental est la préparation des échantillons selon différents teneurs d'antimoine utilisé dans la composition chimique de départ différentes températures de frittages.

Deux moyens expérimentaux existent pour détermination le champ de seuil.

1. La caractérisation courant-tension des échantillons permet le relevé de la courbe I(V). Le champ de seuil est alors déterminé pour une densité de courant égale $1\text{mA}/\text{cm}^2$.
2. L'analyse des photos des microstructures des échantillons qui nous permet de déterminer la taille moyenne des grains à partir de laquelle on calcule le champ de seuil.

2.2. La préparation des échantillons

2.2.1. Composition chimiques

Le tableau (2.1) présentent un exemple de cinq compositions chimiques de varistances avec différents pourcentages de Sb_2O_3 ont été utilisées.

	Compositions chimiques (mol %)
A	1 mol % Bi_2O_3 + 1 mol % Co_3O_4 + 0.5 mol % Cr_2O_3 + 1 mol % Mn_2O_3
S₁	96 mol % ZnO + A + 0.5 mol % Sb_2O_3
S₂	95.5 mol % ZnO + A + 1 mol % Sb_2O_3
S₃	94.5 mol % ZnO + A + 2 mol % Sb_2O_3
S₄	93.5 mol % ZnO + A + 3 mol % Sb_2O_3
S₅	92.5 mol % ZnO + A + 4 mol % Sb_2O_3

Tableau 2.1 : Les compositions chimiques en pourcentages.

2.2.2. Principales propriétés physico-chimiques des oxydes utilisés

Les oxydes se présentent sous forme de poudres cristallisées fournis par leurs fabricants, la taille moyenne des cristaux est variables selon les oxydes mais reste inférieure à $10\mu\text{m}$; elle est de $0,1\mu\text{m}$ pour l'oxyde de zinc ZnO qui est l'élément le plus absorbant.

	Formule moléculaire	Masse molaire	Température de fusion	Rayon cation (nm)	couleur
Oxyde de Zinc	ZnO	81.403	1975	0.074	Blanc
Oxyde de Bismuth	Bi ₂ O ₃	465.942	825	0.17	Jaune
Oxyde de Manganèse	Mn ₂ O ₃	157.857	535	0.08	Noir
Oxyde de Cobalt	Co ₃ O ₄	240.774	1935	0.078	Noir
Oxyde de Chrome	Cr ₂ O ₃	151.971	2435	0.052	Vert
Oxyde d'Antimoine	Sb ₂ O ₃	291.501	656	0.09	Blanc

Tableau 2.2 : principales propriétés physico-chimiques des oxydes.

2.2.3. L'influence de la vitesse de refroidissement sur les propriétés électriques de ZnO.

La microstructure et les propriétés électriques des varistances ZnO sont influencées par la vitesse de refroidissement [24, 25]. En effet c'est durant le refroidissement que se manifestent les divers processus induisent la formation des barrières de potentiel.

Une vitesse de refroidissement adéquate pourrait aider à obtenir de bonnes propriétés non linéaires de la varistance ZnO. Par exemple pour une vitesse de 240°C/h les valeurs du coefficient de non linéarité et du champ de seuil serait maximales [24, 25].

Malgré la connaissance actuelle des mécanismes des dopants, il reste très difficile de pronostiquer toutes les conséquences de leur adjonction. Il est fort probable que lorsqu'un élément quelconque améliore telle propriété particulière, il présentera tel autre inconvénient relatif à une autre propriété [26].

Cependant, les dopants ont globalement un effet inhibiteur de la croissance des grains ZnO au cours de la décomposition [27]. Donc plus le nombre d'additifs est élevé, plus l'inhibition de la croissance des grains ZnO est importante [28].

3. Méthode de fabrication

La méthode classique de l'élaboration des échantillons est passée par les étapes suivantes :

3.1. Pesée des poudres d'oxydes

Les compositions chimiques sont généralement données par le pourcent (%) molaire des oxydes. Pour effectuer la pesée il faut d'abord déterminer le pourcent massique en grammes. Par exemple :

Dopants	Masse atomique
Zn	65.409
O	15.9939
Bi	208.9803
Sb	121.760
Cr	51.9961
Mn	54.938
Co	58.933

Tableau 2.3 : Masse atomiques des dopants.

Pour une formulation classique de 50g (tableau 2.4) on a : 1 mol % Sb_2O_3

Eléments	ZnO	Bi_2O_3	Sb_2O_3	Co_3O_4	Mn_2O_3	Cr_2O_3
Masse molaire	81.403	465.942	291.501	240.774	157.857	151.973
Pourcentage molaire (mol %)	95.5	1	1	1	1	0.5
Masse (g)	43.161	2.5865	1.618	1.3365	0.876	0.4218

Tableau 2.4 : Formulation classique.

3.1.1. Broyage

Après la pesée, les oxydes seront mis dans une jarre avec quelques billes agates afin d'obtenir un meilleur mélange des constituants dans le broyeur en phase humide et par l'adjonction de l'eau distillée et liant organique, cette opération dépasse les 24 heures.

3.1.2. Séchage

Après l'opération de broyage les poudres d'oxydes on obtient un mélange boueux appelée « barbotine ». Le mélange obtenu est séché dans une étuve pour assurer l'évaporation complète de l'eau (150 à 180 °C à une durée de 12 heures environ).

La poudre est plus ou moins agglomérée, ce qui nécessite un second broyage à sec.

3.1.3. Tamisage

La barbotine séché et rebroyée est ensuite passée dans une tamiseuse vibrante afin d'obtenir des particules sphérique de taille identiques qui présentent une très bonne aptitude au pressage cette opération améliore les propriétés rhéologique de la poudre pour faciliter le remplissage des moules et l'opération de pressage.

3.1.4. Pressage

Après tamisage la taille moyenne des particules est en générales 100 μm , une quantité de poudre dont le poids varie selon le gabarit à donner à l'échantillon est versée dans une matrice cylindrique et puis pressée à 350 kg/cm^2 .

Les pastilles ainsi obtenues sont des échantillons crus, très fragiles et de couleur grise, vu qu'elle ne supporte pas les contraintes mécaniques donc il faut faire un cycle de frittage, pour rendre l'échantillon à consolider.

3.1.5. Frittage

Les échantillons crus ainsi réalisées sont alors frittés à haute température (1100 -1350 °C) de façon à (voir figure 1.27) :

- Densifier le la céramique.
- Former la structure.
- Faire diffuser les différents dopants dans grain de ZnO.

C'est la phase la plus importante dans la fabrication des varistances, elle met en jeu un transfert de matière et possède une influence sur la qualité du produit final [38]. Elle fait intervenir des réactions physico-chimiques complexes entre les différents constituants et permet l'élaboration de la structure dont dépendront les propriétés du matériau.

Le cycle de frittage comprend :

1. Une première phase de dégraissage jusqu'à 400°C.
2. Une deuxième phase à la température élevée au cours laquelle le frittage est réalisé
 - Une première montée jusqu'à la température de fusion du bismuth (presque 820°C) donc un palier pour permettre la réalisation du frittage en phase liquide.
 - Une deuxième montée jusqu'à la température de frittage.
 - le refroidissement jusqu'à la température ambiante avec une vitesse bien choisie termine le cycle.

Lors du frittage une phase liquide riche en bismuth favorise grâce à son pouvoir dissolvant élevé la répartition uniforme des autres dopants.

3.1.6. Métallisation des électrodes

Après le frittage les échantillons massifs mais pour assurer le meilleur contact lors des essais électriques, on procède à un dépôt d'électrodes sur les deux faces des échantillons qui sont préalablement polies.

Le dépôt est à base d'un matériau conducteur sous forme solution composée essentiellement d'argent nickel (Ag/Ni) ou nickel chrome (Ni/Cr) permet la bonne fixation des électrodes.

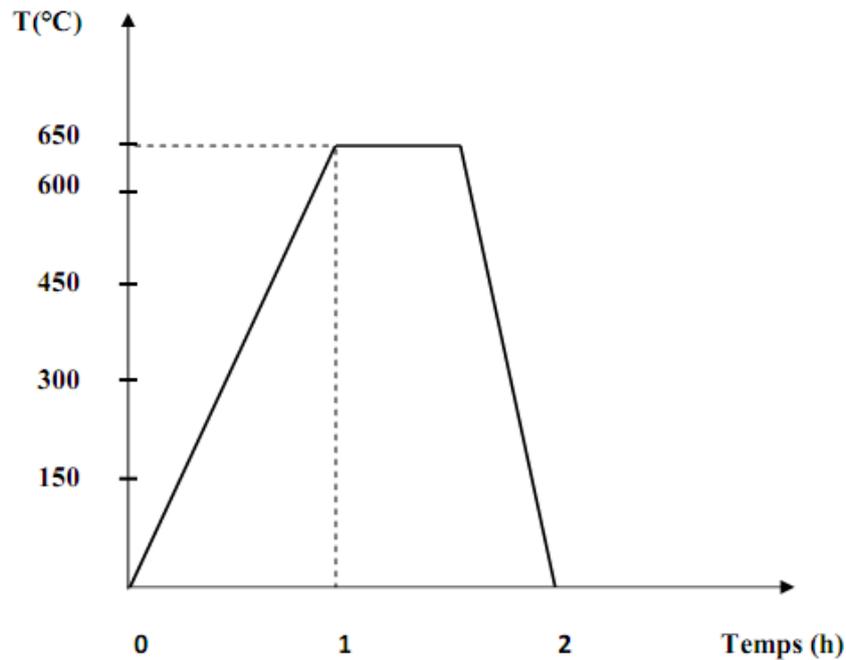


Figure 2.1 : Cycle thermique de recuit.

3.1.7. Enrobage

Ensuite pour protéger la surface courbe de la varistance contre les agressions chimiques et pour empêcher les contournements lors des essais, il faut procéder à un enrobage latéral extérieur en utilisant une couche diélectrique en résine époxy.

La technique du revêtement consiste à chauffer l'échantillon à 1500°C puis à le plonger dans un milieu dont le résiné en suspension et en prenant soin de masquer les électrodes pour éviter de les couvrir.

Après un traitement thermique à 120°C qui assure une polymérisation complète du résiné ; l'échantillon est alors prêt pour des essais électriques.

4. Relèves des caractéristiques I(V)

Caractériser une varistance revient à déterminer ses caractéristiques électriques :

- la tension de seuil.
- le courant de fuite.
- le coefficient de non linéarité.
- la capacité d'absorption de l'énergie.

4.1. Mesure à faible courant :

L'expérience est réalisée généralement en courant continu, et pour des courants inférieurs à 10 mA. La figure (2.2) représente le schéma de montage.

Pour les courants inférieurs à 10 μA un temps de relaxation du matériau (environ 2 min) doit être respecté afin d'éviter d'enregistrer le régime transitoire dû à la polarisation. Mais pour les courants supérieurs à 10 μA , la mesure est faite en temps réel et très vite afin d'éviter l'échauffement de l'échantillon. A l'approche du 1 mA, 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 mesures. Une seule mesure suffit entre 1 mA et 10 mA et revenir à zéro volt le plus vite possible.

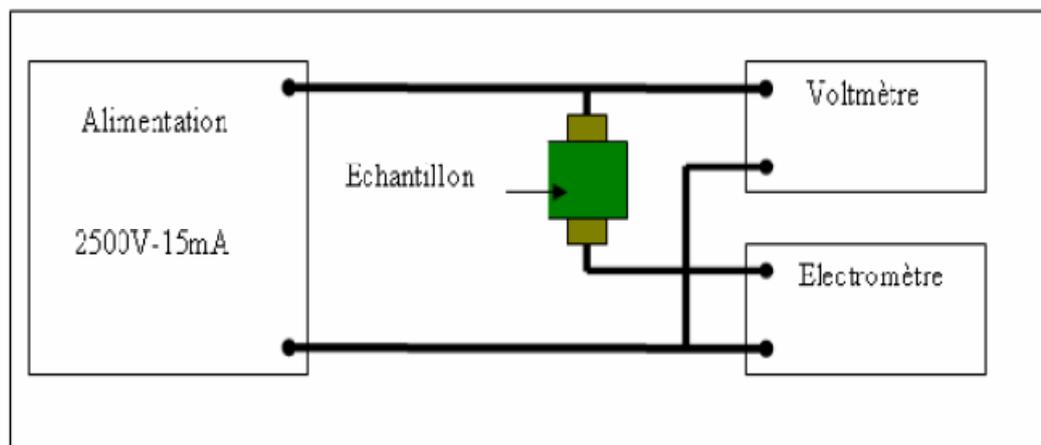


Figure 2.2 : Montage de mesure pour les faibles courants.

4.2. Mesure à forts courants

Pour les courants qui dépassent 10 mA la mesure est faite en impulsionnel afin d'éviter l'échauffement excessif du matériau .Un exemple du montage de mesure est donné par la figure (2.3) [21].

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 demi heure).

L'onde 8/20 μ s est généralement utilisée pour la caractérisation des varistances avec une amplitude généralement utilisées de 1,5kA, 3kA ,5kA ; selon les possibilités du générateur d'onde de choc qui peuvent atteindre 60 kA.

Pour chacun des chocs on relève la valeur de crête de la tension et du courant de décharge sur l'écran d'un oscilloscope numérique à mémoire (figure 2.4).

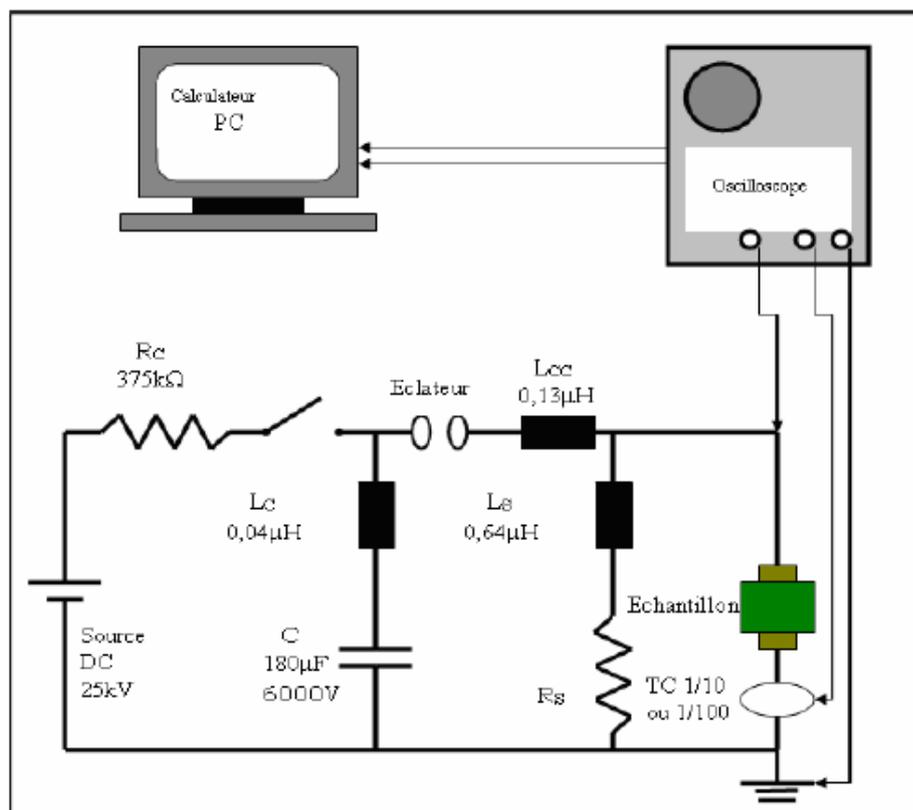


Figure 2.3 : Montage de mesure en impulsionnel [21].

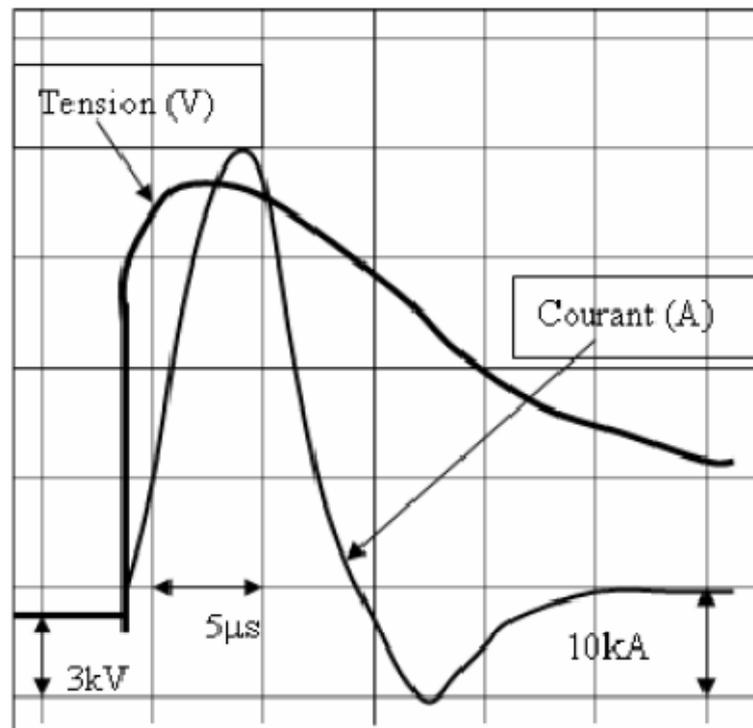


Figure 2.4 : Forme d'onde de la tension et du courant en régime impulsionnel [21].

5. Utilisation de l'logiciel ATP-EMTP

Les réseaux électriques sont de plus en plus complexes et sophistiqués. Leur exploitation et leur planification demandent ainsi des outils performance.

L'EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) est un logiciel de simulation qui permet de reproduire les phénomènes transitoires observés sur les réseaux électriques et de distribution. Ce logiciel, qui constitue le standard international en la matière, offre des modèles assurant la représentation de tels phénomènes dans la gamme la plus large de fréquences, l'EMTP est le seul logiciel capable de solutionner des problèmes de très grande taille, allant du courant continu jusqu'à la foudre. Les modèles de l'EMTP sont validés par des tests en laboratoires et des mesures dans les réseaux existants.

L'ATP (Alternative Transient Program) est une version du fameux logiciel EMTP. Il est actuellement le plus utilisé pour la simulation des régimes transitoires rapides dans les

réseaux électriques pour sa disponibilité d'une part et d'autre part pour sa puissance de calcul et la richesse de sa bibliothèque de modèles.

6. Réalisation des essais avec ATP

6.1. Surtension transitoires de manœuvres

Ce sont les surtensions qui résultent de la modification de la topologie du réseau suite à une manœuvre (ouverture ou fermeture du disjoncteur) quelle soit volontaire ou involontaire. Ces surtensions se caractérisent par une amplitude et une fréquence relativement élevées.

Les manœuvres d'interrupteurs ou de disjoncteurs entraînent des changements dans les configurations électriques des réseaux, ces changements provoquent des surtensions plus ou moins élevées.

On représente sur la figure (2.5) la tension aux bornes du disjoncteur D au moment de l'ouverture, pour les données suivantes :

Tension de la source : $V_s = 220 \text{ kV}$.

Charge : $r = 52.2 \Omega$, $L = 85.7 \text{ mH}$.

$$R = 2 \Omega, C = 10,7 \mu\text{F}$$

Dans le cas suivant, on a fermé le disjoncteur D à $t = 0,08 \text{ s}$; La fermeture du disjoncteur provoque une surtension aux bornes de l'interrupteur, ainsi que l'ouverture du disjoncteur aussi provoque une surtension.

