

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande électrique
Thème

Les parafoudres dans le réseau électrique

Présenté Par :

- 1) Slaimi Djamel Eddine
- 2) Messaoudi Kamel

Devant le jury composé de :

M ^{elle} TOUHAMI. A	M.A.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Président
Mr. AYACHE. Z	M.A.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Mr. ZELMAT.S	M.C.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

Remerciements

Notre profonde gratitude et nos plus grands remerciements vont en priorité à Dieu Tout Puissant qui sans Son aide, ce travail n'aurait jamais abouti.

Nous remercions en tout premier lieu ***Mr Zelmat.S*** pour la qualité de son encadrement exceptionnel, et de m'avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toutes les étapes de ce travail.

Nous remercions également tous les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Merci Mille fois

Dédicaces

Je dédis ce modeste de travail :

A mes très chers parents pour leurs conseils et leurs encouragements ;

A mon frère Mohamed pour leur encouragement ;

A ma sœur : Hind

A ma fiancée Messagmine Bochra pour sa compréhension et ces encouragements ;

A mon binôme Kamel ;

A mon encadreur Zelmat.S ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis ...

A toute ma promotion

DJAMEL EDDINE

Didicas

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon très cher père, l'être le plus noble à sacrifier les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussi dans ma vie.

Je les remercie pour toute patience, et qui ont voulu

Toujours que je sois heureux,

Mes frères

Mes sœurs

A toute la famille

A Tous mes Amis:

HOSIN, OSAMA, AHMED Mohamed, YASSIN

NAREMAN, ET BIEN SUR MON BINOME ET

MON Frère DJAMEL ; ... ET à mon rapporteur

A mes professeurs

MESSAOUDI KAMEL

Introduction générale

Dans le monde entier, les réseaux d'alimentation électrique sont soumis à des contraintes de surtension qui peuvent être soit d'origine interne (surtensions de manœuvre), soit d'origine externe (surtensions de foudre). Sur les réseaux électriques, l'amplitude des surtensions de foudre peut atteindre plusieurs centaines de kilovolts, et ainsi largement dépasser la tenue diélectrique des matériels tels les transformateurs de puissance. Ces surtensions sont très susceptibles de provoquer le contournement et/ou la destruction des équipements sensibles lorsqu'aucune protection adéquate n'est utilisée. Les exploitants des réseaux électriques doivent sans cesse améliorer leur qualité de service à coûts réduits. Dans cette optique, une politique appropriée de protection contre les surtensions est essentielle. A condition d'être soigneusement sélectionnés et correctement installés, les parafoudres constituent le meilleur investissement pour parvenir aux résultats attendus. Leur impact sur la qualité de l'énergie distribuée est indéniable et ils contribuent fortement à renforcer la sécurité à la fois pour le matériel et les personnes ainsi qu'à diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance. Les parafoudres à oxyde de zinc gagnent actuellement du terrain et sont de plus en plus utilisés que les parafoudres à base de carbure de silicium au niveau mondial à cause de leurs performances électriques, telle que la forte non-linéarité de la caractéristique, le faible courant de fuite en régime permanent et le fort pouvoir d'absorption d'énergie électrique ainsi que la facilité d'implantation et le coût compétitif. Par ailleurs, les parafoudres à oxyde de zinc sont utilisés pratiquement dans toute la gamme de tensions allant de la basse tension à la très haute tension.

Notre travail est une étude bibliographique détaillée sur les parafoudres. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les surtensions qui peuvent survenir sur le réseau électrique, notamment celles dues à la foudre. On présentera également les principes de protection et les moyens utilisés pour protéger les biens et les personnes de ces surtensions, qu'elles soient d'origine externes ou internes.

Le deuxième chapitre présente la protection basée sur l'utilisation du parafoudre. Il traite particulièrement son installation en basse tension ainsi que les différents paramètres à considérer pour avoir le bon choix notamment selon le schéma des liaisons à la terre adopté.

Le troisième chapitre traite le parafoudre à base d'oxyde de zinc ainsi que celui basé sur le carbure de silicium dans la gamme de tension HTA (moyenne tension) ainsi que les principaux accessoires utilisés.

Enfin, le dernier chapitre présente l'utilisation des parafoudres dans les réseaux HTB (haute et très hautes tension). On y présente son principe de fonctionnement et les paramètres de sélection.

Chapitre I

Généralités

I.1 Les réseaux électriques :

Un réseau électrique est un ensemble 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 elles dans des postes électriques.

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].

I.2 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 [12] :

- La fréquence.
- Les niveaux de tension.

- 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 Japonais les deux fréquences sont utilisées) [1].

- Tension normalisées :

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

	Usage	Tension normalisé	Norme (Standard Européen)
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
HTA	Lignes interrégionales et répartition régionale	33 kv/20 kv/15 kv (MT)	HTA(1kv à 50 kv)
BT	Répartition locale, distribution et consommation	400 v 230 v mono (BT)	BT<1 kv

Tableau I.1 : Tensions normalisées du réseau national français ligne BT, HTA et HTB [1].

I.3 Le réseau électrique réel :

Le réseau électrique réel est constitué de diverses centrales 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 abaisseurs qui délivrent la tension domestique basse tension (BT) à un certain nombre de pôles de consommation. On représente le schéma d'un réseau complet sur le schéma suivant [1] :

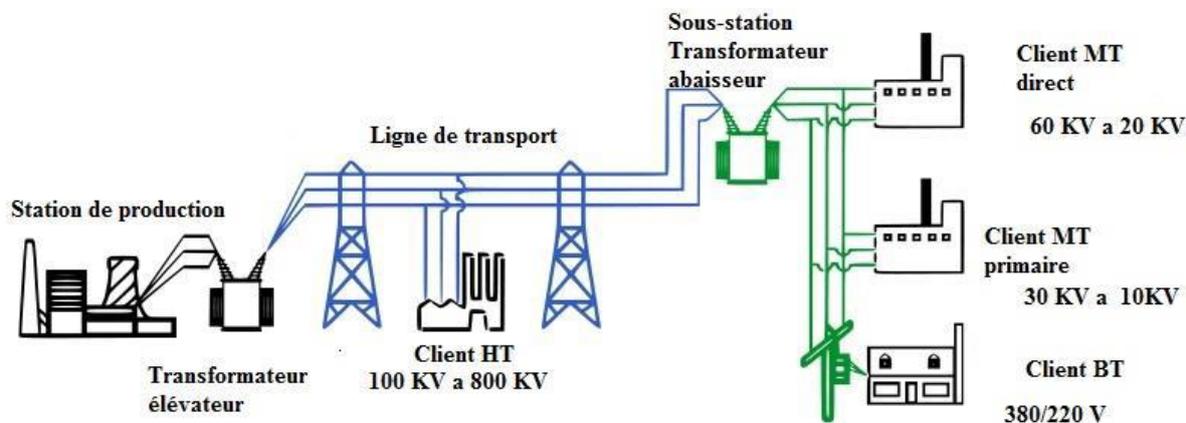


Figure I.1 : schéma descriptif de différentes étapes du réseau électriques [18].

I.4 Les surtensions transitoires :

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....) [7].

Les surtensions sont classées généralement en « Surtension internes » et « Surtensions externes ».

I.4.1 Surtension internes :

Il s'agit dans ce cas de surtensions transitoires d'amplitude élevée et de courte durée. On admet de plus que ces surtensions sont des ondes à front lent (hautes fréquences plus ou moins amorties). Les surtensions internes les plus élevées se manifestent lors de coupures de fortes charges réactives (bobine de réactif), de charges des groupes de production, des transformateurs et des lignes à vide, des batteries de condensateurs sous tension (machines débranchées). La forme de l'onde de surtension dépend du type de disjoncteur, de son emplacement, de la fréquence propre du circuit, de la situation du neutre par rapport à la terre et du type de la charge coupée. La durée des surtensions de manœuvre est de l'ordre de une à quelques millisecondes [11].

I.4.1.1 Surtensions de manœuvre :

Les surtensions de manœuvre sont provoquées par des changements brusques de la configuration du réseau dus soit à la manœuvre d'appareils tels que disjoncteur ou interrupteur, soit à la fusion d'un coupe-circuit. Les plus hautes surtensions apparaissent lors de l'enclenchement et du réenclenchement de lignes de transport.

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

Les manœuvres dans un réseau peuvent créer des ondes de surtension ou des trains d'ondes de haute fréquence apériodiques ou oscillatoires à amortissement rapide.

- surtensions de commutation en charge normale (coupure ou établissement de courant de charge): coefficient de surtension entre 1.2 et 1.5
- surtensions causées par l'établissement et l'interruption des courants inductifs
- surtensions causées par les manœuvres sur les circuits capacitifs: mise sous tension de batteries de condensateurs (facteur de surtension jusqu'à 3), mise sous tension de lignes ou câbles à vide (facteur de surtension jusqu'à 2), coupure de circuits capacitifs, ...

Les commutations de lignes causent des surtensions qui sont en général proportionnelles à la

tension de la ligne.

La surtension causée par la mise sous tension d'une ligne en circuit ouvert est une des plus importantes surtensions qui peuvent survenir [11].

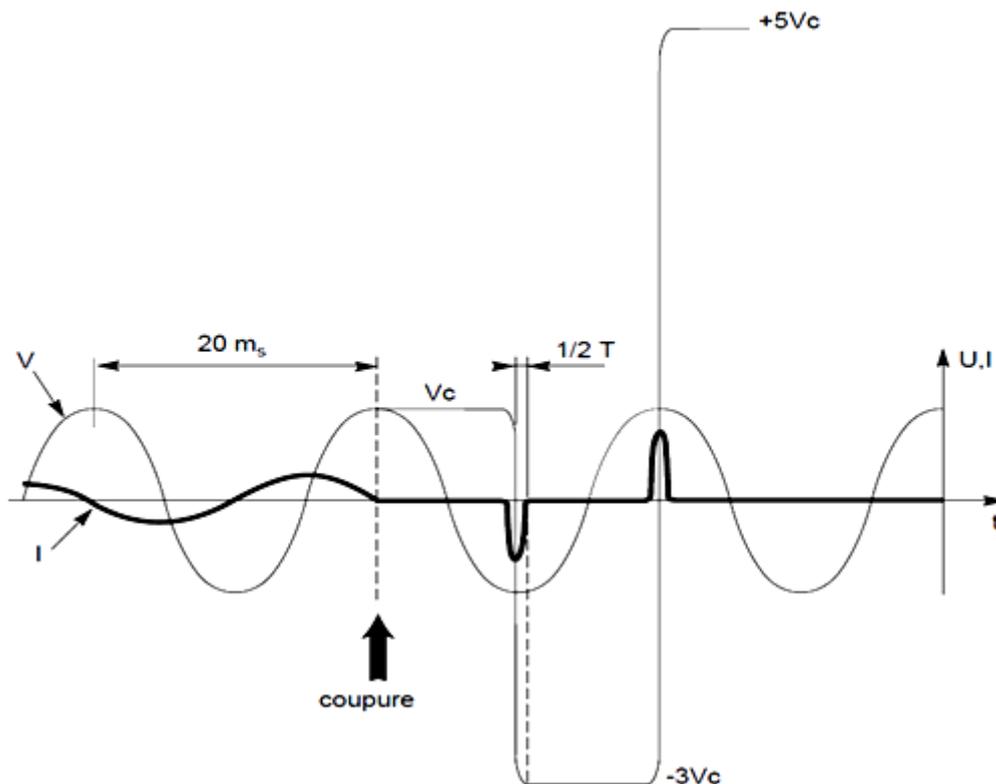


Figure I.2 : Séparation d'un banc de condensateurs du réseau par un appareil à manœuvre lente [11].