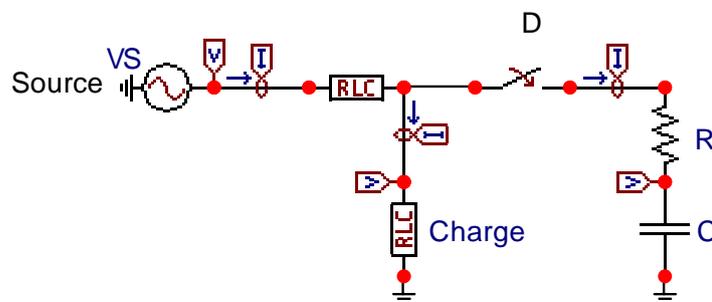


Figure 2.5 : Schéma de principe d'un circuit de manœuvre.

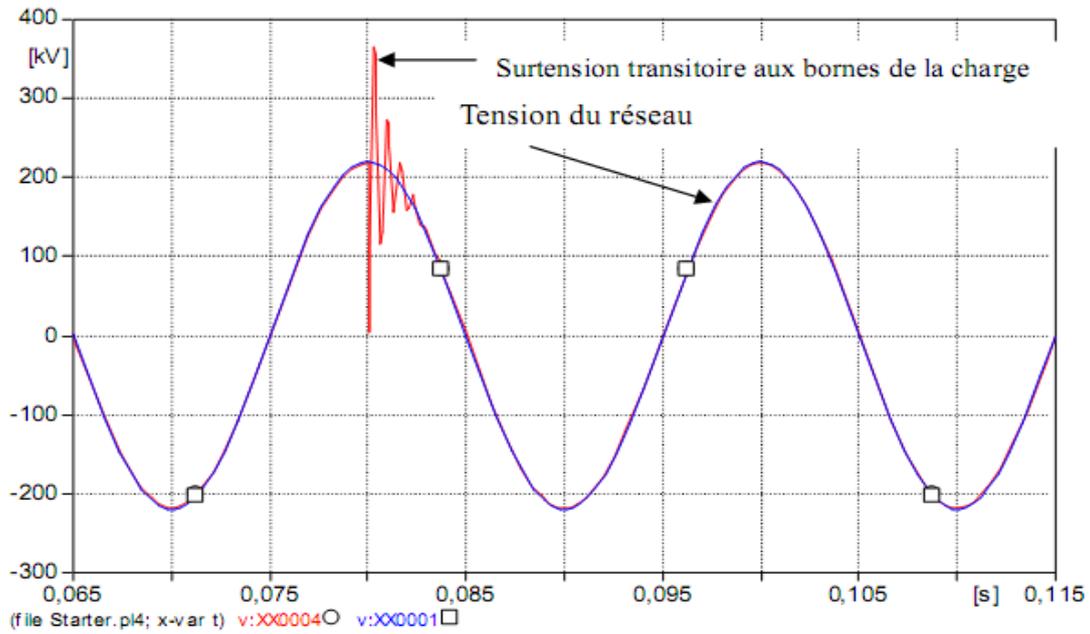


Figure 2.6 : Courbe de la tension en fonction de temps.

On remarque l'apparition ,dès l'ouverture du disjoncteur la surtension de manœuvre de fréquence très élevée .l'ouverture provoque une surtension aux bornes de l'interrupteur.

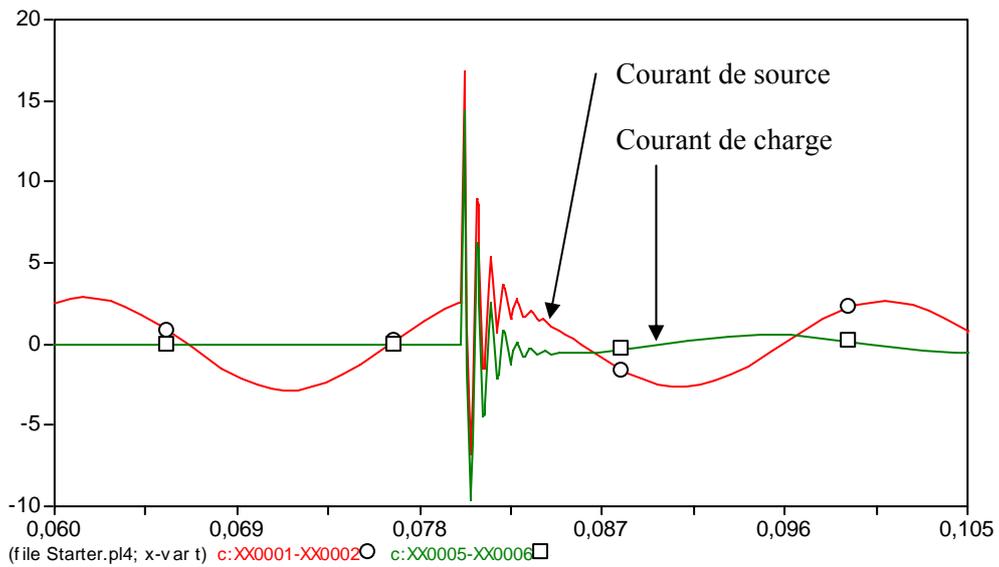


Figure 2.7 : Courbe du courant en fonction du temps.

7. Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs

7.1. Coupure sur une charge capacitive

Les surtensions se caractérisent généralement par un échelon de tension d'une amplitude de 1,3 à 3,5 fois la tension normal du réseau, les surtensions de manœuvres sont moins dangereuses que celle de foudre.

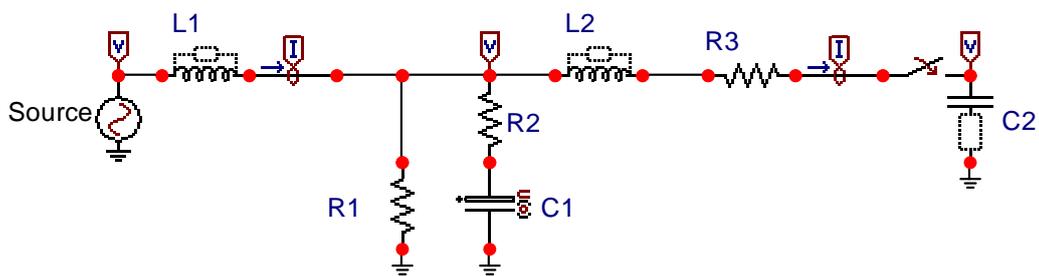


Figure 2.8 : Schéma électrique pour l'étude des surtensions.

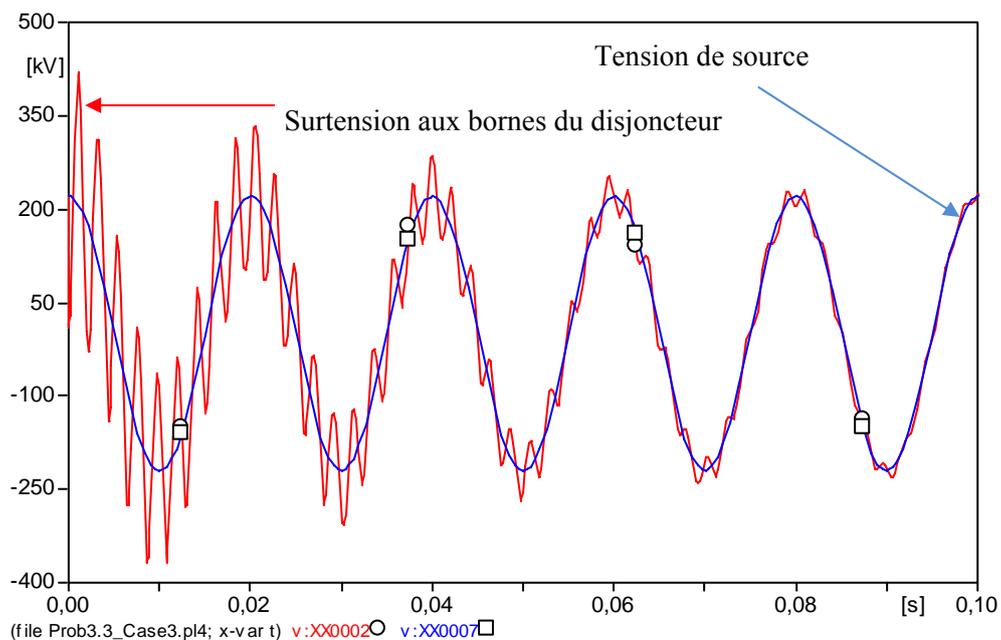


Figure 2.9 : Surtension aux bornes de disjoncteur.

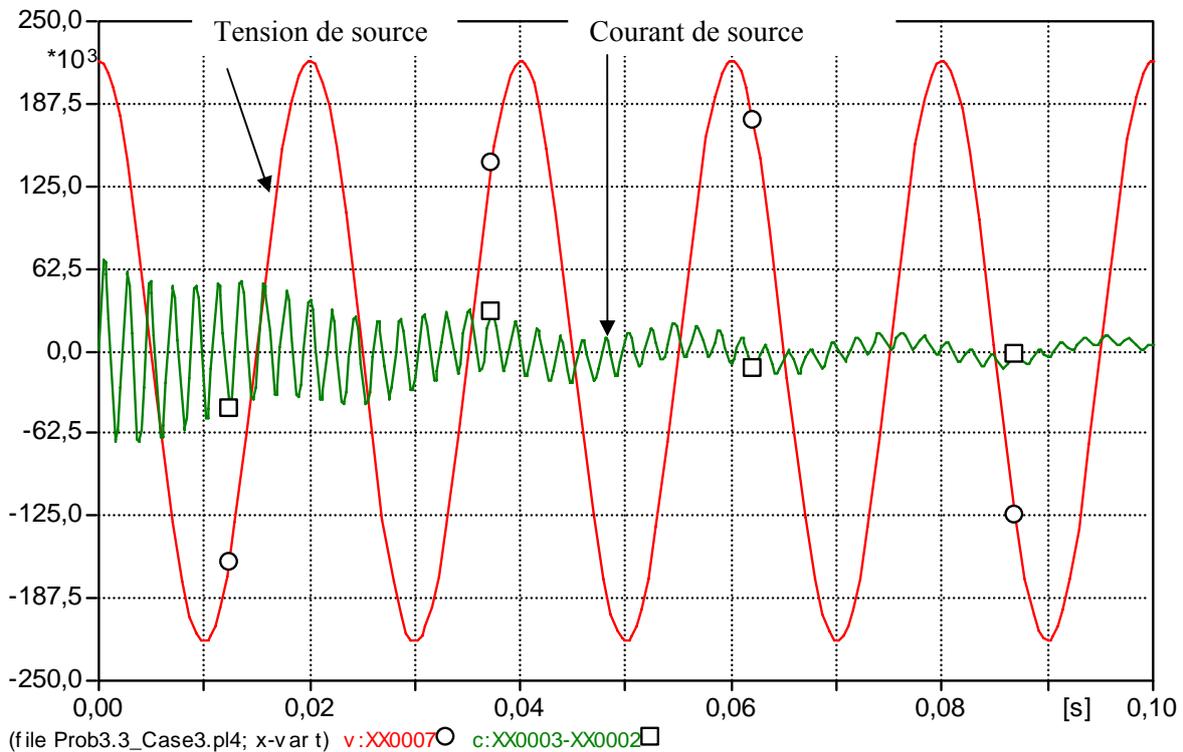


Figure 2.10 : Schéma représente la tension et le courant de source.

7.2. Surtension par ferrorésonance

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple) [4].

La ferrorésonance est un phénomène de résonance qui se manifeste, selon la configuration du réseau, par des surintensités ou des surtensions. A la différence de la résonance naturelle entre capacité et inductance simples, la ferrorésonance ne se produit que lorsqu'une capacité est mise en série ou en parallèle avec une inductance saturable ou non linéaire. C'est à cause de ce non linéarité que le circuit peut avoir plusieurs points de fonctionnement, stable, ou instable, normale ou ferrorésonant. Cela dépend de plusieurs facteurs, mais essentiellement de la tension de source, des conditions initiales et des paramètres du réseau [29].

Le circuit représenté par le schéma de la figure (2.12), représente les tensions aux nœuds 1, 2, 3, 4 et 5.

Il est impossible de négliger la saturation dans le circuit de la figure (2.12), on se préfère à la courbe $\phi(I)$, qui possède la même allure que la courbe d'aimantation $B(H)$, et dont on représente la figure (2.11).

Le tableau suivant représente la relation entre le flux et le courant électrique dans la bobine.

I(A)	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	4.6	12.8	25.5	51.2	102.4
ϕ(Wb-tour)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34

Tableau 2. 4 : La variation du flux en fonction du courant.

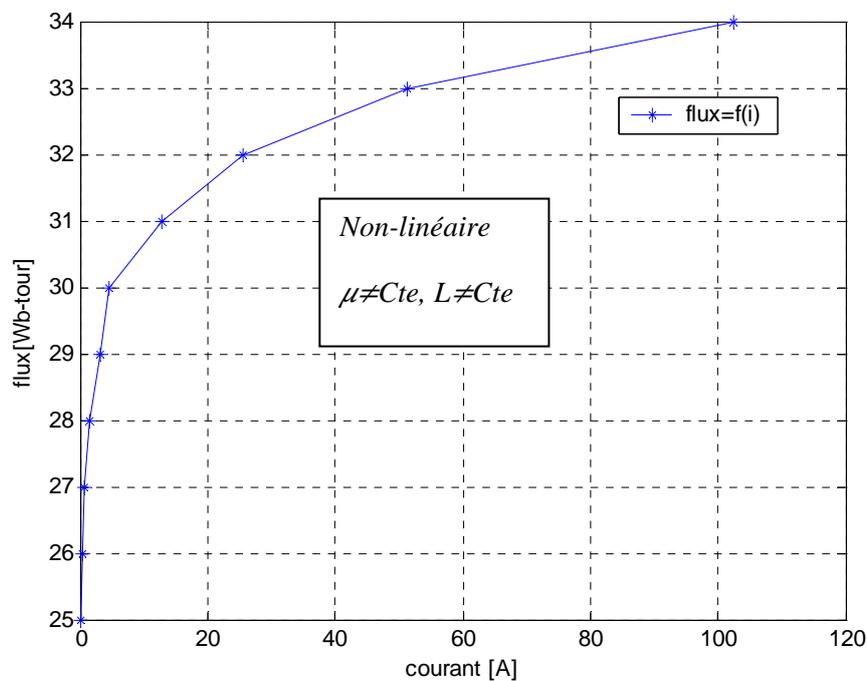


Figure 2.11 : La caractéristique $\phi(I)$.

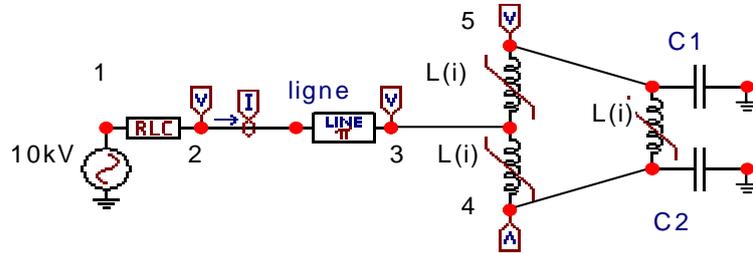


Figure 2.12 : Schéma d'un circuit électrique.

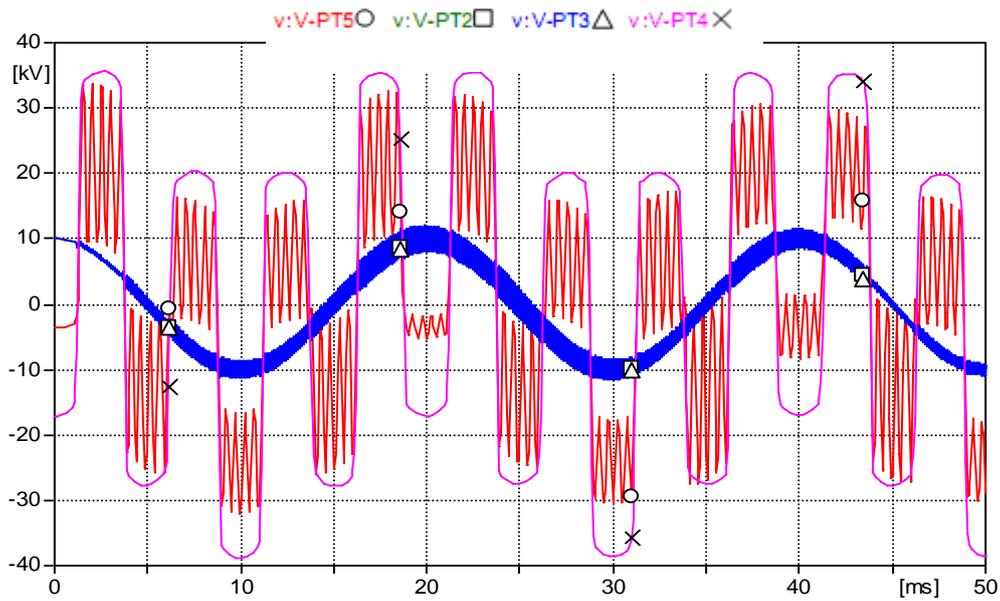


Figure 2.13 : Schéma de la ferrresonance.

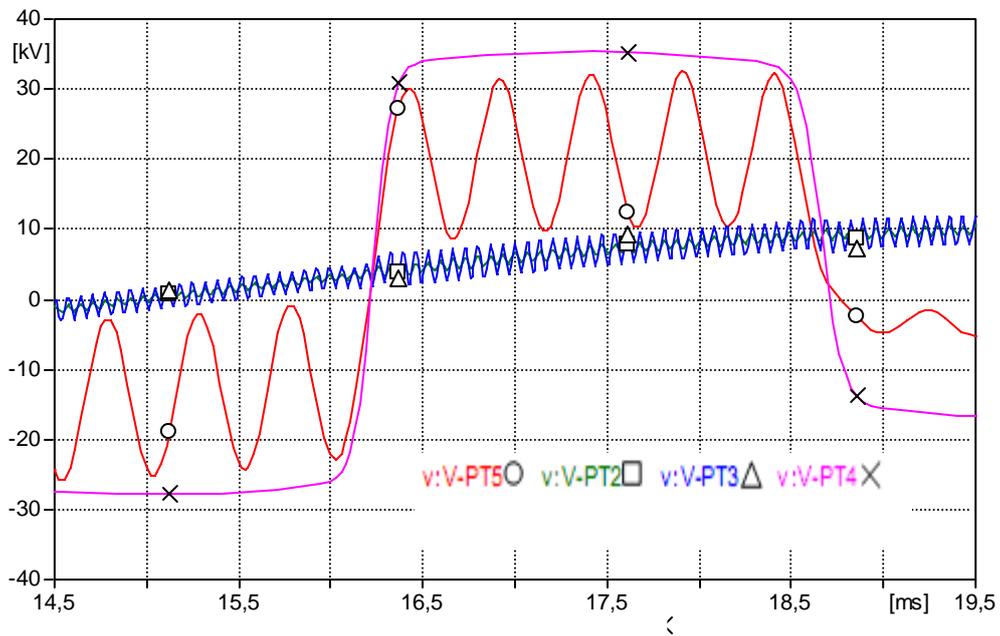


Figure 2.14 : Les variations des tensions en fonction de temps.