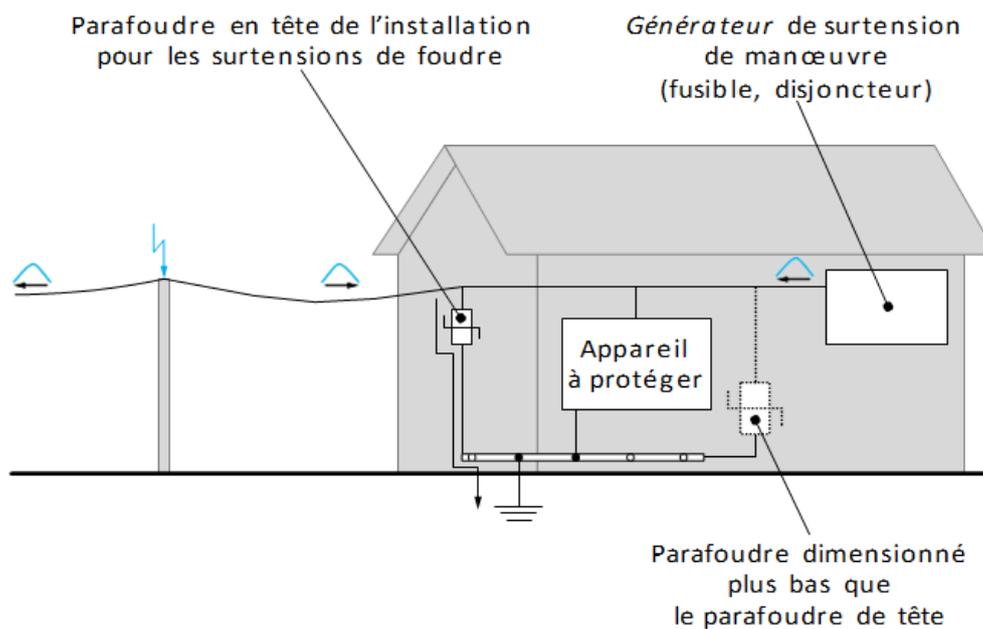


Figure I.3 : Surtensions de manœuvre dans l'installation [4].

I.4.2 Surtensions externes :

Ces surtensions, externes ou surtensions d'origine atmosphérique, ont une amplitude élevée (plus forte que celle des surtensions de manœuvre). Elles peuvent atteindre le matériel électrique d'un poste à haute tension (HT) ou à moyenne tension (MT). Les surtensions externes se propagent sur les lignes aériennes reliées au poste soit directement jusqu'aux transformateurs, soit par des câbles reliés eux-mêmes aux transformateurs et aux disjoncteurs. Ce sont des ondes mobiles très brèves, de quelques dizaines de microsecondes, le coup de foudre direct étant plus rare [1].

I.5 Surtension transitoires de foudre :

➤ 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 et sol.
- 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 μ s et une durée de demi-amplitude de 20 à 50 μ s (durée jusqu'à ce que la tension ait atteint la moitié de sa valeur maximum).

➤ 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 quelque dizaines de microsecondes (figure I.4). 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. [1]

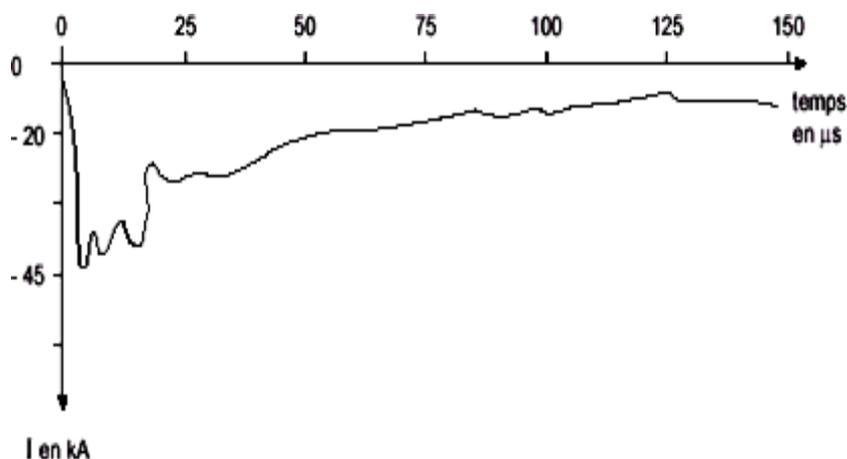


Figure 1.4 : Onde du courant de foudre [1].

• **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.

• **Temps de montée (temps de front) :**

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

• **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.

• **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.

• **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.

•**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 : $q=I. t$ (I.1)



Figure I.5 : L'éclair de la foudre [2].

I.6 Les coups de foudres

Les coups sont classés généralement en « coups de foudre direct »et «coups de foudre indirect » [10].

I.6.1 Coups 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).

Il entraîne avec lui une onde de tension dont la valeur instantanée est approximativement égale à : $v(t) = Z. i(t)/2$ (I.2)

Avec :

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 [10]

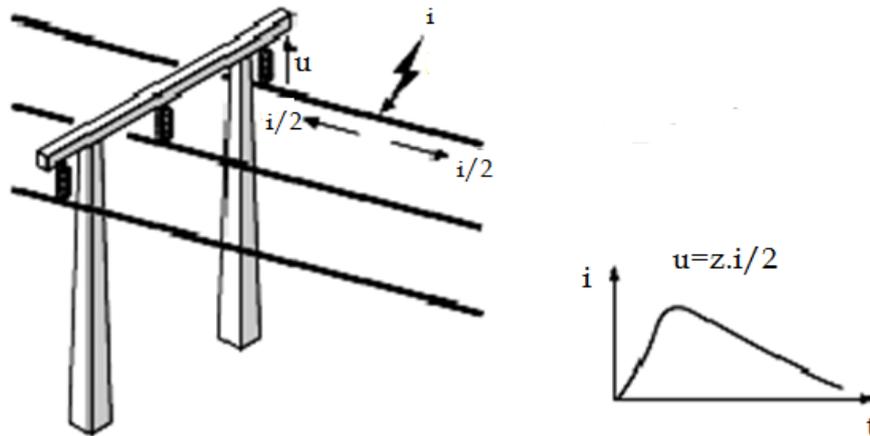


Figure I.6 : Coups de foudre direct [10].

I.6.2 Coups de foudre indirect :

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). 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 [10].

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 [10] :

$$U(t) = x [R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}] \quad (I.3)$$

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 amorcées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre direct

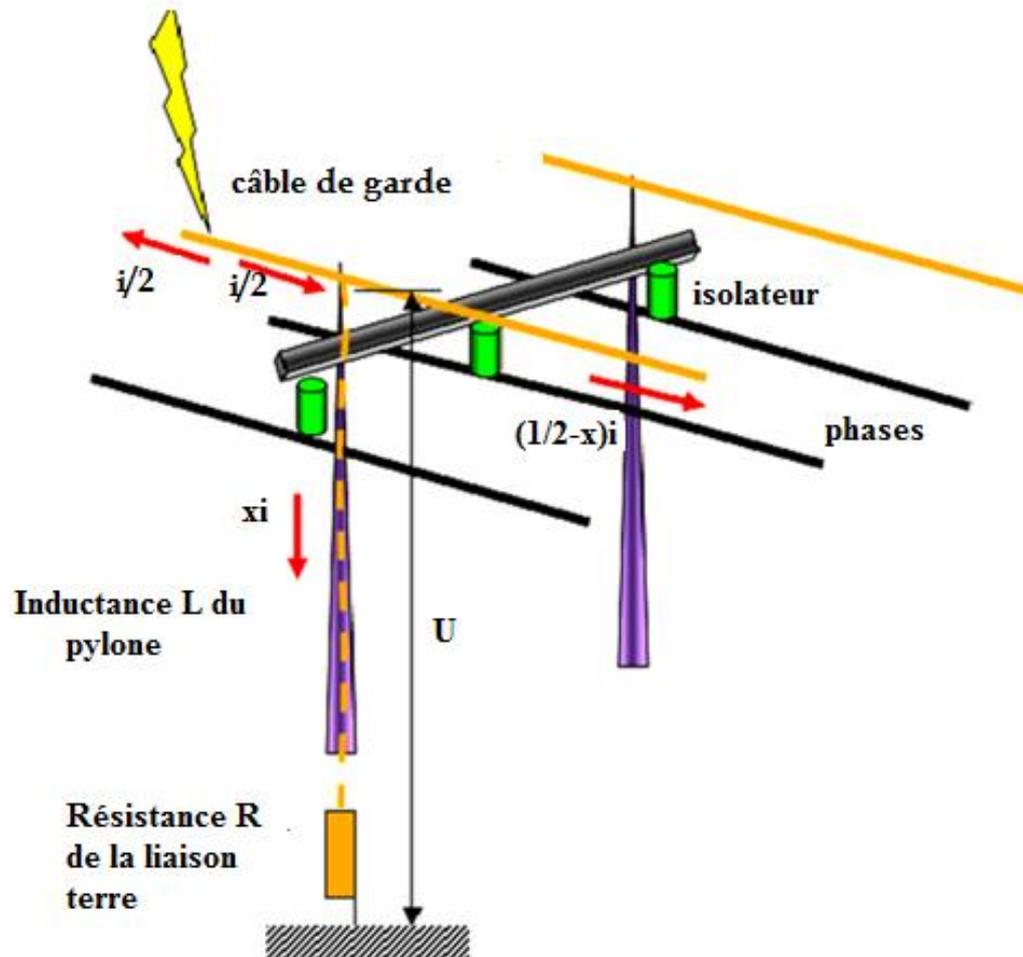


Figure I.7 : coups de foudre sur un câble de garde [10].

I.6.3 Les effets physiques de foudre

Les effets d'un courant de décharge atmosphérique sont liés à la présence de tout courant dans un conducteur. Ils sont de différentes natures:

- électriques (charges courants);
- électrodynamiques (forces);
- thermiques (dégagement de chaleur);
- électromagnétiques (champs rayonnés induisant des surtensions dangereuses dans les circuits électriques);
- électrochimiques (décomposition galvanique);
- acoustiques (tonnerre, onde dépression);
- physiologiques sur le cœur et les centres nerveux qui commandent la respiration) [24].

I.7 Protection des réseaux électriques contre les surtensions :

I.7.1 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 [8]. On distingue trois niveaux de protections contre les surtensions :

I.7.1.1 Premier 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.

I.7.1.2 Deuxième 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 de transformation d'onde de foudre à la terre tels que :

- Eclateurs.
- Parafoudres HT.

I.7.1.3 Troisième 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.

I.7.2 Paratonnerres :

Le paratonnerre est un dispositif qui, historiquement était conçu à l'origine afin «d'écouler à la terre le fluide électrique contenu dans le nuage orageux et ainsi empêcher la foudre de tomber ».

Depuis, ces notions portent le nom d'effet de pointe en électrostatique et de cage de Faraday. Pour établir une protection contre la foudre, il faut construire une cage de Faraday enveloppant l'édifice à protéger [15].

I.7.2.1 Paratonnerres à tige simple:

Les paratonnerres à tige simple constitués d'une pointe simple, de deux descentes et de deux prises de terre, ces paratonnerres assurent la protection de zones plus réduites [15].

Le schéma d'un paratonnerre à tige simple est illustré dans (figure I.8)

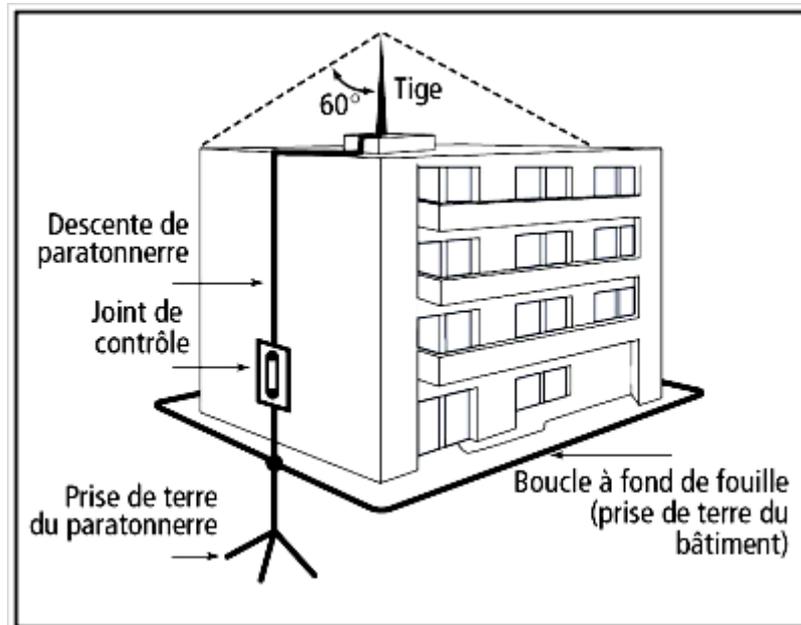


Figure I.8: Paratonnerre à tige simple [15].

I.7.2.2 Paratonnerre à cage maillée:

La cage maillée est constituée d'un réseau conducteur disposé à l'extérieur du bâtiment à protéger. Un maillage réalisé en toiture, est muni de petites pointes caprices (0,30 à 0,50 m) ; il est ensuite relié en sol par plusieurs descentes. Toutes ces descentes aboutissent à des pris de terre individuelles, reliées entre elles par une ceinture enterrée.

Ce type de paratonnerre est présenté dans la (Figure I.9) [15].

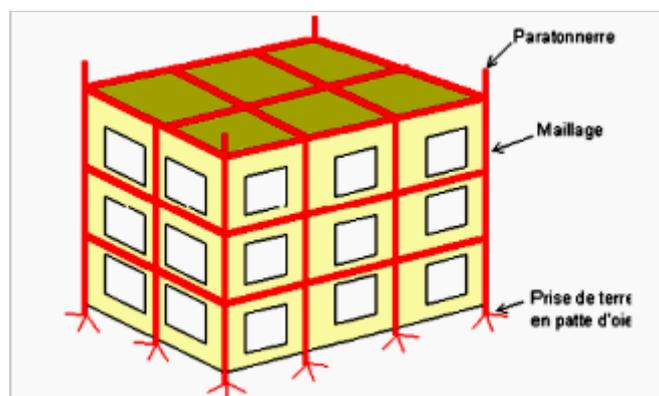


Figure I.9 : Paratonnerre à cage maillée [15].

I.7.2.3 Paratonnerre à fils tendus:

Ce paratonnerre, de principe proche à celui de la cage maillée, est constitué d'un maillage de conducteurs distant de la structure à protéger ayant pour but d'éviter que le courant de foudre soit en contact avec celle-ci.

Des fils conducteurs tendus sont implantés au-dessus de la structure à protéger, raccordés à des conducteurs de descente et à des prises de terre spécifiques. La largeur des mailles et la distance entre les conducteurs de descente sont assujettis aux mêmes règles que le paratonnerre à cage maillée (méthode de la sphère fictive).

La mise en œuvre de cette protection implique une étude complémentaire au niveau mécanique (résistance des matériaux: calcul de flèches, résistance aux contraintes météorologiques...), ainsi que la définition des distances d'isolement.

Le paratonnerre à fils tendus est plus particulièrement utilisé pour protéger des zones ouvertes lorsqu'il n'existe pas de support architectural [15].

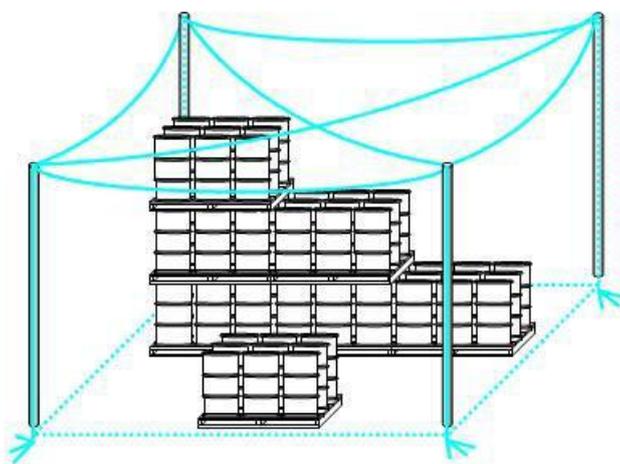


Figure I.10: Paratonnerre à fils tendus [15].

I.7.3 Les éclateurs :

Les éclateurs sont composés de deux électrodes face-à-face dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateur à air), de l'air mais dans un milieu clos (à air encapsulé) ou du gaz (éclateurs à gaz). Au-delà d'une certaine tension entre les bornes, donc d'un certain champ électrique entre les électrodes, un amorçage se produit et le courant passe en formant un arc électrique. Les éclateurs sont très robustes et permettent de dévier des courants de foudre importants ; cependant l'arc électrique qui apparaît lors du fonctionnement est maintenu par le

courant que débite le réseau : il faut donc prévoir la coupure de ce court-circuit. C'est le principe des cornes d'amorçage que l'on voit sur les équipements de distribution d'électricité mais ils sont également utilisés en basse tension [4].

I.7.3.1 Principe de 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 I.11) [4].

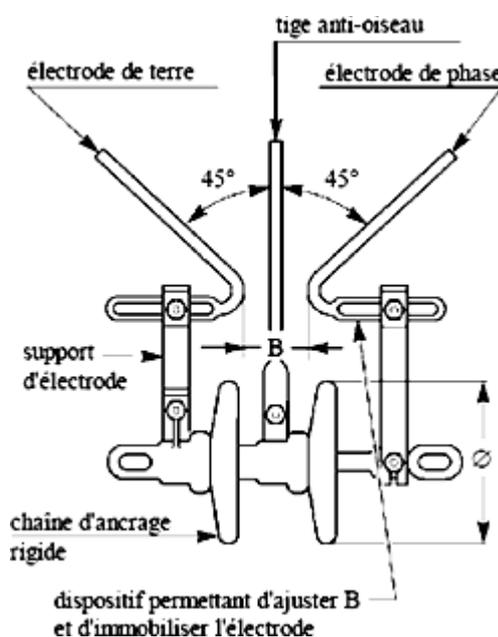


Figure I.11 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux [1].

I.7.3.2 L'éclateur à gaz:

L'éclateur à gaz est constitué d'une enceinte hermétique, généralement en verre ou en céramique, remplie d'un mélange de gaz de niveau de pureté bien défini et munie de plusieurs électrodes (en général 2 ou 3). Monté entre la ligne à protéger et la terre, il a pour effet d'écouler le courant de foudre dès que la surtension apparaissant sur la ligne est suffisante pour amorcer le gaz entre les électrodes. Après le passage de la surtension, l'éclateur reprend son état de repos, isolant à nouveau la ligne de la terre, si cette ligne est alimentée par une source d'énergie de forte impédance (cas d'une ligne téléphonique, par exemple), permettant ainsi de réduire le courant de suite [4].



Figure I.12: Éclateur à gaz forte énergie pour réseau BT [26].

I.7.3.3 L'éclateur à air:

L'éclateur à air a une tension d'amorçage qui croît à peu près linéairement avec le produit de la pression par la distance inter-électrodes, c'est-à-dire que le gradient d'amorçage dépend de la pression [4].



Figure I.13: Photo d'un éclateur à air [1].

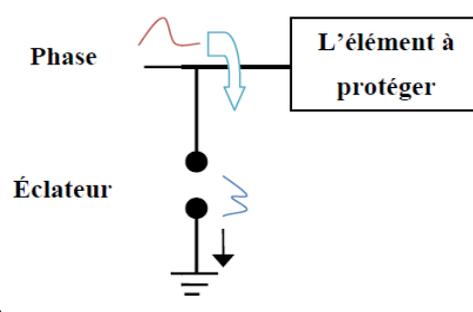


Figure I.14: Schéma d'un éclateur à air [1].

I.7.3.4 Avantages :

Les principaux avantages des éclateurs sont :

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

I.7.3.5 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 [4].

I.7.4 Le parafoudre :

Pour résoudre le problème des surtensions, le Parafoudre, nom générique désignant tout dispositif de protection contre les surtensions transitoires, est la solution reconnue et performante, qui doit cependant être choisi en fonction du risque et installé selon les règles de l'art afin de procurer une efficacité maximale [3].

Le 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 [1].

I.7.4.1 Définitions et caractéristiques du parafoudre :

Les principales grandeurs utilisées dans les parafoudres sont :

➤ **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 [1].

➤ **La tension résiduelle :**

C'est la tension maximum aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par [1] :

$$U_r = I_{\text{déch}} \cdot R_{\text{tot p}} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

U_r : La tension résiduelle.

$I_{\text{déch}}$: Courant de décharge.

$R_{\text{tot p}}$: Résistance total de parafoudre.

➤ **La tension d'extinction :**

Appelée aussi tension de désamorçage est la valeur la plus élevée de la tension de service pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite [1].

➤ **Le pouvoir de décharge :**

C'est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois de suite, sans être endommagé [1].

➤ **Le courant de suite :**

Courant à fréquence industrielle débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge [1].

I.8 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.

Les paratonnerres, les éclateurs ainsi que les parafoudres.

Ces derniers seront présentés en détails dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Parafoudres

BT

II.1 Introduction :

Les matériels électriques utilisés tant dans les applications domestiques que dans les applications industrielles sont de plus en plus sensibles aux surtensions, en raison de l'utilisation massive de composants électroniques.

Idéalement, chacune des voies d'entrée pour les surtensions doit être protégée et une grande quantité de types de parafoudres existent donc sur le marché, en plus des parafoudres pour lignes d'énergie.

Parallèlement, les composants utilisés dans les parafoudres ont toujours évolué dans le sens d'une plus grande fiabilité, d'une augmentation permanente de tenue en énergie et d'une amélioration du niveau de protection. Ces composants en Basse Tension sont présentés dans le présent chapitre.

II.2 Installation des parafoudres BT :

Les parafoudres sont installés en fonction des différents régimes de neutre (Schémas des liaisons à la terre) dont un rappel est présenté dans le (tableau II.1) et dans la (Figure II.1) [5].

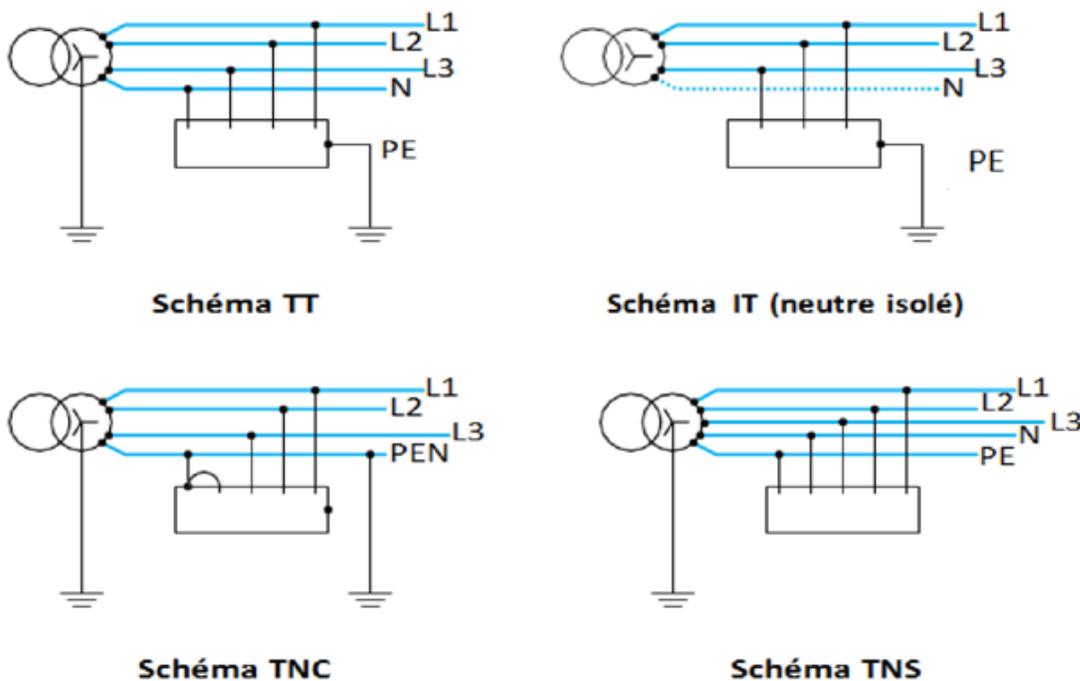


Figure II.1 : Schémas de liaison à la terre [5].