(t =14.5 à 19.5 ms)

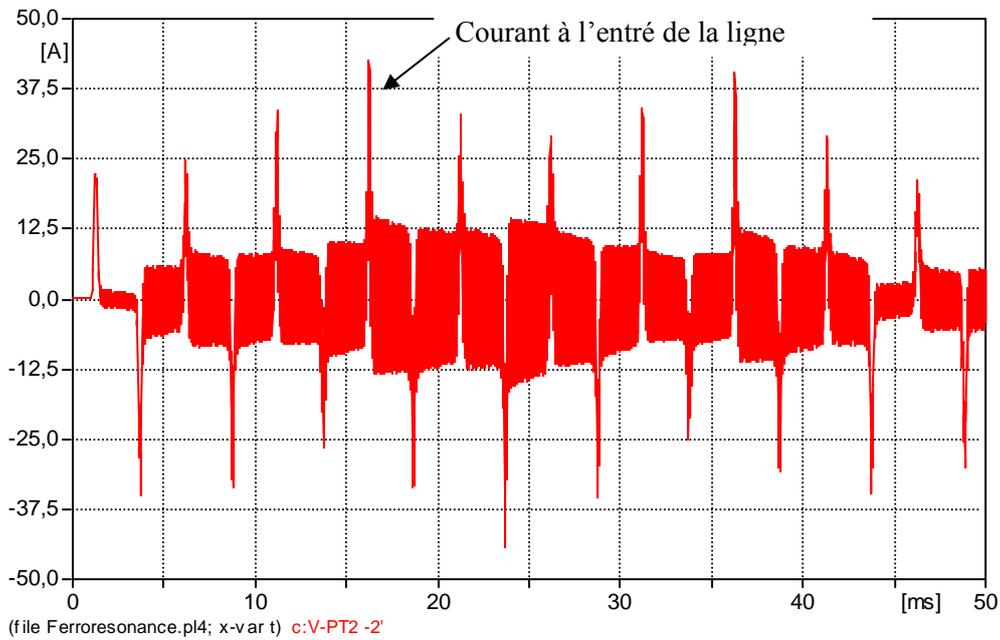


Figure 2.15 : L'intensité de courant du générateur.

8. Conclusion

La **ferrorésonance** est un phénomène de résonance non linéaire qui peut affecter les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Elle désigne tous les phénomènes oscillatoires, le plus souvent périodiques, qui se manifestent dans un circuit électrique composé d'une part d'une ou de plusieurs inductances non linéaires (comportant des matériaux ferromagnétiques saturables) et d'autre part d'un réseau comprenant au moins une capacité alimentée par une ou plusieurs sources de tensions généralement sinusoïdales.

Chapitre 3

Etat de l'art

1. Introduction

Les systèmes d'énergie électrique peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature. Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique. Par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protections très performants et fiables. Chose qui n'est pas facile à atteindre et il a fallu des décennies pour arriver au moyen le plus utilisé actuellement qui est le parafoudre à base d'oxyde de zinc [22]. Dans le transport d'énergie électrique les chercheurs ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tension.

Dans le transport d'énergie électrique les chercheurs ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tension [23].

Le principe de fonctionnement des parafoudres consiste à absorber l'énergie de surtension et la transformer en chaleur. Mais en raison des phénomènes thermomécaniques, qui se déroulent lors du fonctionnement, le parafoudre peut être détruit à une certaine quantité d'énergie absorbée. On désigne alors les limites de fonctionnement du parafoudre par la capacité d'absorption d'énergie, que l'on définit par l'énergie qu'il est capable d'absorber avant sa destruction.

2. Méthode de simulation :

L'évolution spatiotemporelle de la température est un facteur décisif dans la défaillance des parafoudres. Sa détermination constitue une étape très importante dans la modélisation des caractéristiques des varistances ZnO.

La détermination de la distribution de la température nécessite la résolution de l'équation de chaleur.

La modélisation doit tenir compte à la fois des propriétés de conduction de l'oxyde de zinc, mais aussi de la dépendance de la résistivité du matériau à la température [5].

$$\operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad}(T)) + Q = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

k : la conductivité thermique du matériau ; pour l'oxyde zinc (ZnO), $k = 5.69$ (W/m°C).

T : température (°C).

ρ : densité du matériau (500 kg/m³).

C_p : chaleur massique (5500 J/kg°C).

Q : pertes volumique par effet Joule données par :

$$Q = E \cdot J \quad (3.2)$$

On a :

$$J = \sigma \cdot E \quad (3.2)$$

Donc :

$$Q = \sigma \cdot E^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (3.3)$$

Avec : E : champ électrique (V/m).

σ : la conductivité électrique en ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

J : densité de courant (A/m^2)

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_c}{K_B \cdot T}\right) \quad (3.4)$$

Avec K_B : constante de Boltzmann ($0.8 \cdot 10^{-5}$ eV/°K).

W_c : énergie d'activation (≈ 0.8 à 1 eV).

σ_0 : Conductivité initiale.

On note que la température et la conductivité électrique sont deux grandeurs interdépendantes via les pertes.

La varistance est assimilée à un cylindre de rayon R et de hauteur L . Pour simplifier le problème, nous supposons un flux de chaleur radial et une conductivité thermique uniforme. Sous ces hypothèses l'équation (3.1) devient :

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q(r, t) = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

L'échange de chaleur avec le milieu ambiant se fait par convection et par rayonnement. La condition aux limites est représentée par l'équation :

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_R = Q_c + Q_r = \gamma(T_s - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon(T_s^4 - T_a^4) \quad (3.6)$$

Q_c : chaleur transmise par convection

Q_r : chaleur transmise par rayonnement (souvent négligée).

T_s : Température à la surface de varistance.

T_a : Température ambiante.

$$\gamma = h_c \cdot S \quad (3.7)$$

h_c : Coefficient de convection naturelle (coefficient d'échange).

S : Surface latérale de la varistance.

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, Constante de Boltzmann.

$\varepsilon = 0.8$, émissivité totale hémisphérique ou facteur d'émission de surface [8].

2.1. Solution de l'équation de chaleur

La solution analytique de l'équation de chaleur (3.5) est obtenue généralement par la méthode du développement en série de fonctions propres [30, 31, 32]. Cependant la présentation de la solution sous forme d'une série infinie pose essentiellement le problème de convergence et du temps de calcul. On préfère plutôt les méthodes numériques, éléments finis ou différences finis.

Dans ce travail nous adoptons la solution numérique de l'équation de chaleur par la méthode de différences finis explicite proposée [8].

Une méthode est explicite lorsque l'une des inconnue T_n^{i+1} (i indice du temps, n indice d'abscisse) peut être exprimée directement en fonction des termes connues T_n^i , si non la méthode est dite implicite.

Le principe de la méthode de différences finis repose sur la notion fondamentale de la dérivée. Les accroissements infiniment petits sont remplacés par des accroissements finis Δu et Δt . Ainsi nous avons :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_n^i = \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial u}\right)_n^i = \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta u} \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial u^2}\right)_n^i = \frac{T_n^{i+1} - 2T_n^i + T_{n-1}^i}{(\Delta u)^2} \quad (3.10)$$

2.2. Discrétisation par la méthode des différences finis

En introduisant le changement de variables :

$$T = T_a \cdot X, \text{ et } u = r^2/2 \quad ; \quad d'où : du = r.dr$$

Il vient :

$$k \cdot T_a \frac{\partial}{\partial u} \left(2u \frac{\partial X}{\partial u} \right) + Q = \rho \cdot c_p \cdot T_p \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.11)$$

A une variation de r de 0 à R correspond dans l'espace transformé, une variation de u comprise entre 0 et $R^2/2$. Découpons cet intervalle en m tranche d'égales épaisseurs $R^2/2m$, la variable X (respectivement Q) dans la $n^{ième}$ tranche sera notée X_n^i (respectivement Q_n^i).

Où i représente l'indice de la $i^{ième}$ itération dans le temps.

Intégrons l'équation (3.11) dans la tranche n à l'instant $i \cdot \Delta t$, Δt étant le pas temporel, il vient, en considérant toutes les variables restent constantes pendant Δt :

$$2. k. T_a \cdot \int_{\frac{(n-1)R^2}{2m}}^{\frac{mR^2}{2m}} d \left[u \left(\frac{\partial X}{\partial u} \right)_n^i \right] + Q_n^i \cdot \int_{\frac{(n-1)R^2}{2m}}^{\frac{mR^2}{2m}} du = \rho \cdot c_p \cdot T_a \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_n^i \int_{\frac{(n-1)R^2}{2m}}^{\frac{mR^2}{2m}} du \quad (3.12)$$

Les termes dérivés sont ensuite approchés par la méthode de différences finis explicite comme suit :

$$\left(\frac{\partial X}{\partial U} \right)_n^i = \frac{X_n^{i+1} - X_n^i}{\Delta U} \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_n^i = \frac{X_n^{i+1} - X_n^i}{\Delta t} \quad (3.14)$$

On obtient :

$$\Delta t \cdot Q_n^i - \frac{4.k.m.\Delta t.T_a}{R^2} n(X_n^i - X_{n+1}^i) + \frac{4.k.m.\Delta t.T_a}{R^2} (n-1) = \rho \cdot c_p T_a (X_n^{i+1} - X_n^i) \quad (3.15)$$

Cette égalité peut être réarrangée comme suit :

$$X_n^{i+1} = X_n^i + C_1 (nX_{n+1}^i - (2n-1)X_n^i + (n-1)X_{n-1}^i) + C_2 Q_n^i \quad (3.16)$$

Avec :

$$C_1 = \frac{4 \cdot \Delta t \cdot k \cdot m}{\rho \cdot c_p R^2} ; C_2 = \frac{\Delta t}{\rho \cdot c_p T_a} \quad \text{et} : X = \frac{T}{T_a}$$

Pour que la solution soit stable il faut que le coefficient du terme X_n^i soit positif [8], c'est-à-dire $1 - (2n-1) C_1 > 0$ quelque soit la valeur de n . On tire donc la condition d'échantillonnage sur le temps, qui impose celle de l'espace (m) :

2.3. Condition initiales et aux limites

La condition initiale fournit la valeur de la température dans chacune des tranches à $t=0$. Si on considère que la varistance est en équilibre thermique à la température ambiante la condition initiale se réduit à $X_n^0 = 1$.

En considérant que le gradient de température au centre de la varistance est nul, on en déduit alors la valeur de la température au centre $X_0^i = X_1^i$.

A sa périphérie, la varistance échange l'énergie avec le milieu ambiant essentiellement par convection et par rayonnement. La variation de la température à la périphérie X_m^i après Δt est donnée par la relation :

$$X_m^{i+1} = X_m^i + C_2 \cdot Q_m^i + \frac{4 \cdot m \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot R^2} \left[k(m-1)(X_{m-1}^i - X_m^i) - k_0 T_a^{0.25} m (X_m^i - 1)^{1.25} \right] \quad (3.17)$$

Avec : $k_0 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Wcm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1.25}$ [8].

3. Modèle proposé pour le calcul

Les caractéristiques électriques sont souvent représentées par des relations empiriques qui diffèrent d'un modèle à l'autre [14,33]. Se basant sur le modèle décrit par Clarke [14], nous avons adopté la relation (3.18) pour représenter la conductivité non linéaire durant les calculs et la simulation des propriétés thermoélectriques des varistances :

$$\sigma = \sigma_s + 0.5 \cdot \sigma_g \left(1 + \tanh \left(s \cdot \left(\frac{E}{E_s} - 1 \right) \right) \right) \quad (3.18)$$

Où :

σ_s : conductivité shunt représentant le courant de fuite (10^{-9} à $10^{-12} \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

σ_g : conductivité du grain (0.1 à $10 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

s : nombre aléatoire tenant compte du non uniformité des caractéristiques.

La valeur de s permet le contrôle du degré de non linéarité.

E : champ électrique aux bornes de la varistance.

E_s : champ de seuil.

Où :

$J = \sigma \cdot E$; Donc on a :

$$J(E) = E \cdot \left(\sigma_s(T) + 0,5 \cdot \sigma_g \cdot \left(1 + \tanh \left(s \cdot \left(\frac{E}{E_s} - 1 \right) \right) \right) \right) \quad (3.19)$$

Il est montré dans la théorie des varistances que l'effet de la température apparaît durant la première zone linéaire de la caractéristique I(V). L'augmentation de la température entraîne une augmentation du courant de fuite et par conséquent un décalage de la première zone linéaire vers les courants les plus élevés (figure 3.1). Le courant dans cette zone est régi par l'effet thermoïonique relié au champ électrique, E , et à la température [34,35].

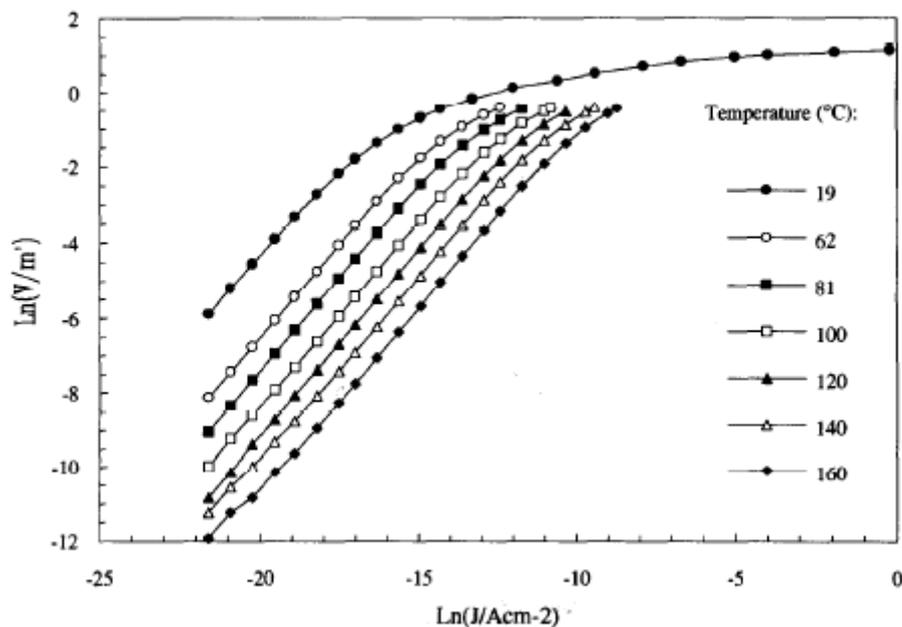


Figure 3. 1 : Effet de la température sur la caractéristique I(V). [34]

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{\beta \cdot E^2 - \phi_B}{k_B \cdot T}\right) \quad (3.20)$$

$$\text{Où :} \quad A = \frac{4\rho em \cdot k_B^2}{k^3} \quad (3.21)$$

A^* : constante effective de Richardson.

ρ : densité de la varistance.

e : charge de l'électron.

m : masse électronique.

k_B : constante de Boltzmann.

h : constante de Planck.

ϕ_B : hauteur de la barrière de potentiel à la tension [34].

$$\beta = \sqrt{\frac{e^3}{(4\pi\epsilon_0\epsilon)}} \quad (3.22)$$

$$\phi_B = \frac{V_c}{4} \left(1 - \frac{V}{V_v}\right)^2 \quad (3.23)$$

Avec :

V_c : tension critique ($V=0$) exprimée en fonction de la densité de charge d'interface accumulée N_s (couche négative), et la concentration des donneurs dans les grains N_d par l'équation [34] :

$$V_c = \frac{e^2 N_s^2}{2\epsilon\epsilon_0 N_d} \quad (3.24)$$

Où : $\epsilon=8.5$, permittivité relative du ZnO [37].

Il est admis que la variation de la conductivité dans cette zone suit une loi exponentielle de la température, dont les variations sont données [36], sur la figure (3.2).

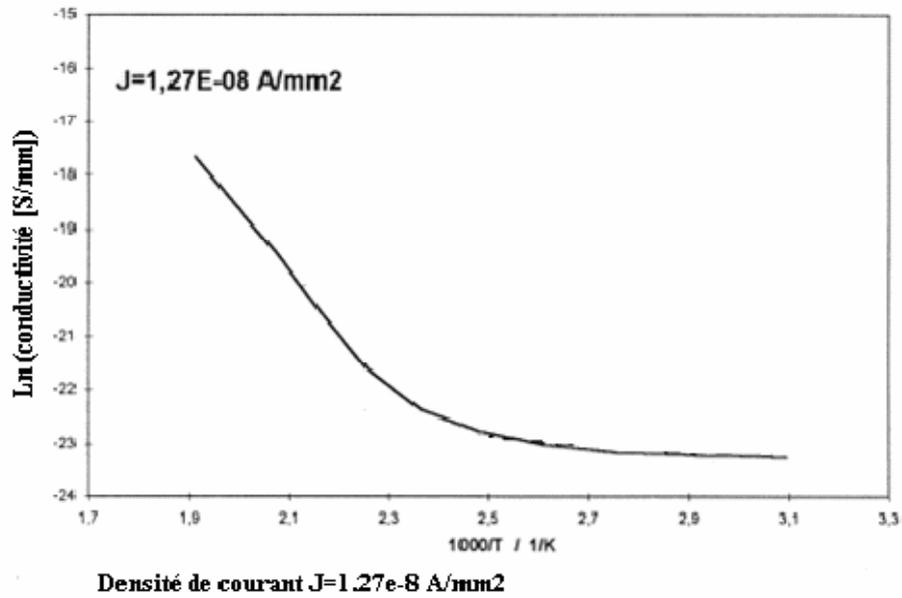


Figure (3.2) : Variation de la conductivité avec la température, grandeur mesurée.

La figure (3.3) représente la variation de la conductivité avec la température tracée en échelle linéaire déduite de la figure (3.4). D'après ces figures on confirme que la conductivité de la varistance augmente de manière exponentielle avec l'augmentation de la température.

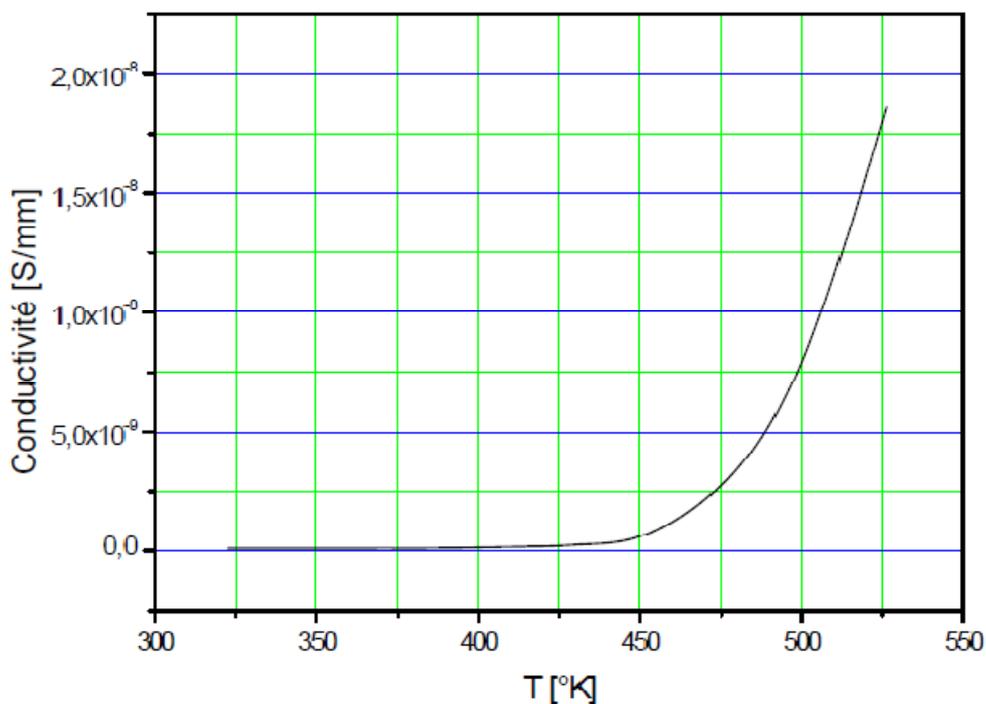


Figure 3.3 : Variation de la conductivité avec la température sur échelle linéaire.