Régime	Situation de neutre	Situation des Masses	Caractéristiques générales
TT	Neutre reliée à la terre	Masses reliées à une prise de terre	Les masses des appareils sont reliées à la terre. Il n'y a pas de conducteur entre la terre locale et le neutre du transformateur également relié à la terre.
TNS	Neutre reliée à la terre	Masses reliées au conducteur de protection	Le régime TNS utilise un câble de protection entre la terre locale et la terre du neutre du transformateur. En cas de défaut, il y a établissement d'un court-circuit et ce sont les protections magnétiques des disjoncteurs qui assurent l'ouverture du circuit en défaut. Neutre et PE sont séparés.
TNC	Neutre reliée à la terre	Masses reliées au Neutre	Neutre et terre sont confondus. Là encore, un défaut entraîne un court-circuit qui est éliminé par les protections magnétiques. Il est interdit dans le résidentiel et dans les industries avec risques d'explosions.
IT	Neutre reliée à la terre	Masses reliées à une prise de terre	Le neutre isolé ou autorise la continuité de fonctionnement avec un premier défaut.

Tableau II.1 : Les différents régimes de neutre [14].

II.2.1 Installation sur les réseaux d'énergie :

L'installation en régime TT, TNS et IT peut se faire suivant deux schémas ; usuel et nouveau présenté dans la (figure II.2).

Le premier (dit usuel) est le schéma qui était usuellement utilisé jusqu'il y a quelques années (notamment en France). Nommé schéma 2+0 en monophasé et 4+0 en triphasé, dans ce schéma

chaque conducteur actif (c'est-à-dire phase ou neutre) est relié à la terre (conducteur vert-jaune PE) par un parafoudre.

Dans le nouveau schéma introduit depuis quelques années, appelé schéma 1+1 en monophasé et 3+1 en triphasé, tous les conducteurs de phase sont reliés au neutre par un parafoudre, le neutre étant à son tour relié à la terre par un parafoudre.

Les parafoudres sont donc installés selon ces deux schémas suivant le (tableau II.2) qui détermine l'implantation des parafoudres à l'entrée de l'installation et les parafoudres situés en aval [16].

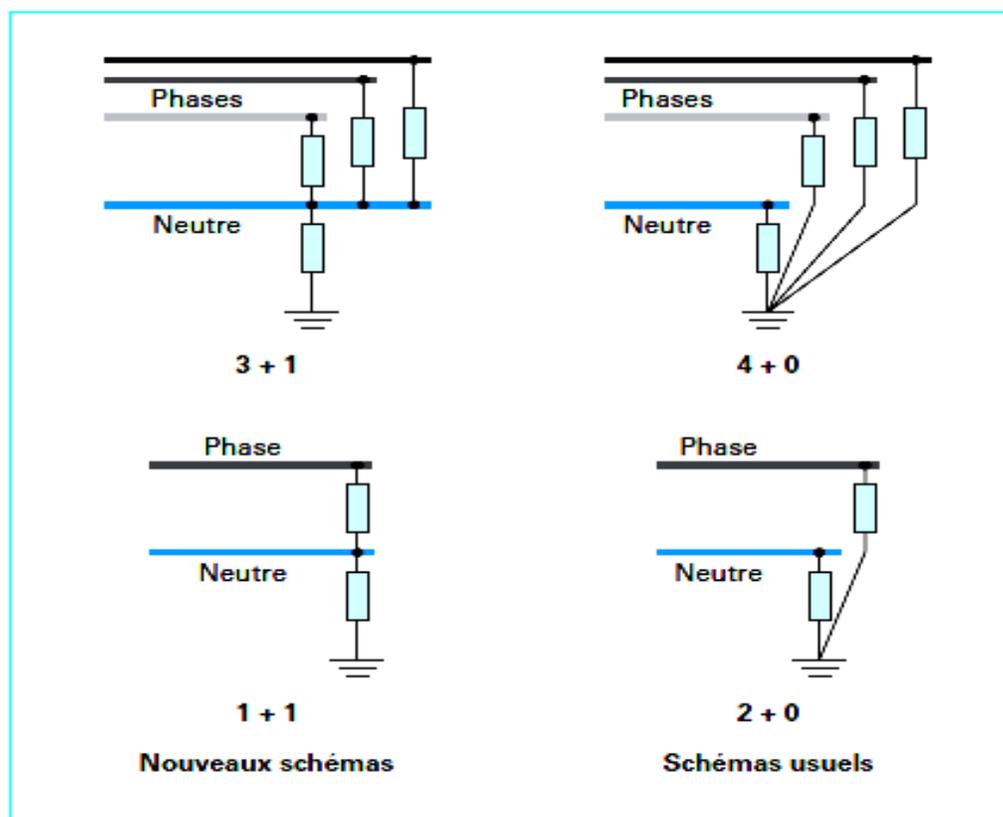


Figure II.2 : Schémas usuels et nouveau pour les régimes TT, TNS et IT [16].

Installation du parafoudre entre:	Régime de neutre							
	TT		TNC	TNS		IT avec neutre distribué		IT sans neutre distribué
	Schéma d'installation			Schéma d'installation		Schéma d'installation		
	2+0 4+0	1+1 3+1		2+0 4+0	1+1 3+1	2+0 4+0	1+1 3+1	
Conducteur de phase et conducteur PE	OUI			OUI		OUI		OUI
Conducteur de neutre et conducteur PE	OUI	OUI		OUI (2)	OUI	OUI	OUI	
Conducteur de phase et conducteur de neutre	OUI (1)	OUI		OUI (2)	OUI	(3)	OUI	
Conducteur de phase et conducteur PEN			OUI					

(1) Résistance de neutre faible comparée à celle de l'installation
 (2) Distance entre point commun PE-neutre et parafoudre supérieure à une dizaine de mètres
 (3) En général ce parafoudre n'est pas nécessaire mais il peut apporter une protection complémentaire

Tableau II.2 : Installation des parafoudres selon le schéma utilisé [16].

II.2.2 Surtensions en mode différentiel :

Dans le cas du régime TT, un autre phénomène peut se produire qui correspond à l'apparition d'une surtension de mode différentiel (entre phase et neutre), même quand une protection de mode commun est présente (entre phase ou neutre et terre). Dans ces réseaux (figure II.3) le neutre du transformateur est relié à une terre qui est généralement faible (5 Ω typiquement). Si la valeur de la prise de terre de l'installation est, par contre, élevée (30 à 100 Ω), on va assister à la circulation préférentielle du courant de foudre depuis la phase via le parafoudre de phase jusqu'à la prise de terre et, de là, vers le neutre via le parafoudre de neutre. On a donc, dans le pire des cas, une tension entre phase et neutre qui est égale à la somme du niveau de protection de chacun des parafoudres de mode commun, soit, en général, deux fois le niveau de protection. Cela explique la nécessité de l'installation de parafoudres entre phase et neutre pour le régime TT. Des phénomènes similaires peuvent aussi se produire en régime TNS, dès que la distance entre le point commun PE-neutre et le parafoudre dépasse une dizaine de mètres [16].

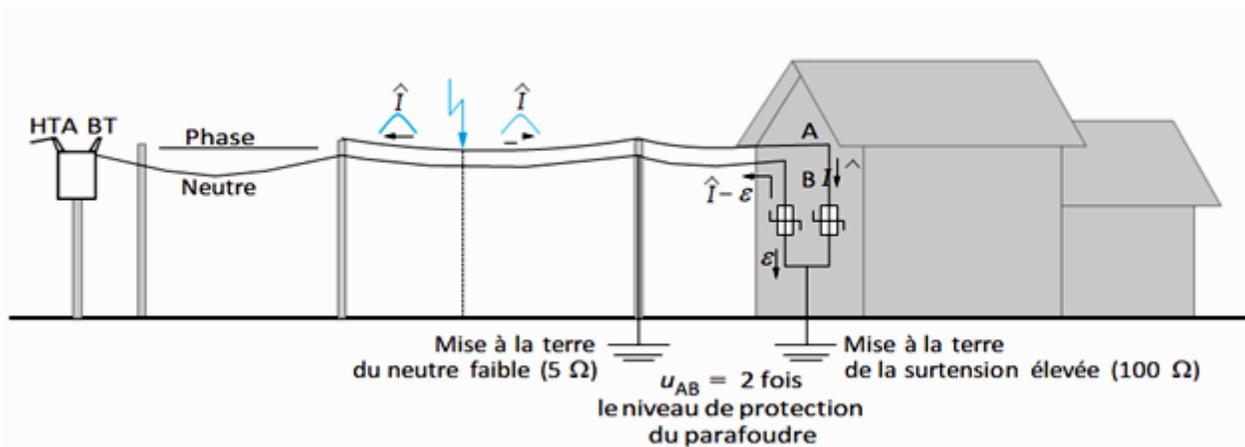


Figure II.3 : Surtension générée en mode différentiel [16].

II.2.3 Normes pour les installations Basse Tension :

Du fait de la diversité et de l'importance des phénomènes transitoires, les organismes de normalisation ont édité des spécifications afin de tester la susceptibilité des équipements soumis aux surtensions.

Après la caractérisation des phénomènes, qui a abouti à une série d'ondes normalisées (onde de tension 1,2/50 μ s et ondes de courant 8/20 μ s, 10/350 μ s), sont apparues différentes normes définissant les performances des parafoudres, telles que [3] :

- NF EN 61643-11 (France)
- VDE 0675-6-11 (Allemagne)
- EN 61643-11 (Europe)
- UL 1449 (USA)
- CEI 61643-11 (International).

II.3. Types de Parafoudres :

Les parafoudres pour réseau basse tension sont structurés par les normes EN 61643-11 en trois types de produits, correspondant à des classes d'essai. Il existe trois classes d'essais de fonctionnement sur choc de foudre :

-L'essai de classe I est destiné à représenter des chocs de foudre directs

-L'essai de classe II correspond à des chocs de foudre de durée plus courte.

-L'essai de classe III est réalisé avec un générateur combiné. Ce générateur produit une surtension de forme usuelle 1,2/50 sur un circuit ouvert, débite un courant de forme 8/20 sur un court-circuit et produit une forme d'onde indéterminée dans un cas intermédiaire

A ces classes d'essais, sont associés les trois types de parafoudres : Type 1, Type 2 et Type 3 [3].

II.3.1 Parafoudres de Type 1 :

Ces dispositifs sont conçus pour être utilisés sur des installations où le risque «Foudre» est très important, notamment en cas de présence de paratonnerre sur le site. La Norme Européenne (EN 61643-11) et Internationale (CEI 61643-11) imposent que ces parafoudres soient soumis aux essais de Classe 1, caractérisés par des injections d'ondes de courant de type 10/350 μs , représentatives du courant de foudre généré lors d'un impact direct. Ces parafoudres devront donc être particulièrement puissants pour écouler cette onde très énergétique [3].

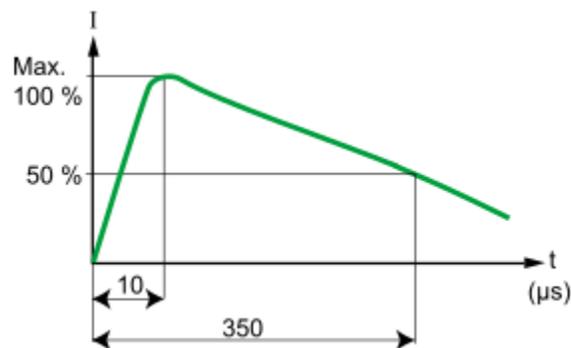


Figure II.4 : Onde de courant 10/350 μs [19].



Figure II.5 : parafoudre type 1 [26].