D'autre part, Philipp et Levinson [18], indiquent que le passage d'une température T_A à une température T_B (figure.3.4) entraîne le décalage des caractéristiques sur l'axe des courants suivant une loi exponentielle du type :

$$J_B = J_A \exp\left(\frac{-\phi_B}{k\left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A}\right)}\right) \quad (3.25)$$

Par comparaison des équations (3.4) et (3.25) il s'ensuit que σ_0 est déterminée à partir de la connaissance d'une température initiale pour laquelle la conductivité est connue. Si à T_c correspond une conductivité σ_c , à partir de l'équation (3.4) on a :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_c}{\exp\left(\frac{-\phi_B}{k.T_c}\right)} \quad (3.26)$$

L'introduction de l'effet de la température dans le modèle courant (3.19) se fait à travers la conductivité shunt, ou de la barrière, qui dans ce cas devient :

$$\sigma_s(T) = \sigma_c \exp\left(\frac{\phi_B}{k}\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (3.27)$$

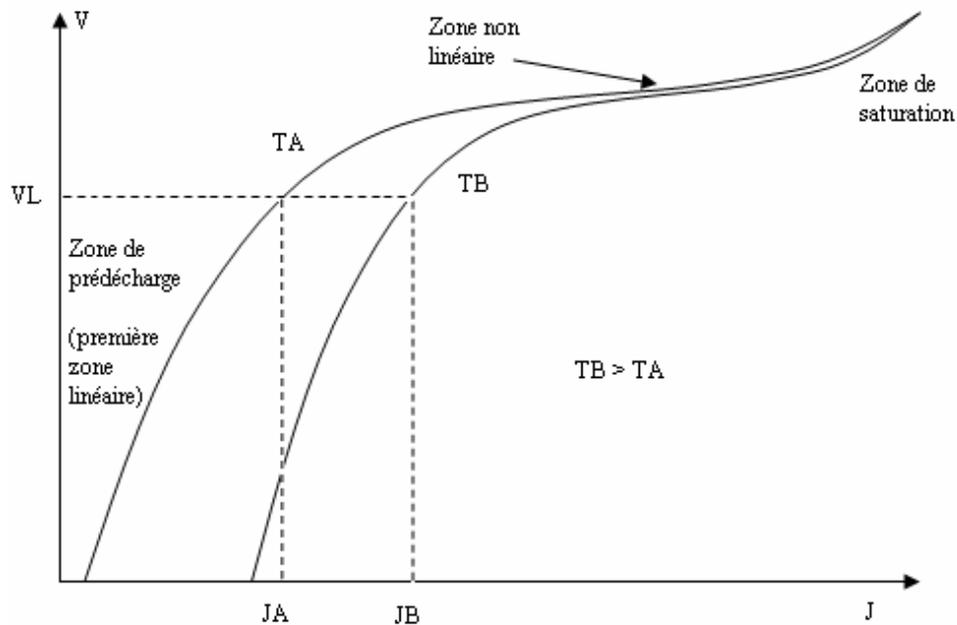


Figure 3. 4 : Effet de la température sur la caractéristique I(V).

Ainsi le système d'équation (3.19 et 3.27) constitue un modèle général pour la représentation du comportement électrique de la varistance avec la prise en compte de l'effet de la température. La figure (3.5) montre les variations de la conductivité avec la température calculées à partir du modèle. La comparaison entre les figures (3.2) et (3.5) montre une bonne correspondance entre les résultats calculés à partir du modèle et les mesures expérimentales [36].

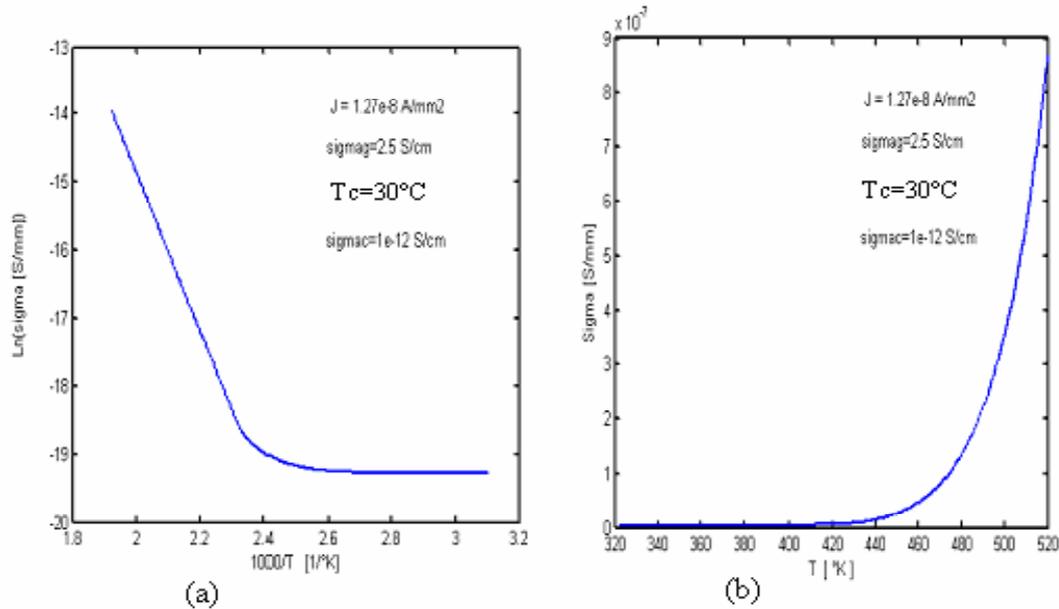


Figure 3.5 : Variation de la conductivité en fonction de la température : (a) en échelle logarithmique pour la conductivité et inverse pour la température, (b) en échelle linéaire.

4. Relation entre les propriétés électriques des varistances ZnO et leur composition

4.1. Tension de seuil

La régulation de la tension de seuil des varistances ZnO étant directement liée à la taille des grains de ZnO, il a été possible d'élargir leur utilisation, de la haute tension jusqu'à la basse tension. Ceci a surtout permis d'utiliser ces varistances à l'entrée des boîtiers, dans la protection des appareils électroménagers ou comme composant passif en électronique de puissance.

Le dimensionnement des parafoudres à varistances ZnO par rapport à leur tension assignée (juste supérieure à la tension de seuil) se fait en fonction du champ de seuil de la varistance utilisée et de la hauteur de la colonne de varistances. Avec l'utilisation d'une formulation chimique standard, le champ de seuil d'une varistance ZnO est de l'ordre de 1 à 1,5 kV/cm. Pour la fabrication de parafoudres destinés aux réseaux de haute tension et très haute tension, leur hauteur serait de l'ordre de 3 m.

Pour la diminution de cette hauteur, l'une des préoccupations des chercheurs dans ce domaine est celle qui consiste à élaborer des varistances ZnO à champ de seuil élevé.

Il faudrait en même temps que ces dernières conservent toutes leurs propriétés caractéristiques, essentiellement la tenue de l'énergie électrique.

La capacité d'absorption de l'énergie pour des varistances ZnO est un problème d'une grande importance du point de vue théorique et pratique. Sur le plan des applications pratiques, plus cette capacité est importante, plus la tenue aux grands courants du parafoudre est bonne. Le dimensionnement des parafoudres ZnO par rapport à la tenue de l'énergie dépend de la section des varistances, de leur nombre de colonne et de leur capacité d'absorption de l'énergie. Sur le plan théorique, cette capacité d'absorption a des relations avec l'homogénéité de la céramique, de la résistivité des grains, de la nature de la barrière de potentiel, du procédé de fabrication.... etc.

La capacité d'absorption en énergie de la varistance, dépend de sa taille et, de sa microstructure qui elle, dépend essentiellement de la composition chimique et du traitement thermique utilisé pour le frittage. C'est la tenue de l'énergie de la varistance

La figure (3.6) montre le mécanisme de conduction dans un élément de varistance en forme simplifiée. Les grains d'oxyde de zinc se sont fortement conducteurs, alors que la limite intergranulaire formée d'autres oxydes est très résistante. Le comportement électrique de la varistance d'oxyde métallique, comme indiqué par la figure (3.6), les résultats du nombre de micro varistances connectées en série ou en parallèle.

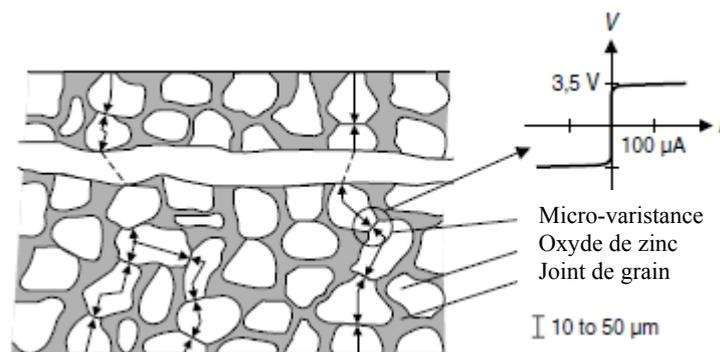


Figure 3.6 : Microstructure de la varistance ZnO.

4.2. Augmentation du champ de seuil

La figure (3.7) représente la variation du champ de seuil E_s en fonction de la concentration du Sb_2O_3 . On observe que E_s augmente quand la concentration du Sb_2O_3 augmente et la température de frittage diminue.

Cette augmentation du champ de seuil est expliquée par l'effet de la diminution de la taille des grains, à travers la formation des spinelles.

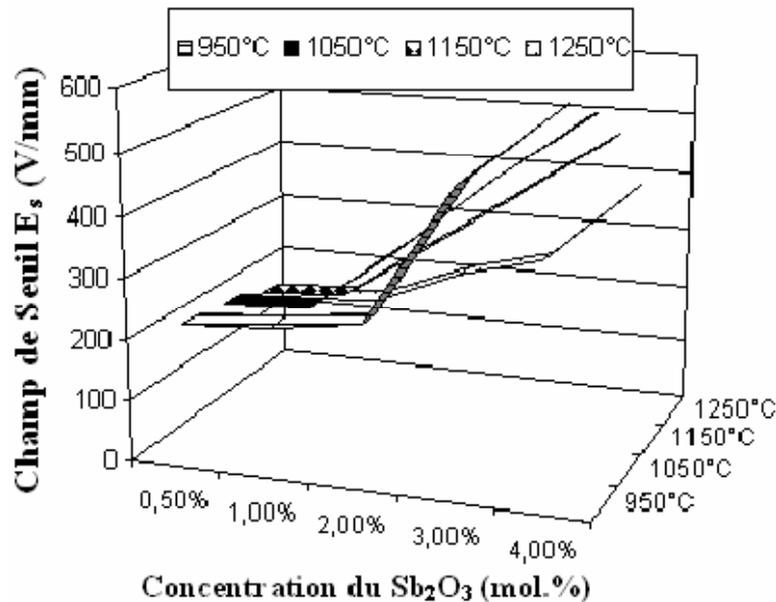


Figure 3.7 : Evolution du champ de seuil en fonction de la concentration du Sb_2O_3 et de la température de frittage.

Différentes études des propriétés électriques des varistances [40] ont montré que, pour un composant d'épaisseur e donnée, la tension de seuil V_0 est indépendante des proportions d'oxydes additifs, tant que le coefficient de non-linéarité est élevé ; elle ne dépend que de la taille moyenne d des grains de ZnO. La tension de seuil est d'autant plus élevée que les grains sont plus nombreux et plus finalement divisés. L'indépendance de V_0 vis-à-vis des proportions des constituants présents s'explique par le fait que la tension de seuil est essentiellement associée à la largeur de la bande interdite de ZnO [39].

4.3. Diminution de la capacité d'absorption en énergie

La figure (3.8) présente les variations de A en fonction de la quantité de Sb_2O_3 . On observe que la valeur maximale de A correspond à 0,5 mol.% de Sb_2O_3 et à la température de frittage T_f égale à 1150°C. On trouve aussi que, quelle que soit T_f , toutes les courbes ont un maximum à 0,5 mol.% de Sb_2O_3 . Puis, elles baissent d'une manière monotone. En comparaison avec les résultats de la figure (3.8), cette concentration de 0,5 donne la valeur la plus basse de E_s . Or, notre but est de rechercher des compositions ayant à la fois un champ de

seuil élevé et une grande capacité d'absorption en énergie. Ainsi, il nous faut expliquer pourquoi A diminue considérablement avec la teneur de Sb_2O_3 .

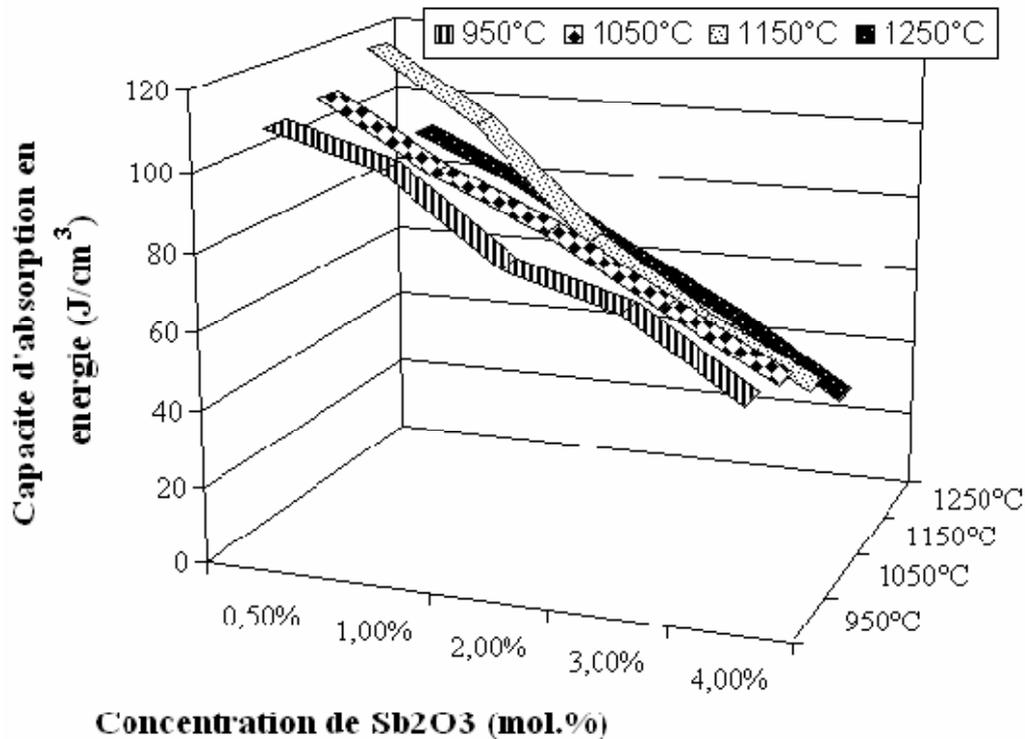


Figure 3.8 : Variations de la capacité d'absorption en énergie en fonction de la quantité de Sb_2O_3 et de la température de frittage.

4.4. Intensité du courant de fuite

L'examen systématique des composants préparés dans les conditions différentes montre que l'intensité du courant de fuite dans la varistance dépend principalement de deux facteurs :

- Le courant de fuite I_f diminue avec l'amélioration de l'isolement électrique entre grains de ZnO aux faibles concentrations en bismuth.
- Le courant de fuite I_f augmente en revanche avec l'accroissement de la concentration des diverses phases précipitées qui comportent une résistivité (compris entre 10^7 et $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) nettement inférieure à celle assurant l'isolement électrique des grains (10^{12} à $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$).

L'évolution a été analysée pour des concentrations croissantes en oxyde de bismuth, la figure (3.9) montre la variation du courant de fuite en fonction du taux de Bi_2O_3 en moule voisin de 0,25 % [39].

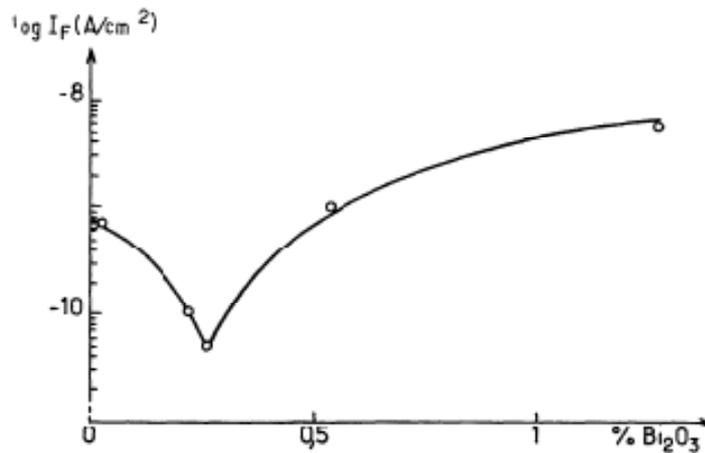


Figure 3.9 : Evolution de l'intensité du courant I_f en fonction du taux de Sb_2O_3 dans la varistance [39].

Un comportement similaire a été observé par Bernasconi et al. [40] lors de l'étude de la variation du courant de fuite en fonction de la concentration en oxydes additifs.

4.5. Coefficient de non-linéarité

Ayant ajouté seulement de l'oxyde de bismuth à l'oxyde de zinc, Wong et Morris ont remarqué des grains de ZnO étaient isolés par des couches résistantes ($10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) d'épaisseur variable en fonction de la concentration initiale et de la température de frittage, mais que le coefficient de non-linéarité restait très faible ($\alpha < 10$) [41]. Le résultat confirmé d'après [39] figure (3.10) :

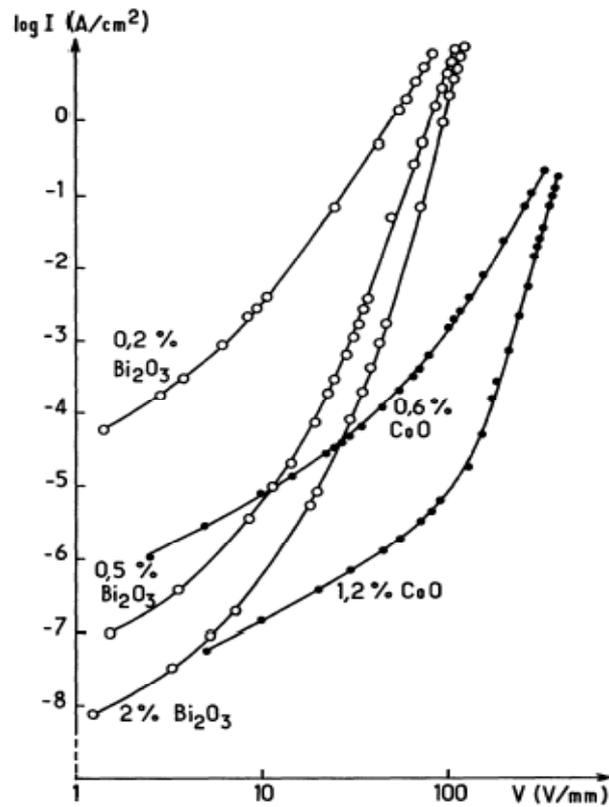


Figure 3.10 : La caractéristique $I(V)$ de composants ZnO-CoO et ZnO-Bi₂O₃ [39].

Les caractéristiques $I(V)$ de composants constitués uniquement d'oxydes de zinc et de cobalt présentent également des coefficients de non-linéarité très faibles et des courants de fuites importants, figure (3.10). En revanche la présence simultanée d'oxydes de bismuth et de cobalt est à l'origine d'un effet non-linéaire notable.

5. Modes de défaillance des varistances ZnO

L'étude de la capacité d'absorption de l'énergie du parafoudre est un sujet d'une grande importance, En effet la réalisation de parafoudres ayant une grande capacité d'absorption de l'énergie aura des conséquences sur le coût, le volume et surtout la durée de vie des parafoudres.

Trois modes de défaillance ont été identifiés comme responsable de la destruction du parafoudre [19] :

- L'emballlement thermique.
- La perforation.
- Le craquement.

En plus de ces trois phénomènes d'origine thermomécanique, on compte également le contournement comme l'un des modes de défaillance des parafoudres.

Les principaux modes de défaillances des varistances, emballlement thermique, perforation et craquement, ont pour origine l'élévation excessive de la température et plus particulièrement l'échauffement non uniforme du matériau.

5.1. L'emballlement thermique

Est un accroissement, sans cesse, de la température du parafoudre jusqu'à sa fusion. Cette situation résulte d'un déséquilibre thermique dû à l'écart entre la puissance perdue par effet joule et la quantité de puissance évacuée sous forme de chaleur vers le milieu environnant.