II.3.2 Parafoudres de Type 2 :

Destinés à être installés en tête d'installation, généralement au niveau du TGBT (Tableau Générale Basse Tension), ou à proximité des équipements sensibles, sur des sites où le risque d'impact direct est considéré comme inexistant, les parafoudres de Type 2 protègent l'ensemble

de l'installation. Ces parafoudres sont soumis à des tests en onde de courant 8/20 μs (essais de Classe II) [3].



Figure II.6 : parafoudre type 2 [26].

II.3.3 Parafoudres de Type 3 :

En cas d'équipements particulièrement sensibles ou d'installation très étendue, il est recommandé d'utiliser des parafoudres à proximité des équipements sensibles. Ces parafoudres de plus faible énergie seront de Type 2 ou de Type 3. Les parafoudres de Type 3, testés avec une onde combinée 1,2/50 μs -8/20 μs (essais de Classe III), ne sont pas pris en compte dans la NFC15-100, ni dans le guide UTE C 15-443 [3].

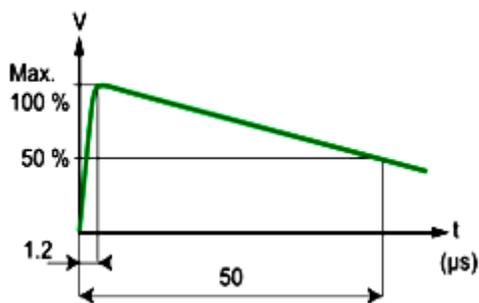


Figure II.7 : Onde de tension 1,2/50 μs [19]

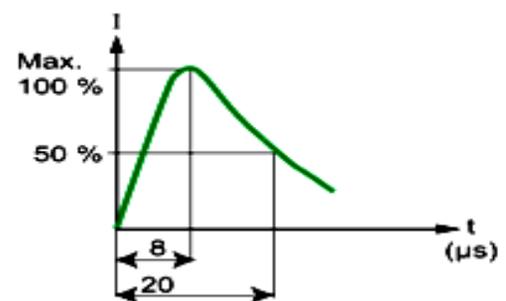


Figure II.8 : Onde de courant 8/20 μs [19].



Figure II.9 : parafoudre type 3 [26].

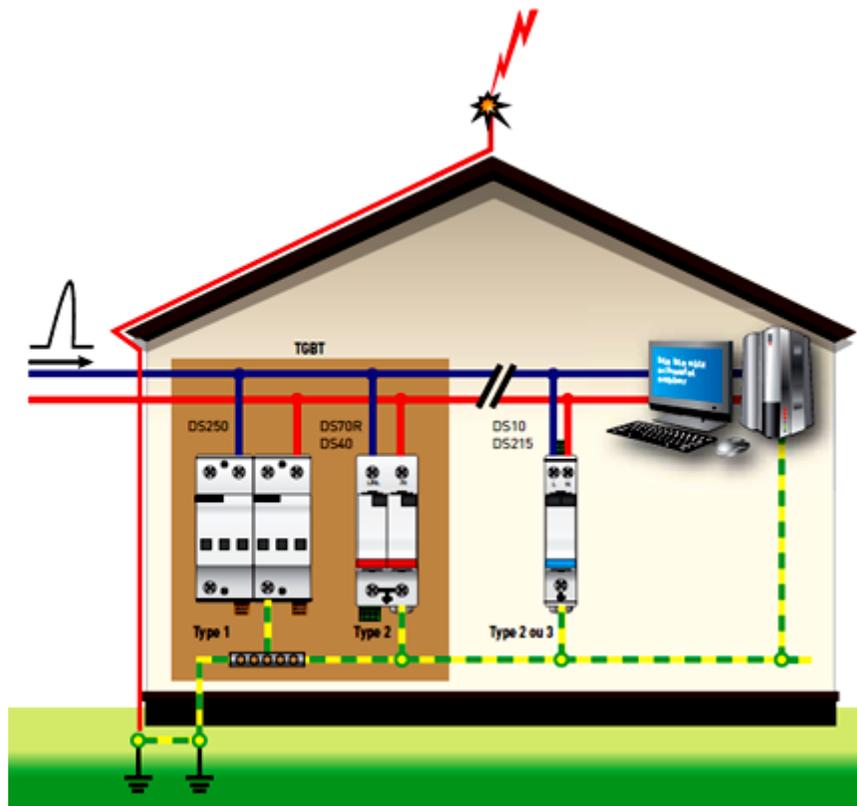


Figure II.10 : Les différents types de Parafoudres suivant la norme NF EN 61643-11[3].

II.3.4 Parafoudres combinés :

Ces parafoudres permettent d'assurer une protection équivalente à une coordination de parafoudres type 1 + type 2 + type 3. Leur avantage réside dans la réduction du coût et du temps d'installation [3].

II.4 Les composants d'un parafoudre :

Le parafoudre est principalement constitué :

- 1) d'un ou de plusieurs composants non linéaires : la partie active (varistance, éclateur à gaz, ...),
- 2) d'un dispositif de protection thermique (déconnecteur interne) qui le protège contre un emballement thermique en fin de vie (parafoudre à varistance),
- 3) d'un indicateur qui signale la fin de vie du parafoudre, Certains parafoudres permettent le report à distance de cette indication,
- 4) d'un dispositif de déconnexion externe qui assure sa protection contre les courts-circuits (ce dispositif peut être intégré au parafoudre) [22].

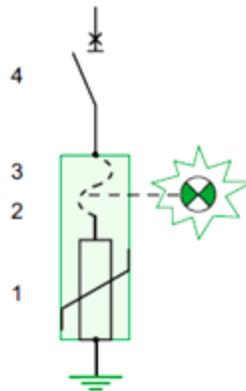


Figure II.11 : Schéma d'un parafoudre [25].

II.5 Paramètres des Parafoudres

Selon la Norme NF EN 61643-11, les parafoudres pour réseau basse tension sont définis par un ensemble de caractéristiques électriques qui serviront à l'utilisateur pour sélectionner le produit le plus adapté à son application [3].

•Tension de fonctionnement – U_c :

La tension maximale de régime permanent U_c est la tension efficace maximale pouvant être appliquée de façon continue au parafoudre.

•Surtension temporaire – U_{TOV} :

La surtension temporaire U_{TOV} est la valeur maximale efficace acceptable par le parafoudre pendant 5 secondes (tenue sans destruction) ou 120 secondes (fin de vie contrôlée).

•Courants de décharge - I_n et I_{max} :

Le courant de décharge maximal I_{max} , applicable aux parafoudres de Type 2, correspond à la tenue maximale sans destruction sur un choc foudre (onde 8/20 μ s) d'un parafoudre. Le courant de décharge nominal I_n correspond à la tenue répétitive sans destruction (15 chocs en onde 8/20 μ s) d'un parafoudre de Type 1 ou de Type 2.

•Courant de choc – I_{imp} :

Le courant de choc I_{imp} , applicable aux parafoudres de Type 1, correspond à la tenue maximale sans destruction sur un choc foudre (onde 10/350 μ s) d'un parafoudre. Cet essai simule la conséquence d'un impact direct sur l'installation.

•Courant total de décharge – I_{total} :

C'est le courant total de décharge circulant dans le conducteur PE ou PEN d'un parafoudre multipolaire (pour protéger les réseaux mono, tri ou triphasé+neutre, parfois associés à n parafoudre spécifique N/PE).

•Tension maximale en circuit ouvert – U_{oc} :

Ce paramètre n'est applicable qu'aux parafoudres de Type 3 et correspond à la tension maximum de l'onde combinée acceptable (valeur maximale = 20 kV).

•Niveau de Protection – U_p :

C'est la valeur maximale de la tension résiduelle aux bornes des parafoudres lors du test en onde de courant 8/20 μ s (à la valeur la plus élevée des courants I_n ou I_{imp} déclarés) ou lors du test en onde de tension 1,2/50 μ s à 6kV.

•Tension résiduelle - U_p-I_n :

Valeur de la tension résiduelle aux bornes du parafoudre sollicité par une onde de courant 8/20 μ s de valeur déterminée (I_n ou I_{imp}). Cette valeur est inférieure au niveau de protection U_p pour les parafoudres de type combinés.

•Tenue aux courants de court-circuit – I_{sc} :

Le parafoudre et son déconnecteur associé (fusible) sont testés à une valeur maximale de courant de court-circuit (ex : 25 kA) : cette valeur I_{sc} devra être supérieure au courant de court-circuit présumé du réseau, au point d'installation.

•**Capacité d’extinction du courant de suite – Ifi :**

Ce critère est uniquement destiné aux parafoudres de technologie «éclateur à air» : après leur amorçage, ces parafoudres écoulent une partie du courant du réseau (courant de suite) et doivent l’interrompre. Ce comportement ne concerne pas les parafoudres à base de technologie «varistance». L’ensemble de ces caractéristiques sont résumés dans le (tableau II.3.)

Symbole	Paramètre	Définition
Uc	Tension maximale de régime permanent	Tension qui peut être appliquée de façon permanente au parafoudre
Ut	Caractéristique de tenue aux surtensions temporaires	Tension appliquée pendant 5 s que le parafoudre peut tenir en gardant toutes ses caractéristiques ou en étant endommagé de telle façon qu’il ne soit pas dangereux
Up	Niveau de protection	Caractérise l’efficacité de la protection du parafoudre avec des formes d’onde propres aux composants limiteurs (8/20) et écrêteurs (1,2/50)
Type 1, 2 ou 3	Type de parafoudre	Lié à une classe d’essais
In	Courant nominal de décharge	Courant de forme 8/20 qui peut être appliqué 15 fois sur le parafoudre sans détérioration, utilisé pour les parafoudres de Type 1 et de Type 2
Iimp	Courant de choc	Courant de choc de forme 10/350 ou équivalent que peut supporter le para- foudre suivant un cycle défini dans la norme, utilisé pour les parafoudres de Type 1
Imax	Courant maximal de décharge	Courant maximal de forme 8/20 que peut supporter le parafoudre suivant un cycle défini dans la norme, utilisé pour les parafoudres de Type 2
Uoc	Tension en circuit ouvert	Caractéristique du générateur utilisé pour les parafoudres Type 3 qui devient par analogie la caractéristique du parafoudre
Icc	Tenue au court-circuit	Courant 50 Hz qui peut transiter dans le parafoudre sans risque quand celui-ci est en court-circuit. Pour les parafoudres deux ports, on définit un courant interne (quand le composant de protection est en court-circuit) et un courant externe (quand la charge est en court-circuit)
II	Courant de charge assigné	Courant de charge qui peut circuler dans un parafoudre deux ports
If	Courant de suite	Courant circulant dans le parafoudre après passage d’une surtension pour un parafoudre comprenant un composant commutateur. Ce courant n’est pas applicable aux composants limiteurs

Tableau II.3 : Caractéristiques d’un parafoudre selon la norme (NF EN 61643-11) [16].

II.6.choix des parafoudres :

Le choix du parafoudre commence par le choix de la tension U_c , afin qu’il soit adapté au réseau considéré. A cet effet, on choisit U_c conformément au (tableau II.4) et selon la norme NF C 15-100. De même, on choisit la tenue aux surtensions temporaires U_t conformément au même (tableau II.4).

On choisit ensuite le courant nominal du parafoudre de tête de l’installation et le courant maximal associé (on a en général $I_{max} = 2$ à 3 fois I_n , le choix de I_n fixe donc I_{max} égal On choisit ensuite le niveau de protection requis, compte tenu du niveau de tenue du matériel (2,5 kV ou 1,5 kV voire moins, pour certains systèmes sensibles).

La norme NF C 15-100 demande que U_p soit inférieur à 2,5 kV, ce qui n’est pas suffisant pour protéger la plupart des matériels sensibles. Des parafoudres additionnels sont donc nécessaires [16].

Installation du parafoudre entre :	Régime de neutre									
	TT		TNC		TNS		IT avec neuter distribué		IT sans neuter distribué	
	U_c	U_t	U_c	U_t	U_c	U_t	U_c	U_t	U_c	U_t
Conducteur de phase et conducteur de neutre	$1,1U_0$	$1,45U_0$			$1,1U_0$	$1,45U_0$	$1,1U_0$	$1,45U_0$		
Chaque conducteur de phase et PE	$1,1U_0$	$3U_0$			$1,1U_0$	$1,45U_0$	$3U_0$		$3U_0$	$3U_0$
Conducteur de neutre et PE	U_0				U_0		U_0			
Conducteur de phase et PEN			$1,1U_0$	$1,45U_0$						

(1) U_0 est la tension simple du réseau à basse tension, c’est-à-dire 230 V

Tableau II.4 : choix de tension nominale de régime permanent et de tenue aux surtensions temporaires BT [16].

II.7 Essais :

Des essais électriques sont réalisés sur les parafoudres (selon norme NF EN 61643-11). Les principaux essais électriques sont :

- La mesure de la chute de tension et de l'échauffement lors du passage du courant assigné pour les parafoudres deux ports ;
- Les essais de fin de vie au cours desquels on vérifie qu'en cas de court-circuit ou de surtensions temporaires il n'y a pas de risque de feu, et qu'en cas d'échauffement excessif le parafoudre se déconnecte.
- la mesure de la résistance d'isolement et de la capacité, destinée à s'assurer que le parafoudre ne perturbera pas la transmission de données ;
- la mesure du niveau de protection, destinée à montrer que le parafoudre est apte à protéger ;
- un essai de retour à l'état initial après choc, afin de vérifier qu'en un temps court (30 ms, en général) le parafoudre retrouve son impédance élevée initiale ;
- des essais d'endurance aux courants de foudre, afin de vérifier que le parafoudre ne sera pas dégradé par les surtensions ;
- des essais d'endurance au courant 50 Hz, afin de vérifier que le parafoudre peut laisser passer un courant, généré par induction par exemple, sans se dégrader, si sa durée est courte ;
- des essais de destruction en 50 Hz et en choc de foudre, afin de vérifier qu'en fin de vie le produit n'est pas dangereux.

À ces essais électriques s'ajoutent une multitude d'essais mécaniques (vibration, chute, corrosion...) et de sécurité comparables à ceux qui sont réalisés sur les autres appareils (disjoncteurs...) [16].

II.8 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments essentiels concernant la protection des surtensions par les parafoudres dans le réseau basse tension. Les caractéristiques ainsi que les différents types de parafoudres utilisés ont été détaillés. Le chapitre suivant présentera les composants utilisés pour le réseau moyenne tension.

Chapitre III

Parafoudres

MT

III.1 Introduction :

Les parafoudres protègent les installations électriques exposées aux orages contre les surtensions d'origine atmosphérique.

Les chocs de foudre sur une section quelconque du réseau électrique peuvent générer des surtensions sur le réseau MT. Certains points et certains composants du réseau sont particulièrement sensibles aux surtensions. Les charges à hautes impédances réfléchissent l'onde de tension ; la surtension peut donc être doublée à leurs bornes. Il est nécessaire d'installer un parafoudre MT dès qu'il y a risque de surtension atmosphérique.



Figure III.1 : Parafoudre HTA [23]

III.2 Constitution du parafoudre :

Le parafoudre est constitué d'une ou de plusieurs varistances, ou résistances non linéaires au carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs (Figure III.2).

L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote). L'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion des éclateurs, les contournements de la partie active et la modification des caractéristiques. En subdivisant l'intervalle d'amorçage en plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre.

Les éclateurs sont constitués de disques de laiton emboutis, empilés et séparés par de petites pièces isolantes en céramique.

Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destinée à éliminer les contournements [6].

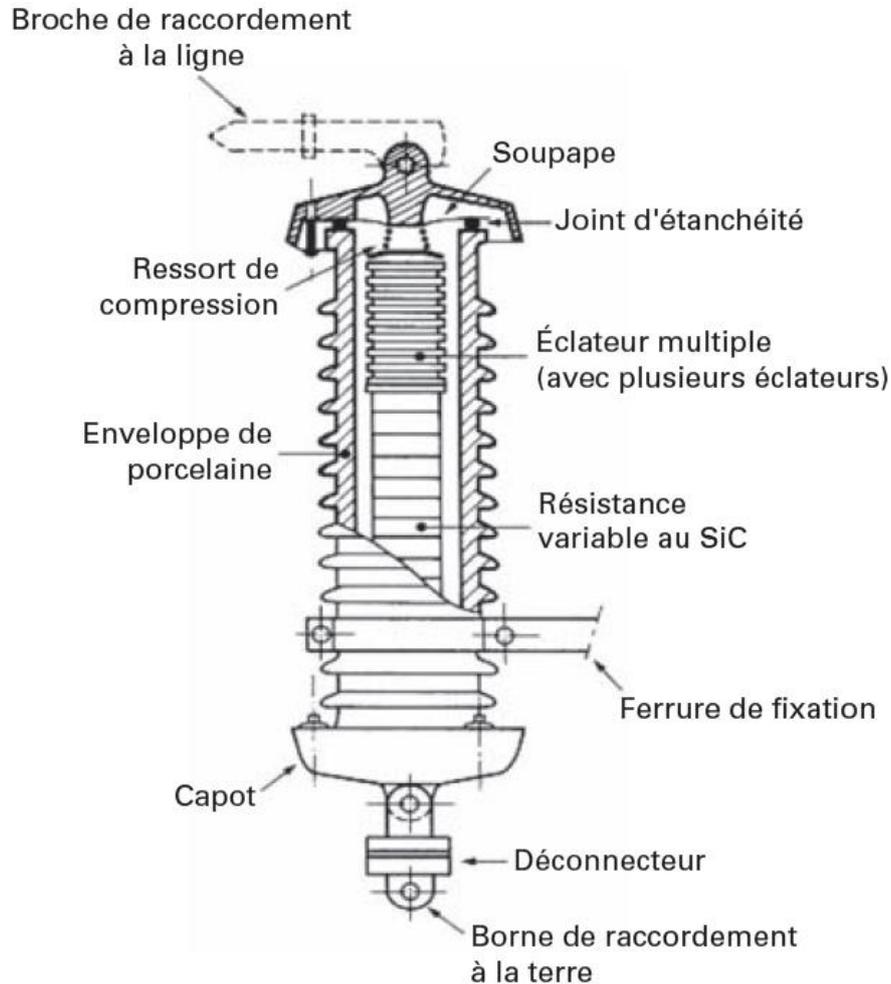


Figure III.2: constitution d'un Parafoudre au carbure de silicium à éclateurs [1].

III.3 Principe de fonctionnement :

En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont pas conducteurs. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage (figure III.3), 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 surtension 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 [6].

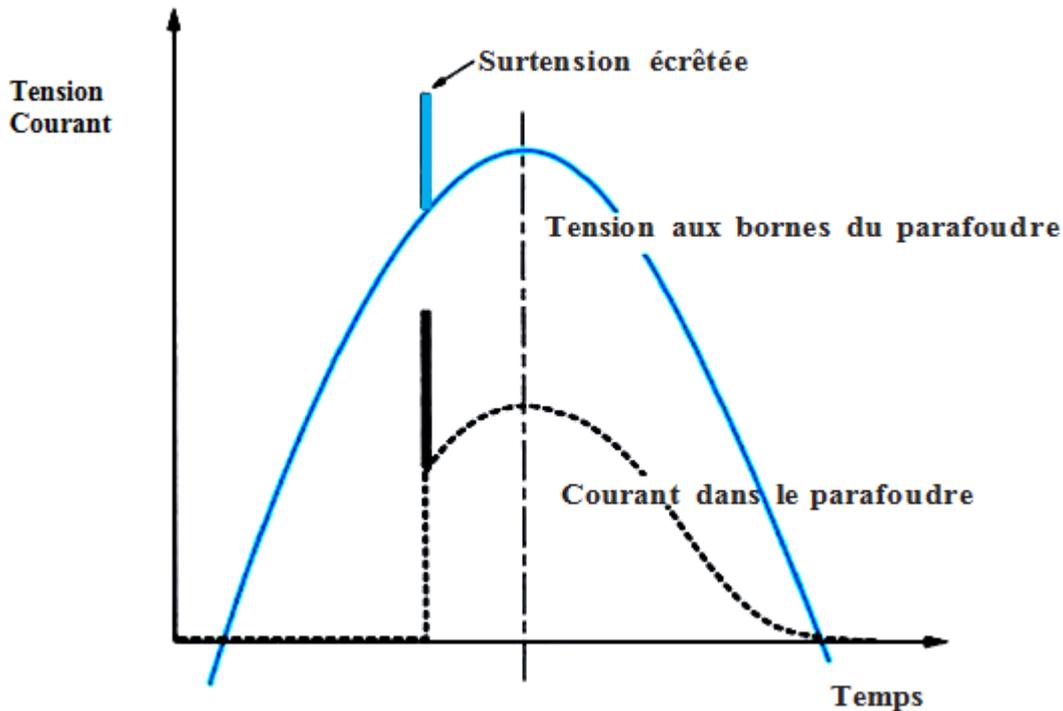


Figure III.3: courant et tension d'un Parafoudre HTA au carbure de silicium pendant l'événement de surtension [6].

III.4 Choix des parafoudres :

Le choix du dispositif de protection, éclateur ou parafoudre, peut être effectué sur la base des critères :

- Economique, car l'éclateur est moins cher que le parafoudre.
- Technique, car l'éclateur provoque une interruption de service et présente une dispersion importante des conditions d'amorçage

Tout dépend ensuite du type de réseau et du niveau d'isolement des différents matériels à protéger.

Le problème du choix d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs ou d'un parafoudre à oxyde de zinc se pose à peine car très rapidement, les parafoudres à oxyde de zinc ont remplacé leurs homologues au carbure de silicium et à éclateurs, surtout pour les hautes et très hautes tensions. Les parafoudres à oxyde zinc sont, en effet, usuellement

considérés comme plus fiables et plus économiques. Le choix peut se faire donc entre un parafoudre à oxyde de zinc avec une enveloppe de porcelaine ou avec une enveloppe en matériau synthétique ou avec une enveloppe métallique ou intégré dans l'appareillage (dans le transformateur, par exemple).

- Le parafoudre à enveloppe métallique ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique à isolation gazeuse (généralement en zone très polluée) ou dans des cas d'encombrement important.

- Le parafoudre intégré, rare en haute et très haute tensions, présente les mêmes possibilités d'utilisation que les parafoudres à enveloppe métallique pour un coût qui devrait être moindre. Toute fois, en cas de défaillance du parafoudre, il faut intervenir aussi sur l'appareil à protéger.

- Le parafoudre à oxyde de zinc à enveloppe synthétique fait maintenant pleinement partie de l'offre industrielle. Son coût est très compétitif par rapport à un parafoudre à enveloppe de porcelaine. Il faut noter que le marché « moyenne tension » a été positivement dynamisé par les actions d'accroissement de la qualité de service des distributeurs d'électricité.

Pour la haute et la très haute tensions, l'offre industrielle s'étoffe constamment, d'une part, à cause d'un transfert naturel des technologies synthétiques issues de la moyenne tension, pour laquelle le retour d'expérience commence à être significatif, et, d'autre part, parce que la solution synthétique est quelquefois la seule réponse aux besoins particuliers exprimés par les exploitants [6].

III.5 Caractéristiques à considérer dans le choix du parafoudre :

Les paramètres suivants doivent être pris en compte pour que le choix d'un parafoudre soit optimal :

➤ **La valeur de MCOV :**

La tension maximum en service continu (Maximum Continuous Operating Voltage-MCOV) fournie par le constructeur assure que la puissance est maintenue dans les limites de conception et qu'il n'y a pas d'emballement thermique entraînant des dommages permanents au parafoudre. La MCOV d'un parafoudre doit être supérieure (ou égale) à la tension de service du réseau considéré. Elle peut être nettement supérieure tant que le niveau de tension de protection fourni reste acceptable pour l'installation. Le choix d'un parafoudre doit être fait en considérant la tension entre les conducteurs et la terre (tension phase-neutre), alors

qu'en général la tension de service du réseau est exprimée en tension composée (phase-phase) [17].