5.2. La Perforation

Le matériau constituant la varistance ZnO est caractérisé par son désordre. Des observations expérimentales ont montrée que les grains de ZnO n'avaient pas la même taille, et que les joints de grains ou la phase intergranulaire n'a pas la même épaisseur. D'autre part les mesures effectuées sur les joints de grains montrent également la disparité de leurs caractéristiques I(V). À cause de ce désordre, le courant à l'intérieur de la varistance suit des chemins préférentiels caractérisés par le minimum de barrières de potentiel, en conséquence l'échauffement du matériau sera non uniforme. En effet, par nature les céramiques sont de mauvais conducteur de chaleur ceci favorise encore la non uniformité de la température.



Figure 3.11 : Perforation des varistances par dépassement de la capacité énergétique [5].

5.3. Le craquement

Le craquement, ou la fissuration, des varistances résulte des contraintes mécaniques qui se développent par suite d'un large gradient de température [19]. En effet, lorsqu'une région du matériau est soumise à une température élevée elle aura tendance à se dilater. En contrepartie, les régions les moins chaudes empêchent cette dilation, et de ce fait des forces de compression et d'extension se développent causant la fissuration ou le craquement du bloc.

5.4. Le Contournement

Le contournement est initié généralement par des décharges partielles qui apparaissent entre l'électrode et la varistance ou à cause des agents extérieurs tels que la pollution et l'humidité.

6. Conclusion

La modélisation du comportement globale de la varistance nécessite la prise en compte des phénomènes électriques et thermiques. La capacité d'absorption de l'énergie est l'une des plus importantes caractéristiques des parafoudres. Elle représente simplement les limites énergétiques à partir desquelles la varistance est détruite sous l'action des contraintes électriques.

L'oxyde de bismuth joue un double rôle :

- Il donne naissance en cours de chauffe à une phase liquide susceptible de dissoudre d'autres oxydes et permettant un frittage en phase liquide.
- Il assure de manière efficace l'isolement électrique entre conducteurs d'oxydes de zinc non stœchiométrique.

Chapitre 4

Modèle proposé et simulations

1. Introduction

Les parafoudres à oxydes de zinc ayant maintenant totalement remplacé les parafoudres à carbure de silicium.

La modélisation et les effets consentis avec le développement de la micro-informatique ne concernent ZnO. La modélisation des parafoudres revêt deux aspects principaux :

Le premier consiste en l'intégration du parafoudre comme appareil de réseau d'énergie. Seul est pris en compte le comportement électrique global du parafoudre, à savoir principalement sa caractéristique courant-tension $I(V)$. Le composant « parafoudre ZnO » est généralement décrit comme une résistance variable non-linéaire soit à l'aide d'une formule mathématique qui réalise l'interpolation de la caractéristique $I(V)$ réelle, soit à l'aide d'une description point par point et approximation par segments de cette caractéristique.

2. Equilibre de puissances et emballement thermique

L'équilibre des puissances, évacuée thermiquement et perdue par effet joule, détermine les températures limites, supérieures et inférieures, et la tension limite provoquant l'emballement thermique.

Le calcul du diagramme d'équilibre est effectué à partir de la relation décrivant la caractéristique $I(V)$ et sa dépendance en température (équation 3.19 et 3.27). Les données pour le calcul sont regroupées au tableau (4.1). On représente sur les figures (4.1 et 4.2) la caractéristique $I(V)$ et le coefficient de non linéarité α obtenues à partir du modèle. On définit à ce stade le coefficient d'utilisation $U_c = U/V_s$, comme le rapport de la tension appliquée à la tension de seuil.

Grandeurs	σ_c	σ_g	T_a	T_c	V_s $I=1mA$	Φ_B	L	R	K	s	v	α_{air}
Unités	$\Omega^{-1} cm^{-1}$	$\Omega^{-1} cm^{-1}$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	V	eV	(cm)	(cm)	(J/m $^{\circ}C$)		(m 2 /s)	(m 2 /s)
Valeurs	10^{-11}	1	20	20	8300	1	4	1.5	5.59	20	$15.5 \cdot 10^{-6}$	23.6

Tableau 4. 1 : Données pour le calcul du diagramme d'équilibre.

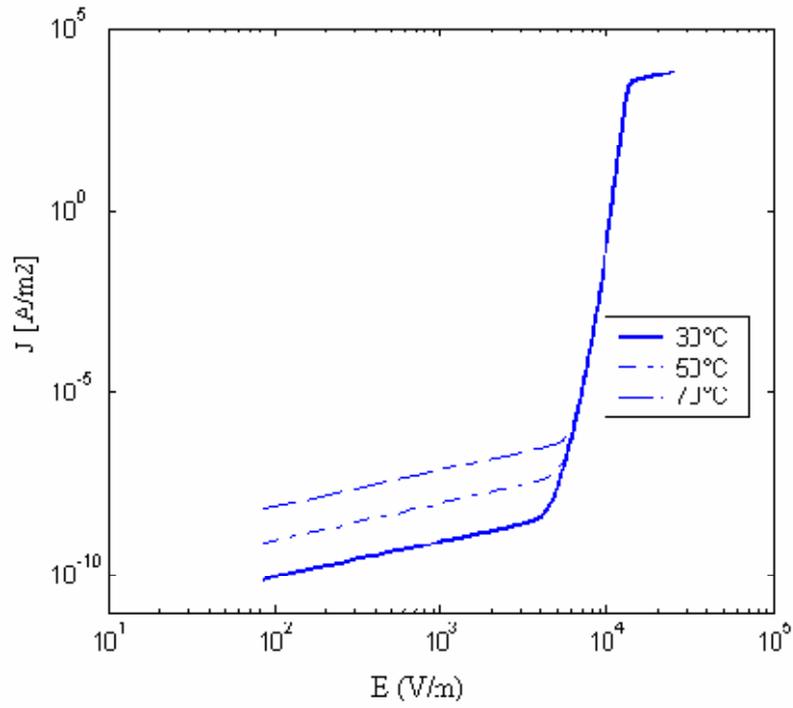


Figure 4.1 : Caractéristique $J(E)$ typique pour trois températures.

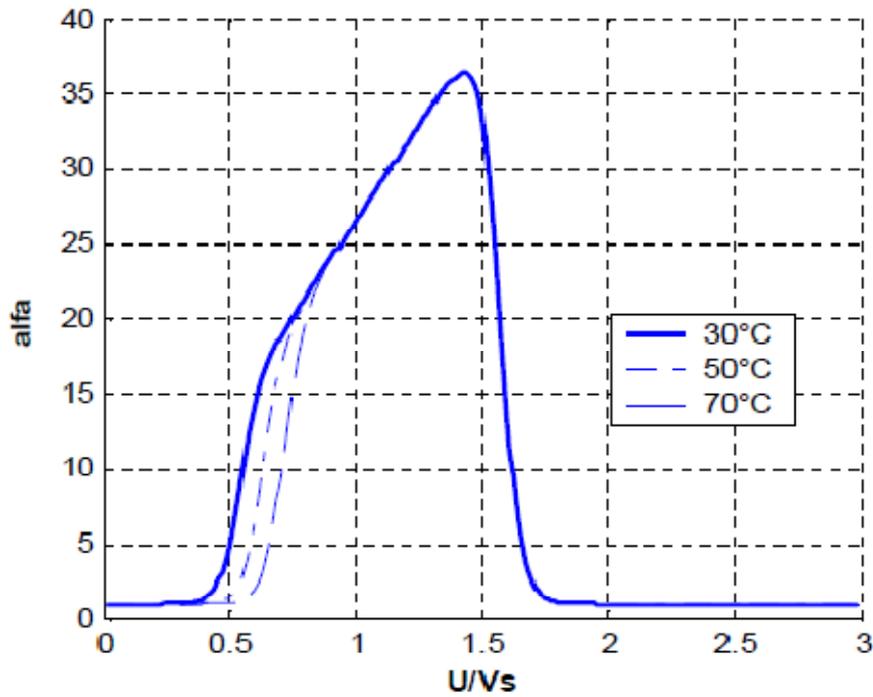


Figure 4.2 : Variation du coefficient de non-linéarité α avec la tension et la température.

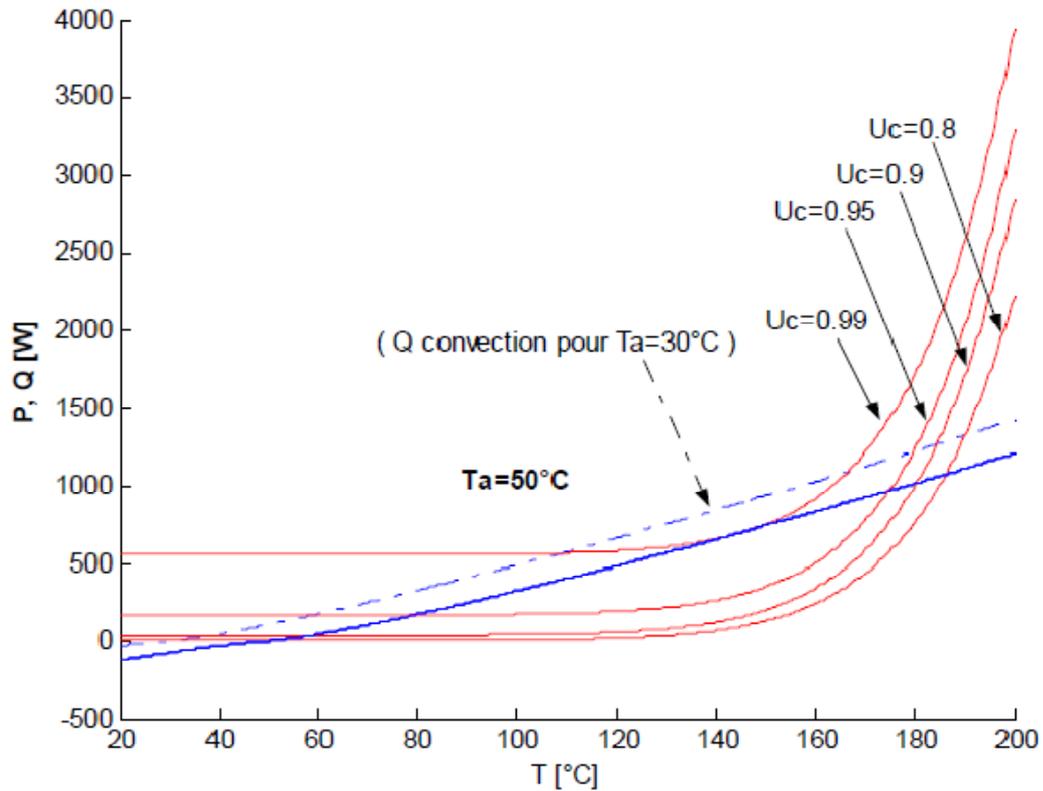


Figure 4.3 : Diagramme d'équilibre calculé pour une température ambiante $T_a=50^\circ\text{C}$ et à plusieurs tensions (U_c)

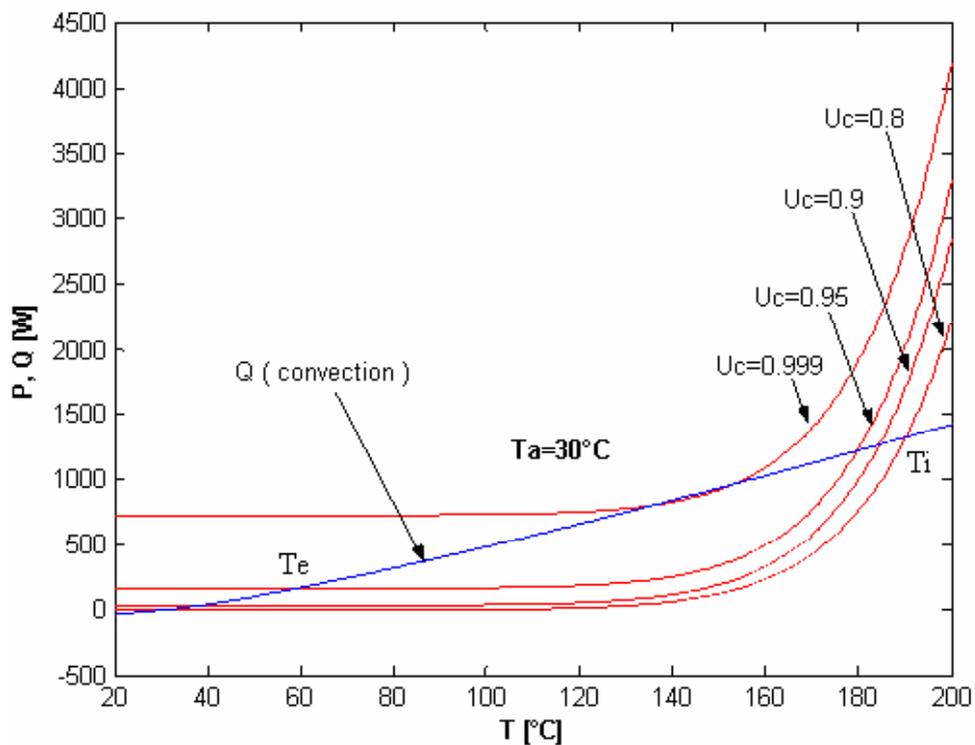


Figure 4.4 : Diagramme d'équilibre thermique calculée pour une température ambiante $T_a=30^\circ\text{C}$ et à plusieurs tensions (U/V_s)

Les figures (4.3, 4.4 et 4.5) montrent respectivement le diagramme d'équilibre et les températures limites correspondantes à l'égalité des puissances. Il est clair que la puissance perdue par effet joule augmente avec l'augmentation de la tension appliquée en glissant vers les puissances élevées.

La variation de la puissance avec la température est de forme exponentielle et comporte deux régions : une région comprise entre la température ambiante et le coude, où la puissance est pratiquement constante. La deuxième région, commençant à partir du coude, correspond à une augmentation brutale des pertes et qui atteint rapidement la température limite de stabilité (T_i).

L'augmentation de la température ambiante T_a entraîne la diminution de la puissance évacuée par convection et par conséquent la réduction des limites de stabilité. Sur les figures (4.2, 4.3) on remarque que la variation de la puissance avec la tension devient importante au fur et à mesure qu'on s'approche de la tension de seuil. En effet, le passage de U_c de 0.95 à 0.99 entraîne une augmentation plus importante que le passage de 0.8 à 0.9.

La variation de la puissance perdue avec la tension appliquée est tracée sur la figure (4.6) pour deux échelles : logarithmique et linéaire. Avant la tension de seuil, la puissance est presque nulle, mais quand la tension appliquée dépasse la tension de seuil, les pertes augmentent brusquement à des valeurs très élevées pour de faible variation de la tension. Ceci est dû à la conduction non linéaire, où il y a augmentation du courant (figure 4.1).

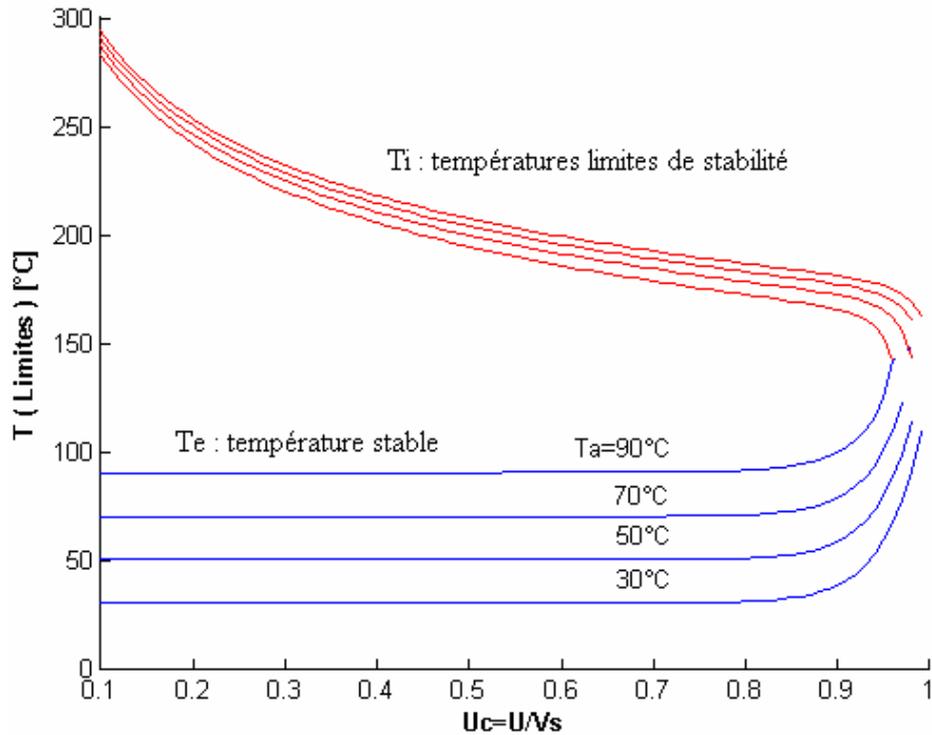


Figure 4. 5 : Températures limites donnant l'égalité des puissances en fonction de la tension appliquée et à plusieurs valeurs de température ambiante

Les limites de fonctionnement stable de la varistance sont déterminées par les températures limites T_e et T_i , correspondant respectivement au point d'intersection inférieur et supérieur des courbes de puissances. Les variations des températures limites avec la tension et pour plusieurs valeurs de la température ambiante sont données sur la figure (4.5). Le point de liaison des deux types de courbes (T_e et T_i) définit la température et la tension critiques provoquant l'emballement thermique de la varistance. Le tableau 4.2 donne les valeurs des tensions et des températures critiques correspondant à plusieurs températures ambiantes. Il est à remarquer alors, que le risque d'instabilité thermique de la varistance devient important quand on s'approche de la tension de seuil. La température limite minimale de stabilité (T_e) est égale à la température ambiante jusqu'à l'approche de la tension critique où la marge de stabilité, définie par $T_i - T_e$, diminue rapidement. Les figures (4.7 et 4.8) représentent les variations de la marge de stabilité et de la capacité d'énergie, calculée par l'équation 3.6, en fonction de la tension et de la température ambiante. L'interprétation de la courbe de la capacité d'énergie étant directement liée à la marge de stabilité. Cette dernière représente la réserve en énergie que la varistance est capable de supporter avant qu'elle s'emballe thermiquement. De ce fait, au point critique (U_{cr}) il ne reste plus de réserve et la varistance

est incapable d'absorber plus d'énergie, ce qui explique donc la diminution de la capacité d'absorption de l'énergie de et même son annulation.