➤ **Le niveau de protection fourni :**

L'efficacité de la protection d'un parafoudre est mesurée par la tension résiduelle, aux bornes du parafoudre, pendant qu'un courant donné le parcourt. Typiquement, le niveau de protection est défini par un couple de valeurs (par exemple 80 kV/10 kA). La valeur de la tension qui peut être atteinte durant un coup de foudre doit être suffisamment faible pour conserver une marge de sécurité par rapport à la tension de tenue du matériel. La marge doit être d'au moins 20 % et doit tenir compte du mode d'installation et de câblage des parafoudres. Un câblage inefficace peut entraîner des tensions notablement plus élevées aux bornes du matériel que la seule tension résiduelle du parafoudre, du fait des chutes de tension dans les impédances parasites. Un compromis doit être trouvé entre une MCOV plus haute et un niveau de protection néanmoins satisfaisant [17].

➤ **La tenue thermique :**

Elle vise à garantir la non-destruction du parafoudre en cas de choc long (supérieur au choc d'essai normalisé). Cette performance sera exprimée par une tenue à un choc de courant [17].

III.6 Enveloppe des parafoudres:

L'enveloppe peut être de trois types :

III.6.1 Parafoudres à enveloppe en matériau synthétique :

Depuis le début des années quatre-vingt, un nouveau palier technologique a été franchi avec l'émergence des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe synthétique (figure III.4). L'idée de base est de remplacer l'enveloppe en porcelaine par une enveloppe en matériau synthétique, soit directement moulée sur la colonne de varistances, soit ménageant une couche d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistances. La tenue mécanique du parafoudre est parfois assurée par un enrobage de fibres de verre autour des varistances.

L'enveloppe synthétique doit assurer trois fonctions essentielles : l'isolation électrique du parafoudre, sa tenue mécanique et son étanchéité. Elle est en fait composée de deux

sous-ensembles, d'une part une structure en matériau composite, mécaniquement robuste, et d'autre part un revêtement extérieur en matériaux synthétique [6].

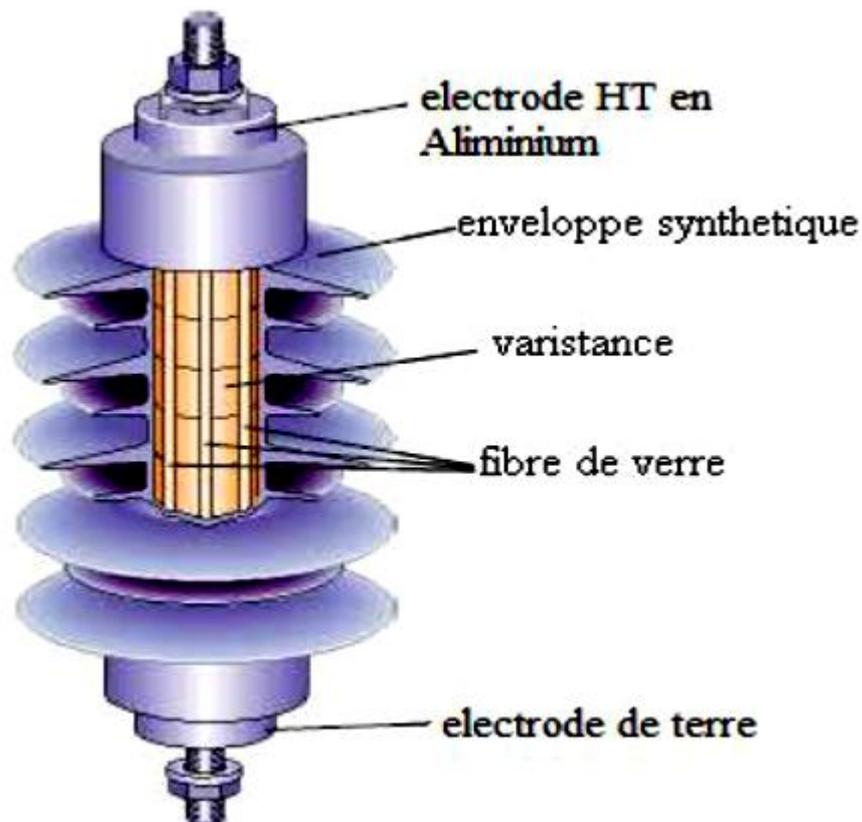


Figure III.4 : Parafoudre HTA à enveloppe en matériau synthétique [20].

III.6.2 Parafoudres à enveloppe en porcelaine :

Les enveloppes des parafoudres traditionnellement ont été faites de porcelaine, mais la tendance aujourd'hui est vers l'utilisation des isolateurs synthétiques. Pour combiner la conception de fibres de verre et l'isolateur, deux possibilités principales existent, premièrement, la conception de fibres de verre peut être moulée directement dans l'isolateur en caoutchouc et deuxièmement, la frontière entre les fibres de verre et l'isolateur en caoutchouc est remplie de graisse ou de gel, généralement du silicone [21].

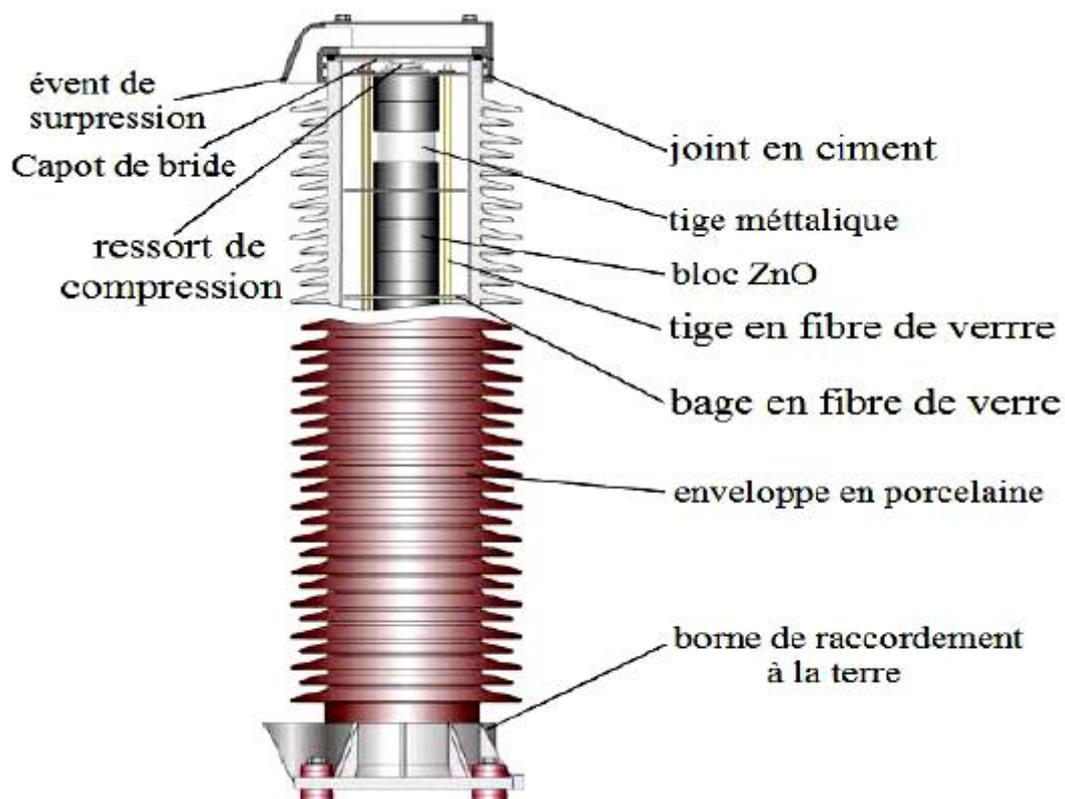


Figure III.5 : Parafoudre HTA à enveloppe en porcelaine [20].

III.6.3. parafoudre à enveloppe métallique :

Les parafoudres blindés sont en principe parties intégrantes d'un poste blindé (ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique). L'atmosphère intérieure est composée de SF₆.



Figure III.6 : Parafoudre HTA à enveloppe métallique [23].

III.7 Essais :

La particularité technologique des parafoudres à enveloppe synthétique a nécessité la mise au point d'essais spécifiques qui sont maintenant pleinement intégrés dans la normalisation internationale (norme CEI 60099-4).

La première est basée, comme pour les parafoudres à enveloppe en porcelaine, sur l'utilisation d'un fil fusible qui court-circuite les varistances ZnO. Cette méthode est proposée pour les parafoudres synthétiques qui renferment un volume d'air, de façon à générer dans ce volume un arc interne.

La seconde, préconisée pour les parafoudres synthétiques qui ne renferment aucun volume d'air, consiste en l'application d'une tension à fréquence industrielle plus élevée que la tension de service permanent, faisant circuler une densité de courant comprise entre 5 et 10 mA/cm². Les varistances dissipent une puissance active importante et provoquent un emballement thermique. Au bout de quelques minutes, l'impédance du parafoudre s'effondre et il est considéré dans un état de pré-dégradé. Il est ensuite possible de lui appliquer une source de courant de puissance pour réaliser l'essai de court-circuit proprement dit.

La justification de cette procédure, assez complexe est de tenter d'initier le défaut au cœur du parafoudre, mais de manière moins rapide qu'avec un fil fusible, de façon à provoquer une évaporation ou une combustion partielle de la structure composite et de l'enveloppe synthétique qui sont au contact des varistances, comme cela se produit dans la réalité. La présence de ces matières évaporées, généralement combustibles, rend l'essai plus sévère face aux prescriptions d'autoextinguibilité du parafoudre.

Enfin les essais de court-circuit nécessitent également des procédures particulières pour tenir compte du comportement variable des différentes technologies rencontrées sur le marché. La normalisation retient deux méthodes d'essai principales.

Sur les réseaux de distribution HTA, leur compacité associée à leur légèreté permet d'optimiser leur installation au plus près de l'appareillage à protéger, par exemple en position horizontale, comme pour la protection des transformateurs en haut de poteau (figure III.7) ou des remontées aéro-souterraines de câbles [6].



Figure III.7: Parafoudre HTA à oxyde de zinc et enveloppe synthétique protégeant un transformateur MT/BT [6].

III.8 Dispositifs annexes et accessoires de parafoudres :

Les accessoires dont il est question sont communs aux parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs et aux parafoudres à oxyde de zinc [6].

III.8.1 Déconnecteurs :

Sur les réseaux dans lesquels on privilégie la fourniture d'énergie à la protection des matériels (c'est le cas, généralement, en HTA), on peut associer un déconnecteur au parafoudre. En cas de défaillance de ce dernier, ce dispositif l'isole du réseau. Pour ce faire, on coupe la liaison du parafoudre au réseau (soit du côté de la ligne, soit du côté de la terre) grâce à une petite charge de poudre mise à feu par le courant de défaut [6].

III.8.2 Dispositifs de signalisation :

En HTA et dans des zones à faible courant de défaut ou sur les réseaux à neutre compensé ou l'on limite volontairement la puissance de court-circuit, il n'y a parfois pas de manifestations visibles de la défaillance d'un parafoudre (traces d'amorçage, porcelaine endommagée, etc.).

Pour faciliter la recherche des éléments défaillants, on peut utiliser des dispositifs de signalisation. Ces systèmes sont très rudimentaires et consistent à faire apparaître une pièce de couleur vive lors du passage du courant de défaut. Il faut noter qu'ils ne sont pas nécessaires lorsque l'on utilise déjà un déconnecteur qui remplit aussi cette fonction [6].

III.8.3 Limiteurs de surpression :

La défaillance d'un parafoudre contenant un volume d'air se traduit toujours par un arc contournant la partie active à l'intérieur de l'enveloppe étanche. Sans précautions particulières, cet arc interne conduirait inévitablement à l'explosion du parafoudre. Depuis plusieurs années déjà, les constructeurs ont mis au point des dispositifs empêchant l'explosion: ce sont des membranes se déchirant ou des soupapes se déformant dès que la pression atteint quelques bar.