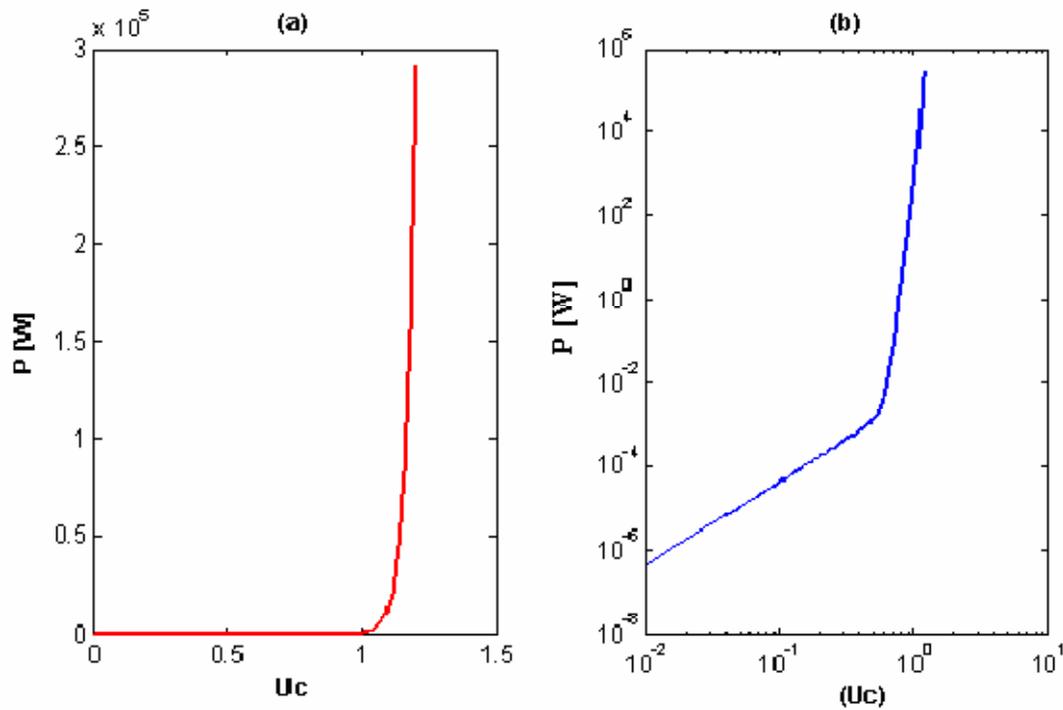


Figure 4. 6 : Variation des pertes avec la tension : (a) échelle linéaire, (b) échelle logarithmique

Température ambiante T_a (°C)	30	50	70	90
Tension critique U_{cr}	0.9999	0.99	0.97741	0.95889
Température critique T_{cr} (°C)	145	144.5	143	142.5

Tableau 4. 2 : Grandeurs critiques.

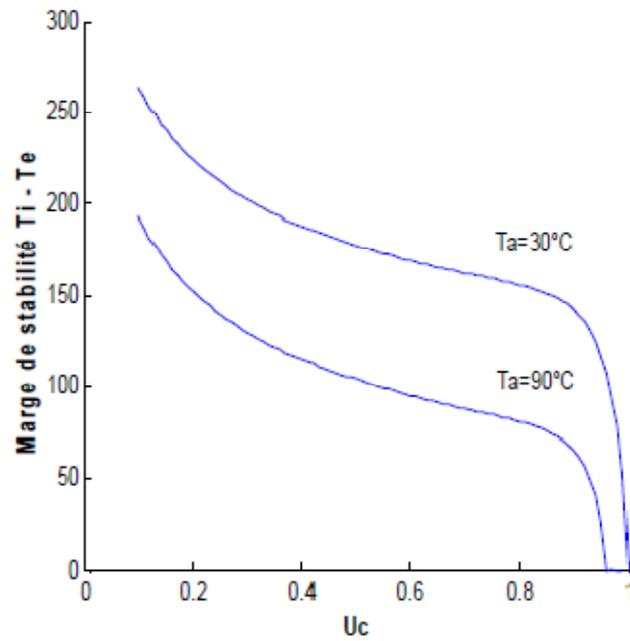


Figure 4.7 : Marge de stabilité ($T_i - T_e$) tracée en fonction de la tension (U_c), pour deux températures ambiantes (T_a).

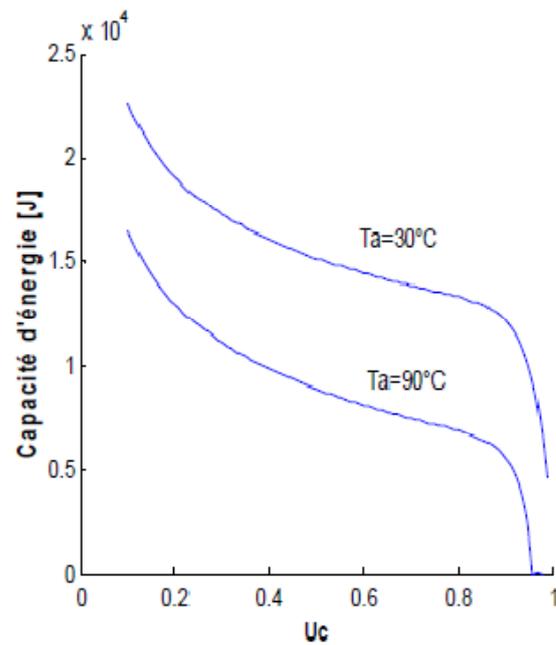


Figure 4.8 : Variation de la capacité d'énergie en fonction de la tension pour deux valeurs de T_a .

2.1. Effet des dimensions :

L'effet du rayon R sur les pertes joules et la densité de courant résultant des courants 1mA et 2mA est représentée sur la figure (4.9). Pour un courant et une longueur donnés les pertes diminuent avec l'augmentation du rayon, figure (4.9.a). Cette diminution est liée à celle de la densité de courant qui, dans ce cas, décroît suivant une loi en $(I/\pi R^2)$ et par conséquent les limites de fonctionnement sont améliorées.

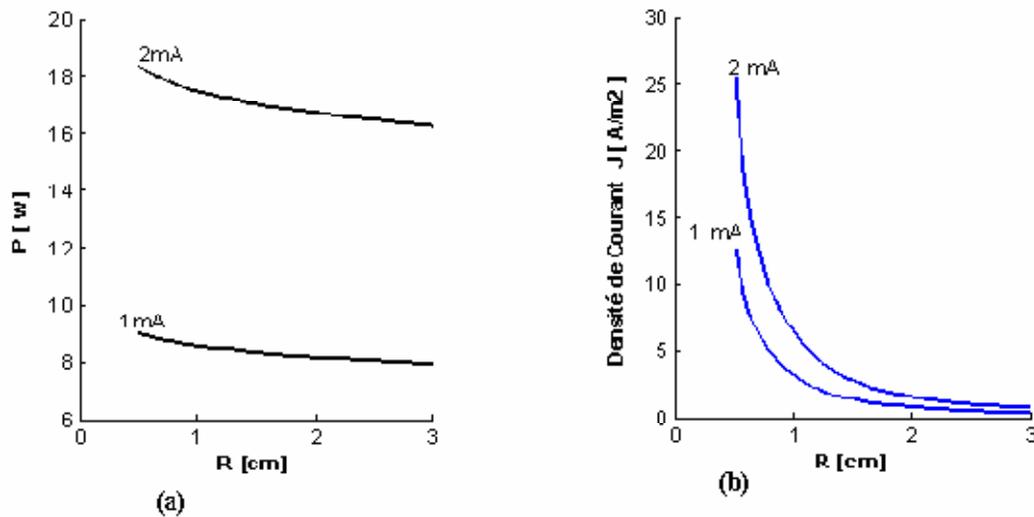


Figure 4.9 : Variation avec le rayon (a) des pertes, (b) de la densité de courant pour, un courant de 1mA et 2 mA.

L'effet de la longueur est donné par les figures (4.10) et (4.11) pour deux cas : une tension constante et un courant constant.

Pour le cas d'une tension fixe et un rayon donné (figure 4.10, 4.11.a), nous constatons que l'augmentation de la longueur entraîne l'élévation de la tension critique (fig4.10) et par conséquent celle de la capacité d'énergie. Ceci est dû à une augmentation de la résistance totale de la varistance et donc le passage d'un faible courant (U/R). Ainsi les pertes décroissent en $1/L$ et la puissance évacuée est plus importante du fait de l'augmentation de la surface d'évacuation (fig4.11.a).

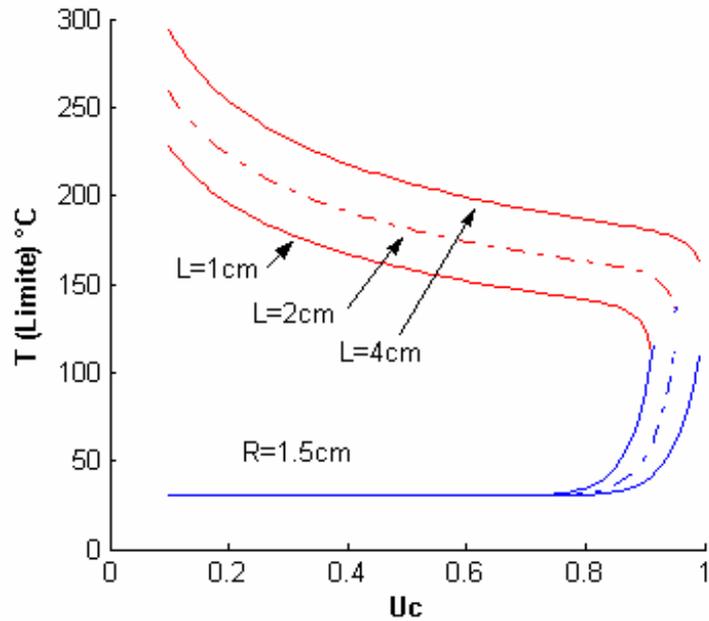


Figure 4.10 : Effet de la longueur sur les températures limites de stabilité pour un rayon $R=1.5\text{cm}$.

D'autre part, l'augmentation de la longueur pour un courant donné (fig.4.11.b) entraîne une faible augmentation des pertes à cause de l'augmentation de la résistance. La puissance évacuée par convection Q_c étant proportionnelle à la longueur à cause de l'augmentation de la surface d'évacuation. En résumé, l'augmentation des dimensions permet l'amélioration des limites de fonctionnement de la varistance.

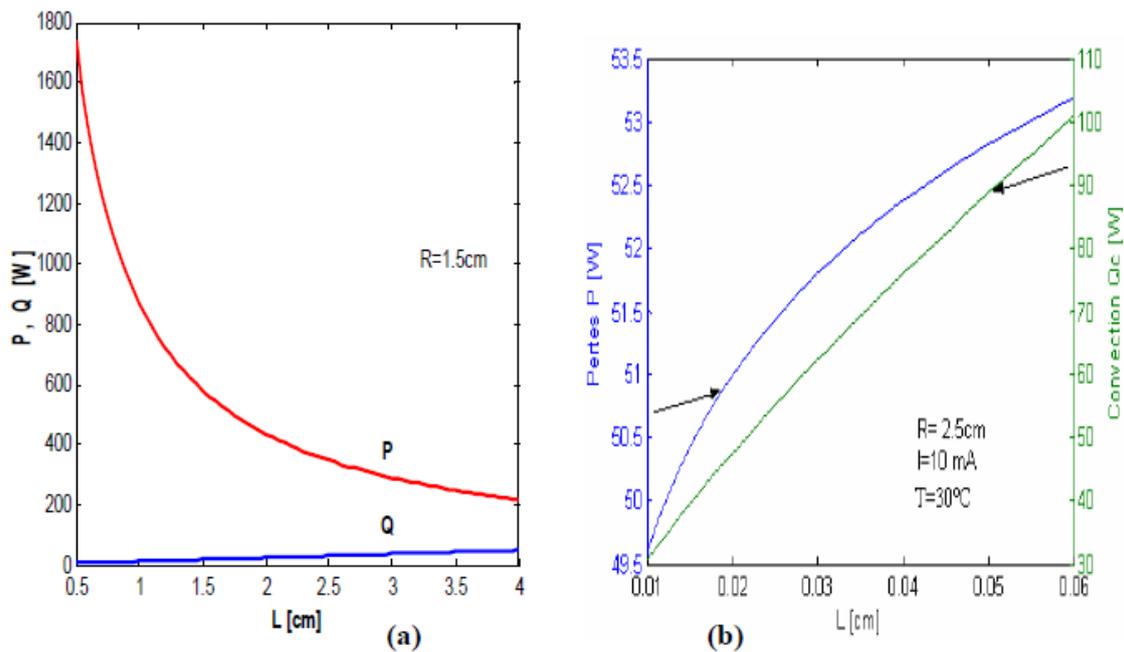


Figure 4. 11 : Effet de la longueur sur les pertes (P) et la convection (Q)

2.2. Procédure de simulation

La varistance est simulée pour une valeur de densité de courant moyenne donnée, pour laquelle on calcule le champ résiduel. Ce dernier permet le calcul de la distribution des pertes et donc de la température et des contraintes. Ce processus est répété jusqu'à atteindre les limites de défaillance où on relève le temps de défaillance t_f correspondant à chaque mode et qui correspond donc à une énergie maximale absorbée calculée par l'expression (4.1) :

$$W = \int_0^{t_f} J_{\text{moy}}(t) \cdot E(t) \cdot dt \quad (\text{J/m}^3) \quad (4.1)$$

Où ; J_{moy} : densité moyenne du courant.

E : champ résiduel, variable le temps et la température.

Les paramètres de simulation sont donne suit : $T_a=20^\circ\text{C}$, $E_s = 1870 \text{ V/cm}$ (donnant 1mA/cm), $\sigma_c = 5 \cdot 10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\sigma_g = 1 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$. $T_c=20^\circ\text{C}$, $T_{\text{init}} = 30^\circ\text{C}$. $\rho=550 \text{ kg/m}^3$, $c_p=5500 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

La simulation a été faite pour deux types de varistances, une varistance pour parafoudre de classe distribution, avec dimension $R=1.6\text{cm}$, $L=4.5\text{cm}$, $R_{\text{hs}}=0.25\text{cm}$. Et une varistance pour parafoudre de classe poste HT, de dimension $R=3.15\text{cm}$, $L=4.5\text{cm}$, $R_{\text{hs}}=0.5\text{cm}$. L'effet de l'intensité du filament a été analysé sur la varistance de distribution.

2.3. Distribution de la température, densité de courant et contraintes

Pour une densité de courant moyenne égale à 1.67 A/cm^2 , appliquée pendant 45ms, on obtient la distribution spatiotemporelle de la température, de la densité de courant et des contraintes données par les figures (4.12) et (4.13).

A cause de la courte durée (ms) la température ne diffuse pas à travers tout le bloc et se localise au filament où elle entraîne l'élévation locale de la densité de courant, à cause de la dépendance de température de la caractéristique $I(V)$. Remarquons que la densité de courant est supérieure à 160 A/m^2 à travers le filament alors qu'elle n'est que de 5 A/m^2 dans le reste

du bloc. Autour de 400°C, on remarque l'augmentation rapide du courant de filament suite à l'accroissement de la conductivité avec la température.

Les contraintes thermomécaniques, sur les trois directions, résultant de la distribution non uniforme de la température, sont illustrées sur la figure (4.13). On remarque que la valeur des contraintes et leur distribution dépendent de la valeur de la température et de sa distribution. Plus celle-ci est non uniforme plus la valeur des contraintes est élevée. Le signe positif ou négatif désigne le type de contrainte respectivement, extension ou compression [19]. Quand les contraintes d'extension, qui sont appliquées sur la direction tangentielle S_{tt} , atteignent la valeur $1.406 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2$ la varistance craque par extension. Ou quand les contraintes de compression, qui sont appliquées sur la direction axiale S_{zz} , atteignent la valeur $4.9226 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2$ la varistance craque par compression.

Nous constatons que les contraintes tangentielles sont compressives dans la région du filament et extensive dans le reste du bloc. Le temps de défaillance t_{fer} par craquement est donc déterminé par le type de contrainte apparaissant au premier lieu.

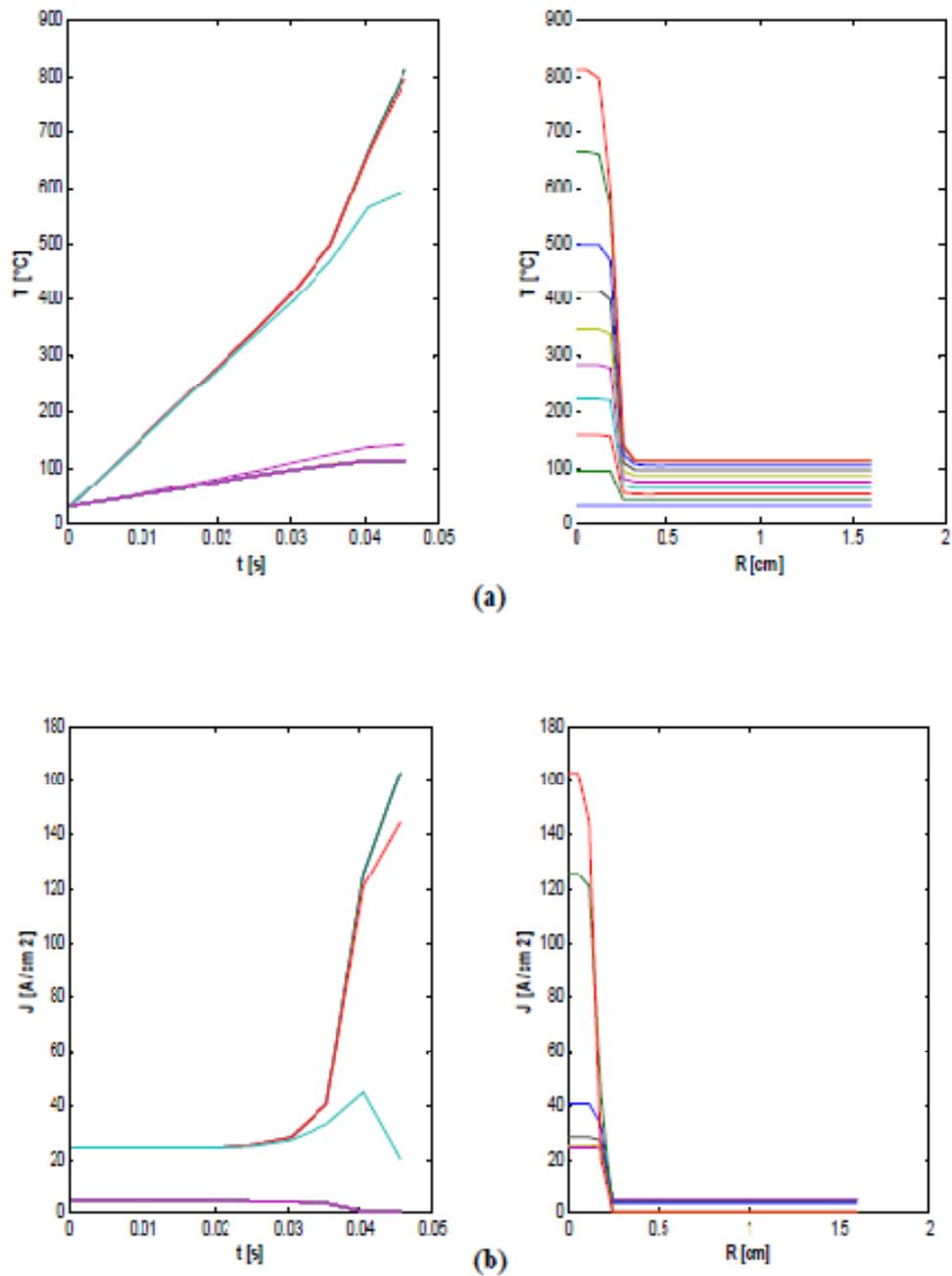


Figure 4.12 : Distribution spatiotemporelle de (a) la température et (b) la densité de courant, tracé à des intervalles de 5ms, pour $J_{moy} = 1.67 \text{ A/cm}^2$

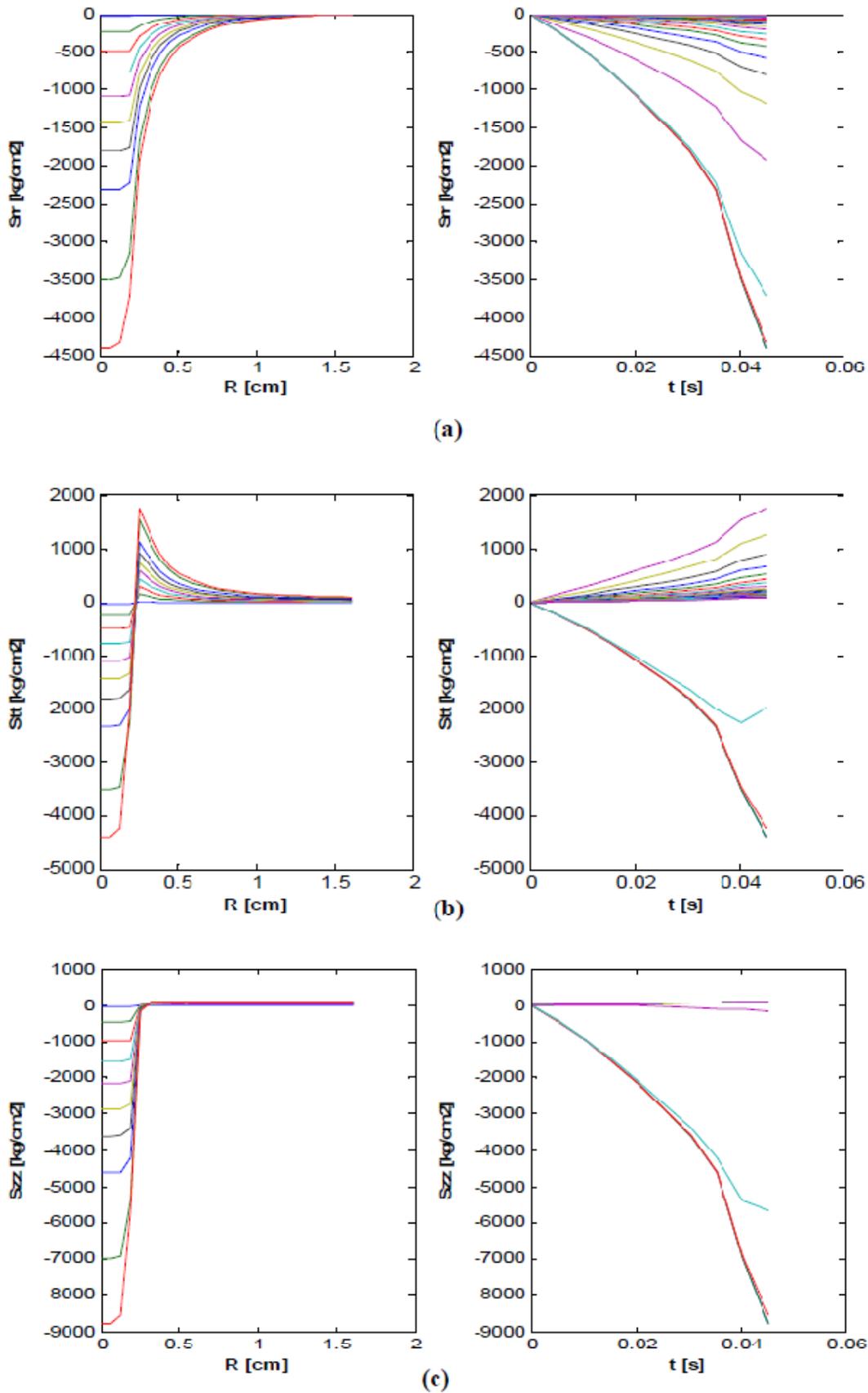


Figure 4. 13 : Distribution spatiotemporelle des contraintes (a) Radiales, (b) tangentielles, (c) axiales, tracées à des intervalles de 5ms pour $J_{moy}=1.67A/cm^2$

2.4. Capacité d'absorption d'énergie

Les figures (4.14 et 4.15) représentent respectivement les valeurs maximales, minimales et moyennes de la température et les contraintes maximales sur les trois directions. On indique sur les figures les moments d'apparition de chaque mode de défaillance. L'emballement thermique apparaît lorsque la température moyenne de la varistance atteint la température limites estimée ici de 190°C. Dans le cas des figures (4.14) et (4.15), on remarque que la varistance est détruite sous l'effet des contraintes de compression après 5ms. Elle se détruit après 25ms par contraintes d'extension et s'emballe thermiquement après 40ms alors que la perforation au filament apparaît après 43ms. Ainsi, et à partir de ces valeurs de temps, on peut déterminer la capacité d'énergie de la varistance pour chaque mode en utilisant l'expression (4.2). En répétant ces calculs pour différentes valeurs du courant moyen.

$$J_{moy}(E) = \frac{2}{R^2} \cdot \left(\int_0^{R_{hs}} r J_{hs}(E) \cdot dr + \int_{R_{hs}}^R R \cdot J(E) \cdot dr \right) \quad (4.2)$$

R : rayon de la varistance.

J_{hs} : densité de courant du filament.

J : densité de courant du reste du bloc.

R_{hs} : rayon du filament.

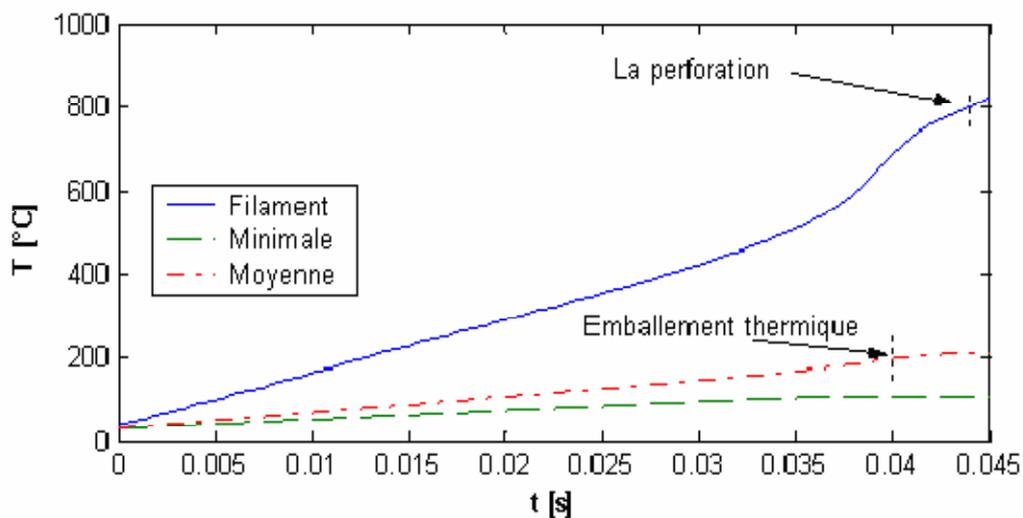


Figure 4.14 : Valeur maximale de la température du filament, du reste du bloc et température moyenne, pour $J_{moy}=1.6A/cm^2$

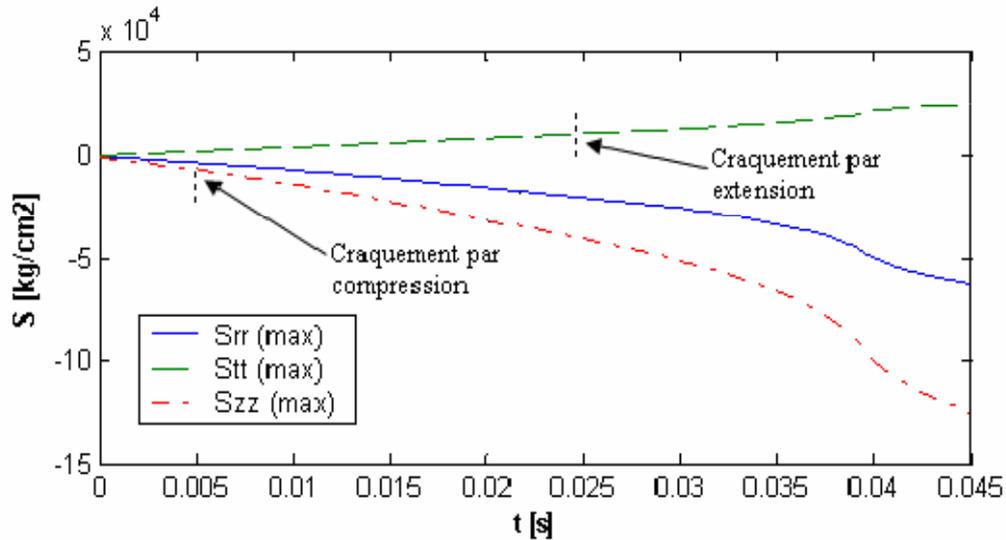


Figure 4.15 : Contraintes maximales sur les trois dimensions radial S_{rr} , tangentielle S_{tt} , et axiale S_{zz} pour densité de courant moyenne $J_{moy}=1.6\text{A/cm}^2$.

On arrive à définir les courbes de la capacité d'absorption d'énergie en fonction de la densité moyenne du courant données par la figure (4.16).

On remarque que la variation de la capacité d'énergie avec la densité de courant est complexe. Elle dépend du rayon de la varistance, du degré de non uniformité et certainement de l'amplitude du courant et de sa durée. On remarque également que le mode responsable de la défaillance dépend des dimensions et du non uniformité du bloc.

Pour la varistance de la classe de distribution (fig.4.18.a,b), la capacité d'absorption est élevée aux faibles valeurs de la densité de courant, puis elle diminue jusqu'à un minimum compris entre 10^2 et 10^3 A/m^2 où elle augmente de nouveau. Pour le cas de $F_p=5\%$ (fig4.16a) et pour les faibles valeurs du courant $<10^2 \text{ A/m}^2$ l'énergie absorbée n'est limitée que par l'emballement thermique (W_{th}) où elle diminue de $1.25 \cdot 10^8$ à $0.8 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$ ($\approx 36\%$). A cette valeur du courant apparaît le craquement limitant la capacité d'énergie à W_{cr} , juste inférieure. A l'approche de 10^3 A/m^2 le phénomène de perforation apparaît (W_p) pour des énergies proches à celle entraînant l'emballement thermique. Pour des courants variant de 10^2 à 10^6 la varistance est détruite par phénomène de craquement. Si ce n'est pas le cas, l'emballement

thermique vient juste après. Au delà de 10^6 A/m^2 seul l'emballement thermique limite la capacité d'énergie car les limites d'énergie des phénomènes de craquement et de perforation croissent brusquement à des valeurs élevées. Les temps de défaillances correspondants sont très proches et varient linéairement avec le courant sur l'échelle logarithmique. Cela veut dire que la capacité d'absorption d'énergie par perforation est supérieure à celle par craquement et par emballement. L'effet de l'intensité du filament est représenté sur la figure 4.16.b où on a diminué l'intensité à $F_p=2.5\%$. Nous constatons que la diminution de l'intensité du filament, c'est-à-dire du degré du non uniformité, entraîne l'augmentation de la capacité d'énergie par rapport au cas précédent ($F_p=5\%$) d'environ 44%. Le mode de défaillance dominant dans ce cas est l'emballement thermique car les contraintes diminuent suite à la réduction du degré du non uniformité de l'échauffement. La capacité d'absorption d'énergie pour le cas de la varistance de rayon $R=1.6\text{cm}$, varie de 100J/cm^3 à 142J/cm^3 .

Ces valeurs correspondent bien aux valeurs mesurées pour varistances à faible champ de seuil (voir fig.2.13). Pour le cas de la varistance pour poste HT, (figure 4.13.c), avec un rayon un peu plus élevée, le craquement est le mode dominant. On remarque que la courbe inférieure, limitant la capacité d'énergie, est celle du craquement pour toutes les valeurs du courant. Donc l'augmentation du rayon favorise le non uniformité et entraîne par conséquent la défaillance par craquement. Comme synthèse de la figure (4.16), on peut dire que la capacité d'absorption d'énergie varie avec l'amplitude, la durée du courant, les dimensions et le non uniformité de la varistance.

La capacité d'absorption d'énergie des varistances à petites dimension (parafoudre de distribution), est limitée en moyenne par le phénomène d'emballement thermique, bien que pour le cas des varistances fortement non uniformes le craquement peuvent également dominé et la varistance craque avant qu'elle s'emballe thermiquement.

Pour les varistances de grandes dimensions (parafoudre pour poste) le craquement est en moyenne le mode de défaillance dominant dans ce cas.

On justifie l'augmentation de la capacité d'énergie par rapport à la perforation et au craquement aux forts courants, par l'uniformité de la distribution du courant résultant de la disparition des barrières de potentiel à l'entrée de la deuxième zone linéaire. De même, la réduction de l'énergie absorbée en termes de ces deux modes aux moyennes valeurs du courant est expliquée par l'accroissement du non uniformité durant la zone non linéaire de la caractéristique $J(E)$.

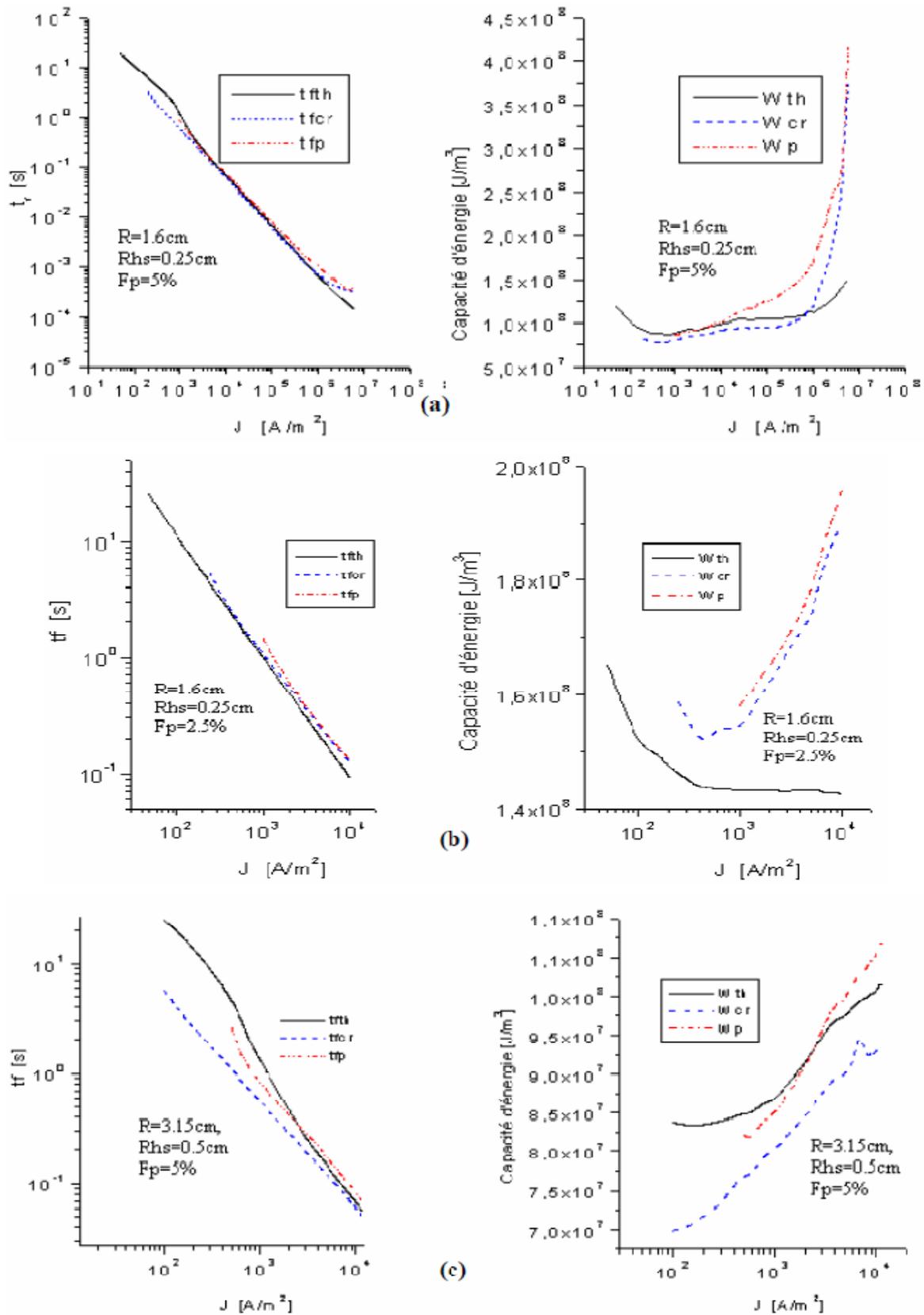


Figure 4. 16 : Capacité d'absorption d'énergie et temps de défaillance en fonction de la densité de courant moyenne pour deux valeurs du rayon et deux valeurs de l'intensité du filament.

2.5. Régime impulsionnel

Le régime impulsionnelle simule le fonctionnement du parafoudre dans le cas d'un coup de foudre. La simulation est utilisée également pour la prédiction du comportement du parafoudre lors des essais normalisés. Les paramètres de simulation dans ce cas sont comme suit : $L=4.5\text{cm}$, $R=1.6\text{cm}$, $Rhs=0.25\text{cm}$, $Fp=5\%$, conductivité de la région de retour (du grain) $\sigma_g = 1.25\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$. Le courant de foudre est représenté par une fonction bi exponentielle, 65 kA , $4/10\mu\text{s}$ donnant une densité moyenne de 8.08 kA/cm^2 , illustrée par la figure (4.18). On représente également l'énergie absorbée sur la même figure.

La température et les contraintes résultantes du courant impulsionnel sont données par la figure (4.17). On constate l'augmentation excessive de la température (au delà de la température de stabilité), tandis que les contraintes restent très inférieures aux limites de craquement. Ce ci confirme alors que pour le cas de varistances de petite dimension soumise aux forts courants, la probabilité de défaillance par emballement thermique est très élevée. Pour le cas de la varistance de dimension $R=3.15\text{cm}$, $Rhs=0.5\text{cm}$ on représente la densité de courant et le champ résiduel sur la figure (4.19), pour le cas du courant 65kA $4/10\mu\text{s}$. L'échauffement et les contraintes résultants dans ce cas sont illustrés sur la figure (4.12). Nous constatons la diminution de la température maximale à cause de la réduction de la densité moyenne du courant. Mais on remarque l'apparition du non uniformité de l'échauffement due aux dimensions. Dans ce cas également la probabilité de défaillance par emballement thermique est élevée. Car la valeur des contraintes est très loin des limites de craquement.

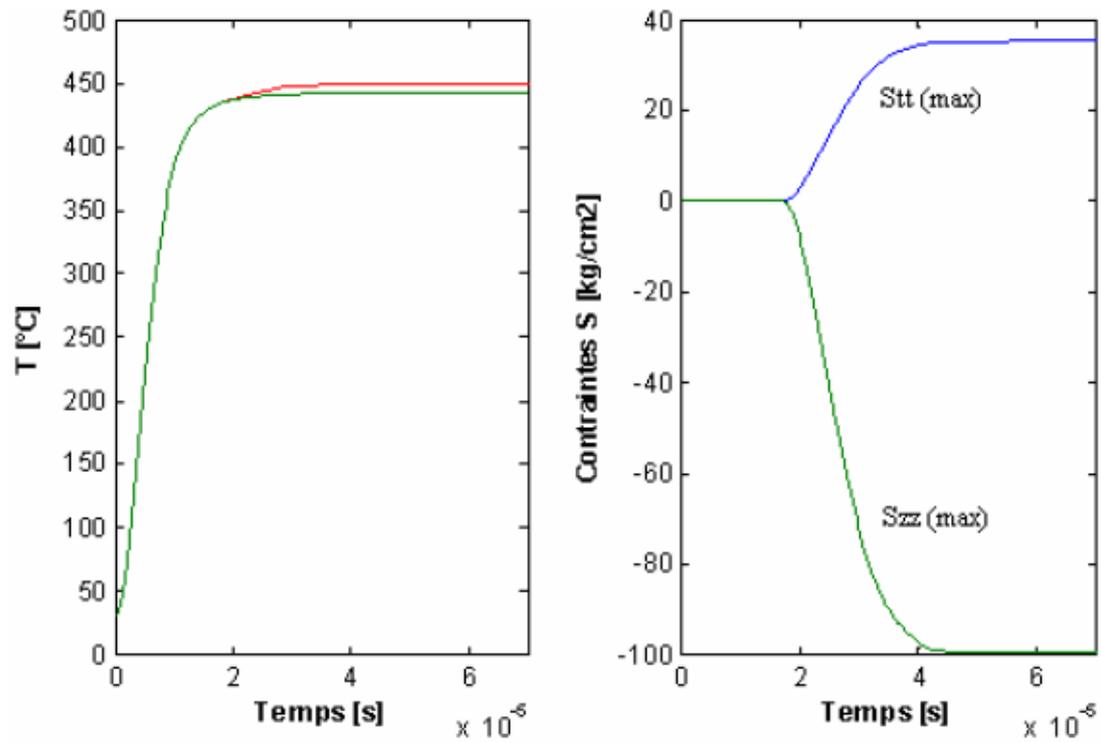


Figure 4. 17 : Température du filament et moyenne et contraintes maximales résultant du courant impulsionnel 65kA, 4/10us pour $R=1.6\text{cm}$, $R_{hs}=0.25\text{cm}$ et $F_p=5\%$.

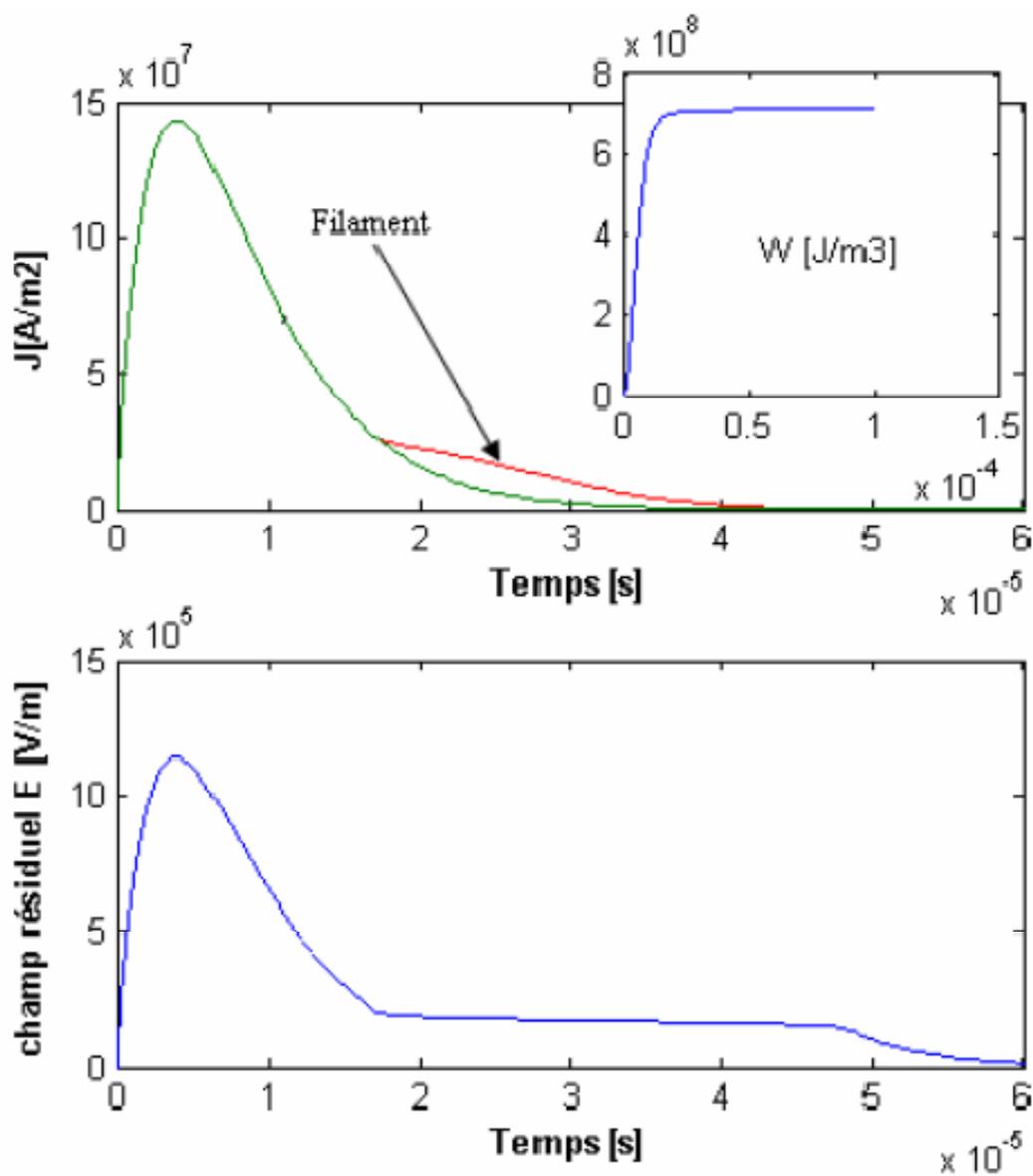


Figure 4. 18 : Courant impulsionnel 65kA, 4/10 μ s, et champ résiduel résultant pour le cas de $R=1.6\text{cm}$, $R_{hs}=0.25\text{cm}$, $F_p=5\%$.

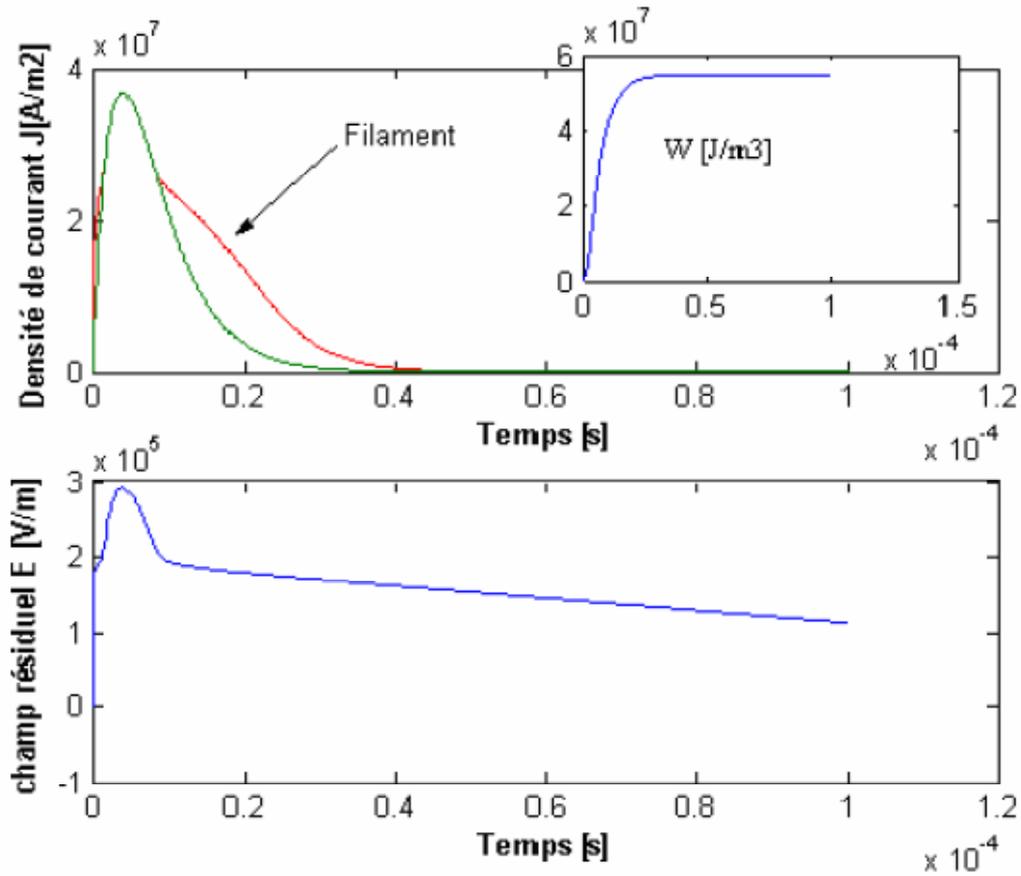


Figure 4. 19 : Densité de courant J_{moy} et champ résultant d'un courant de 65kA, 4/10us, R=3.15cm, Rhs=0.5cm, Fp=5%.

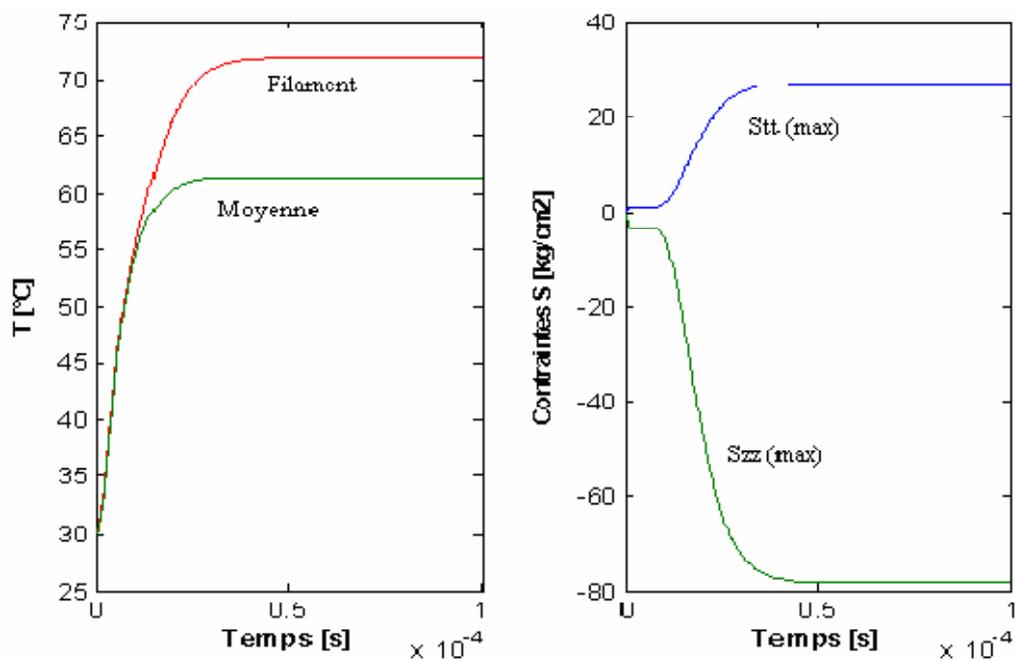


Figure 4. 20 : Température et contraintes maximales pour un courant de 65kA, 4/10us, R=3.15cm, Rhs=0.5cm, Fp=5%.

Conclusions générales

Les réseaux de transport et de distribution d'électricité est le siège de surtensions soit d'origine interne (surtension de manœuvres ou temporaires) ; soit d'origine externe (coup de foudre) qui provoquent de nombreuses défaillances. Ceci a conduit au développement de dispositifs de protection contre les surtensions transitoires.

Les parasurtenseurs sont les moyens de base utilisés pour la protection contre les surtensions transitoires. Leur principe consiste à écrêter la surtension en gardant la tension à leurs bornes égale au niveau de protection supporté par le matériel. Les parasurtenseurs, et les parafoudres en particulier, doivent être installés le plus près possible de l'appareillage à protéger.

Les parafoudres ZnO offrent les meilleures caractéristiques électriques grâce à la technologie des varistances à base d'oxyde de zinc. Ces varistances sont caractérisées essentiellement par un fort coefficient de non linéarité et une grande capacité d'absorption de l'énergie qui dépasse 100 J/cm^3 . Cette dernière est limitée par trois phénomènes d'origines thermomécaniques résultant de l'excès de température et du non uniformité de la varistance. L'apparition de l'un ou l'autre des modes dépend des dimensions et du degré du non uniformité du bloc. En moyenne l'emballement thermique est le mode de défaillance dominant pour les varistances de petites dimensions tandis que le craquement est en moyenne le mode dominant pour les varistances à grandes dimensions. Cependant quant le bloc varistance de petite dimensions est fortement non uniforme le craquement peut apparaître pour des densités de courant situées sur la zone non linéaire.

La conduction durant la deuxième zone linéaire est limitée par la conductivité des grains de ZnO. Celle-ci peut être contrôlée par dopage avec l'aluminium afin de réduire le champ résiduel au court du passage des forts courants de foudre. Les calculs montrent qu'une valeur optimale de la conductivité des grains donne à la fois le minimum d'échauffement et un champ résiduel acceptable. Cette valeur doit être donc prise en compte durant la fabrication en ajoutant la quantité d'aluminium adéquate.

Comme perspective et en complément à ce travail il reste à :

- 1- Vérification expérimentale des résultats.
- 2- Simuler la variation de la capacité d'absorption de l'énergie avec la variation du champ de seuil donc l'effet de l'antimoine.
- 3- Investigation de la capacité d'absorption de l'énergie de la nouvelle génération des varistances qui sont à base d'oxyde d'étain SnO_2 et d'établir donc une comparaison avec les varistances ZnO .
- 4- Rechercher de nouveaux additifs (formulations) qui permettent l'amélioration des propriétés électriques de parafoudres à varistances ZnO , courant de fuite, coefficient de non-linéarité, capacité d'absorption de l'énergie....etc.
- 5- Réaliser des échantillons.

Bibliographie

- [1]- M.Aguet, A.Ianoz : *Traité d'électivité Vol XXII/Haute Tension, Énergie Electrique, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2 ème édition 1990.*
- [2]- Luc Lasne : *Electrotechnique, édition Dunod 2008.*
- [3]- Affolter Jean-François : *Haute Tension, Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud eivd, édition Yverdon-les-Bains, octobre 2000.*
- [4]- D.Fluchiron : *Surtension et coordination des isolements, Cahier technique de Schneider n°179.*
- [5]- Frédéric Maciela : *Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB, Technique de l'Ingénieur D4755v2.*
- [6]- E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel : *High Voltage Engineering Fundamental, 2nd edit, Butterworth-Heineman , Great Britain, 2000.*
- [7]- C.GARY, A.BOILLOT, H.GIGOT: *Ligne et postes: choix et coordination des isolements, Techniques de l'ingénieur 6-1980-D670/D671.*
- [8]- Abderrahim Fakker : *'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.*
- [9]-Shr-Nan Bai , Tseung- Yuen Tseng : *'Influence of cooling rate on electrical proerties of zinc oxide based varistors' , Jpn. J. Appl. Vol 31 (1992) pp.81-86. Part No1. January 1992.*
- [10]- Jean Marie Haussonne *'Céramique pour l'électronique et l'électrotechnique' Presses polytechniques et universitaires Romandes 2002.*
- [11]-T.Takemura , M.Kobayachi , Y.Takada, K.Sato, *« effet of Bismuth sesquioxide on the characteristics of ZnO varistors » , Jour.Am.Ceram. Soc., 69, N°5, 430-63,1986.*
- [12]-T.Asokan : *« Effets of dopants distribution on the non linear properties of ZnO based non linear resistor » , Br.Cerm,Trans.J,80,187-189,1987..*

- [13]- Matsuoka M, Matsuyama T, and Iida Y, « Voltage Nonlinearity of Zinc Oxide Ceramics doped with Alkali Earth Metal Oxide » , *Japanese Journal of Applied Physics* , Vol.8, pp.1275-1276, 1969.
- [14]- David R. Clarke « Varistor Ceramics » *J. Am. Ceram. Soc.*, 82[3] 485-502 (1999).
- [15]- Mattias Elfving : « Nanoscale characterisation of barriers to electron conduction in ZnO varistor materials » , *PhD Thesis, Uppsala University, Sweden 2002*.
- [16]- M. Houabes, C. Talhi, BUI AI : « Effet de l'oxyde d'antimoine sur les varistances ZnO utilisées dans les parafoudres H.T » , *Deuxième conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi Ouzou 17, 18, 19 novembre 1997*.
- [17]- L. Wu, C. Y. Shen, Y. C. Chen : « The microstructure of ZnO varistor doped with antimony oxide » , *J. J. App. Phys. Vol.30, No11A, November, 1991. pp.2850-2856*.
- [18]- H. R. Philipp, L. M. Levinson « Degradation phenomena in zinc oxide varistors : A review » , *Advances in ceramics V7, Additives and interfaces in electronic ceramics, Am. Ceram. Soc., edited by Man. F. Yan, Arthur. H. Heuer 1983*.
- [19]- M. Bartkowiak, M. G. Comber, G. D. Mahan : « failure modes and energy absorption capacity of ZnO varistors » , *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.1, January 1999*.
- [20]- DFK Henning , R. Hartung, P. Reijnen. « Grain Size Control in Low-Voltage Varistors » , *J. Am. Ceram. Soc.* 73 [3], pp.6445-6448, 1990.
- [21]- Mourad Houabes : « Contribution à l'étude du rôle de l'oxyde d'aluminium pour l'amélioration des caractéristiques électriques des parafoudres à varistances ZnO » , *thèse de Doctorat, Annaba 2005*.
- [22]- Catalogue sur les parafoudres, SIEMENS, 2000.
- [23]- Samir BEDOUI, Abdelhafid BAYADI : « Atténuation des surtensions dans les postes de transformation haute tension par l'emploi des parafoudres ZnO » , *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP' 2007*.
- [24]- S-N Bai and T-Y Tseng : « Influence of Cooling Rate on Electrical Properties of Zinc Oxide-Based Varistors » , *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, No. 1, p.81-86, (1992).

- [25]- M.S. Castro : « Cooling rate effects in ZnO varistors » ,Joul. of Mater. Sci., 3,218-221, (1992).
- [26]- P.R. Emtage : « The Physics of Zinc Oxide Varistore »,J. Appl. Phys., 48, 4372-84 (1977).
- [27]- R. Einzinger : « Grain-Boundary Phenomena in ZnO varistors », pp 343-55 in Grain Boundaries in Seniconductors. Edited by H.J.Leamy ,G.E. Pike, and Seager .Elseiver ,New York (1982).
- [28]- R. Einzinger : « Metal Oxide Varistor Action-A Homojunction Breakdown Mechanism » ; Appl. Surf. Sci., 1, 329-41 (1978).
- [29]- CH. Keiny, A. Sbai: « Ferrorésonance dans les réseaux, *Technique de l'ingénieur D4745* ».
- [30]- Mathiew N.O Sadiku : « Numerical Techniques in electromagnetics » , 2nd edit, *CRC press New York, 2001*.
- [31]- John H. Leinhard IV/ John H. Leinhard V: A Heat Transfer Text book, 3rd edit, *Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts USA, 2003*.
- [32]- 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*.
- [33]- 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*.
- [34]- P.Q. Mantas, L.Batista: « The barrier height formation in ZnO varistors », *Journal of European Ceramic Society 15(1995) 605-615*.
- [35]- M. A. Alim, S.Li, F.Liu, P. Cheng : « Electrical barriers in the ZnO varistor grain boundaries », *phys. Stat. sol. (a) 203, No.2, 410-427 (2006)*.

- [36]- D. Prisching, A.H. Pecina : « Temperature behaviour of ZnO varistor before and after post sintering heat treatment », *Material Letters* 43 (2000) 295-302.
- [37]- Nguyễn Hữu Tri, A.Bui, A.Loubière : « La tenue aux ondes de chocs des varistances ZnO à haut champ de seuil », *J.Phys. D : Appli.Phys.* 28(1995) 1723-1728.
- [38]- C.J. Leconte, A. Rousseau, A.Vicaud, F. Villefranque : « Spécifications EDF pour céramiques ZnO et parafoudres sous enveloppe porcelaine » *Journée d'étude ; Applications des parafoudres moyenne tension, Gif-sur-Yvette, SEE-Club 12,1988.*
- [39]-M.Graciet , R.Salmon, G Le Flem et P. Hagenmuller : « evolution et role des constituants chimiques au cours du processus de fabrication des varistances à base d'oxydes de zinc » . *Rev. De Phy.App.*, 13, 67-74 (1978).
- [40]-Bernasconi,J., Stassler, S.,Knecht, B. Klein,H.P., Menth .A , *Solid Stat Commun.*20 (1976) 1053 ; *Ibid.* 21 (1977) 867.
- [41]- Wong J.,Morris, W.G.,*Ceramic Bulletin* 53 (1974) 871.