Ces systèmes permettent l'expulsion des gaz créés par l'arc interne et le transfert de l'arc de l'intérieur vers l'extérieur de l'enveloppe. Ils agissent très vite (en quelques millisecondes) et évitent ainsi l'explosion du parafoudre. Toutefois, si le défaut n'est pas éliminé assez vite par les protections, le choc thermique consécutif à l'arc, choc développé à l'extérieur de l'enveloppe de porcelaine, peut entraîner la destruction de celle-ci. Cette destruction est alors peu violente et ne s'accompagne pas de projections dangereuses de morceaux de porcelaine. On vérifie d'ailleurs l'efficacité de ces dispositifs par des essais d'arc interne ou l'on observe le mode de défaillance du parafoudre [6].

III.8.4 Compteurs de fonctionnements :

Ces appareils sont insérés sur les connexions entre les parafoudres montés sur des socles isolants et la terre. Ils enregistrent le nombre de fonctionnements du parafoudre. Ces compteurs sont bien adaptés à la surveillance des parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs, mais on peut mettre des réserves en ce qui concerne les parafoudres à oxyde de zinc.

•En effet, les fonctionnements de parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs conduisent à une érosion des électrodes des éclateurs individuels et, par la même, à une

modification des caractéristiques d'amorçage. Ainsi, en suivant l'évolution du nombre de fonctionnements, on peut avoir une image de l'état du parafoudre.

•En revanche, les caractéristiques électriques d'un parafoudre à oxyde de zinc sont pratiquement insensibles au nombre de surtensions auxquelles il a été soumis. Un simple compteur de fonctionnements n'a donc plus d'intérêt en tant qu'instrument de surveillance du parafoudre. Il est encore pourtant largement proposé par les constructeurs. Seules, les variations de la composante résistive du courant sous la tension de service permanent caractérisent l'état de ces nouveaux parafoudres [6].

III.8.5 Anneaux de champ :

En haute tension, essentiellement pour simplifier les problèmes de transport et de fabrication des enveloppes en porcelaine ou en matériaux composites, les parafoudres sont constitués de plusieurs unités indépendantes assemblées. L'unité supérieure est alors généralement munie d'un ou plusieurs anneaux métalliques, portés au potentiel du conducteur à protéger et destinés à améliorer la répartition de potentiel le long du parafoudre (figure III.8) [6].

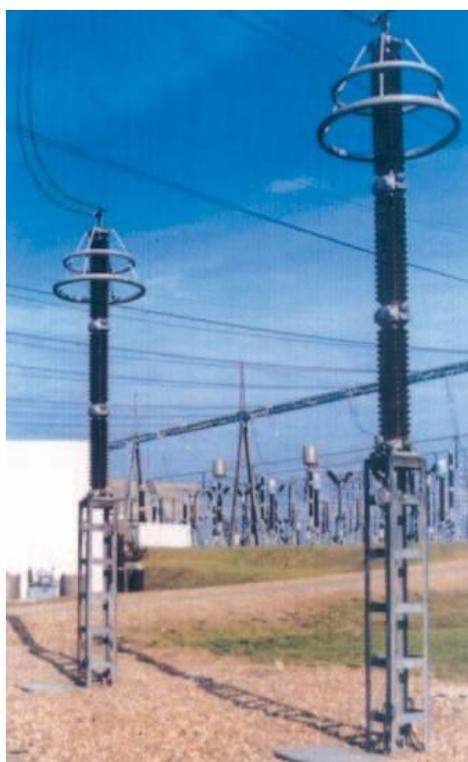


Figure III.8: Le parafoudre, constitué de trois unités, est surmonté de deux anneaux de répartition de champ [6].

III.9 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments essentiels concernant la protection des réseaux moyenne tension des surtensions en utilisant les parafoudres. Les caractéristiques ainsi que les différents types de parafoudres utilisés ont été détaillés. Le chapitre suivant présentera les composants utilisés pour le réseau haute tension.

Chapitre IV

Parafoudres

HT

IV.1 Introduction :

La localisation des parafoudres dans le réseau joue un rôle important sur la coordination de l'isolation. Ils sont positionnés de préférence aux bornes des transformateurs, et à l'arrivée des lignes haute tension. Ils protègent les sous stations, les lignes, transformateurs et autre équipement HT contre les surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre.

IV.2 Parafoudre au carbure de silicium à éclateur :

Moyennant un coût beaucoup plus élevé [en HTA (20 kV) rapport d'environ 3 et en HTB (400 kV) rapport de 100], le parafoudre permet d'éviter la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Ses avantages sur l'éclateur sont :

- une dispersion beaucoup moins grande de la tension d'amorçage ;
- une extinction spontanée de l'arc ;
- une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée ;
- une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieures [6].

IV.2.1 Constitution :

Le coût de l'isolement étant d'autant plus important que la tension de service est élevée on cherche à améliorer en haute tension HTB et très haute tension le niveau de protection des parafoudres. Cela veut dire qu'il faut réduire, d'une part, les tensions d'amorçage et d'autre part la tension résiduelle au courant nominal de décharge.

Pour diminuer, en toute sécurité les tensions d'amorçage, il faut les stabiliser davantage. Pour ce faire, on rajoute des systèmes de répartition de tension composés de résistances (figure IV.1) et de condensateurs.

Ces systèmes permettent de maîtriser la tension appliquée à chaque éclateur individuel. Afin de diminuer les tensions d'amorçage, les éclateurs sont modifiés et sont ici constitués de deux électrodes de cuivre en regard, placés dans une chambre en céramique de forme cylindrique pour faciliter leur empilage avec les résistances non linéaires.

La diminution de la tension résiduelle au courant nominal de décharge est obtenue par l'emploi d'éclateurs à soufflage magnétique. Les arcs, une fois allumés, sont étirés dans la chambre en céramique sous l'effet d'un champ magnétique créé par une bobine parcourue par le courant traversant le parafoudre. Le profil cannelé de la chambre en céramique favorise l'allongement de l'arc. Ainsi, la tension d'arc étant considérablement augmentée, le

parafoudre se désamorce spontanément bien avant le passage par zéro de la tension de service, limitant ainsi l'énergie à dissiper par les résistances non linéaires et facilitant la dé-ionisation de l'air dans les chambres en céramique [6].

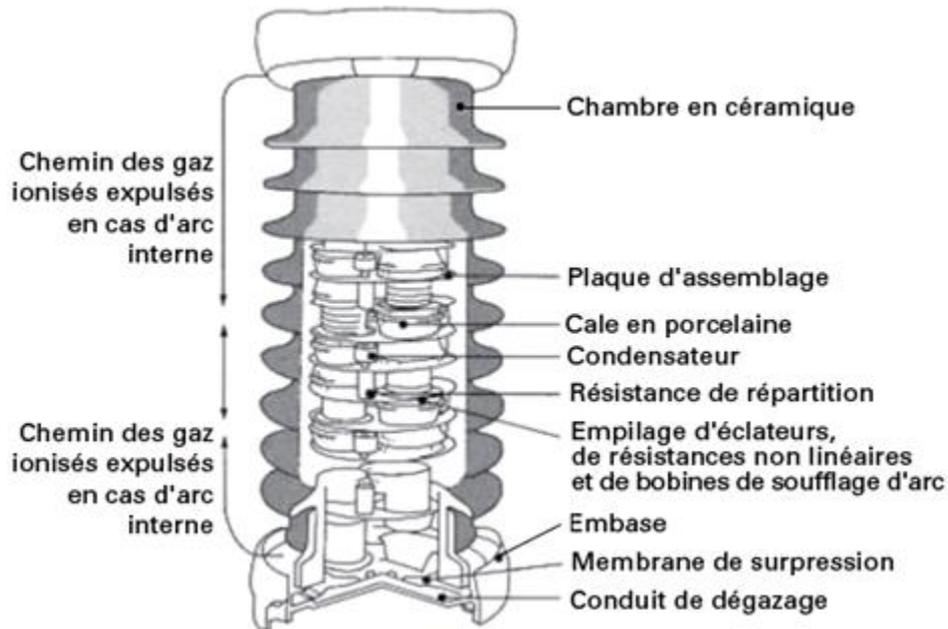


Figure IV.1 : Parafoudre HTB au carbure de silicium et à éclateurs : constitution [6].

IV.2.2 Principe de fonctionnement :

La figure IV.2 illustre le fonctionnement d'un parafoudre HTB au carbure de silicium et à éclateurs.

En régime permanent (figure IV. 2a), le parafoudre est parcouru par le très faible courant (de l'ordre du milliampère) drainé par le système de répartition de tension.

Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage (figure IV.2b), les éclateurs s'amorcent et le courant augmente alors rapidement. La bobine présente vis à vis de ce courant une impédance élevée et le courant s'écoule par l'intermédiaire des résistances non linéaires placées en parallèle le sur la bobine de soufflage.

Après le passage de la surtension (figure IV. 2c), les éclateurs fortement ionisés ne se désamorcent pas. Le courant traversant le parafoudre est alors issu du réseau. Son amplitude et ses variations sont beaucoup plus faibles, si bien que l'impédance de la bobine diminue considérablement et celle-ci va être, à son tour, parcourue par le courant. Sous l'effet du

champ magnétique créée par cette bobine, l'arc est étiré dans la chambre en céramique. La tension d'arc augmente.

Lorsque la tension d'arc atteint la tension appliquée au parafoudre, celui-ci se désamorce et retrouve le régime permanent (figure IV. 2d) [6].

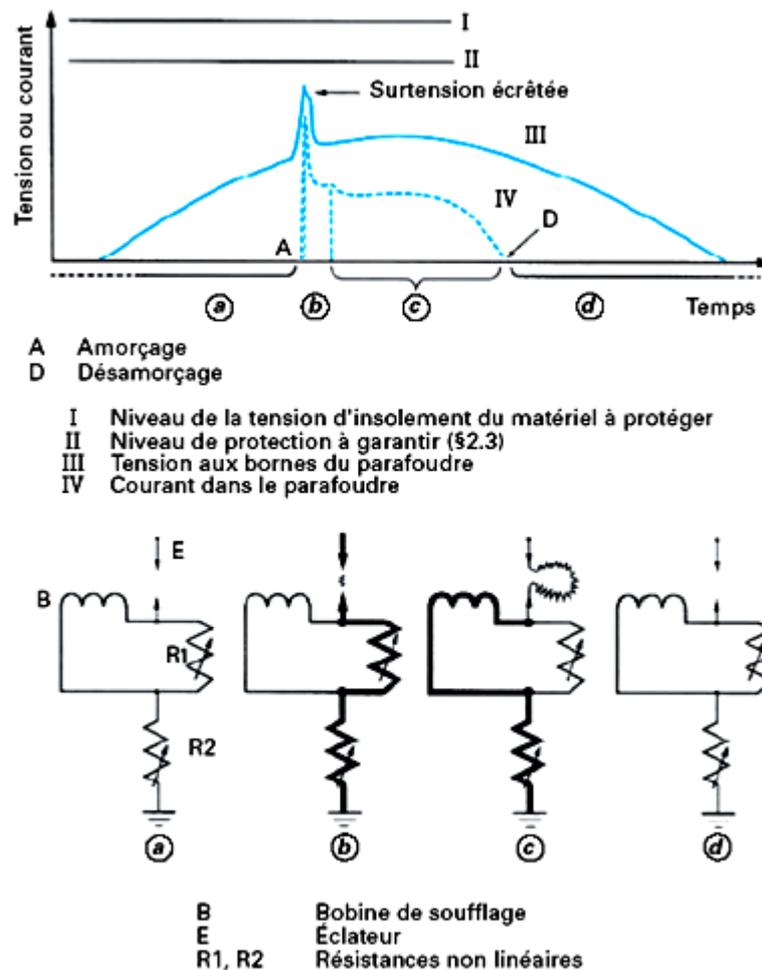


Figure IV.2: principe de fonctionnement du Parafoudre HTB au carbure de silicium et à éclateurs [6].

IV.3 Paramètres caractéristiques :

- La tension maximale de service permanent est la tension maximale qu'un parafoudre est capable de supporter en régime permanent pour des conditions ambiantes et une durée de vie données. Elle doit être supérieure ou égale à la tension maximale de service permanent des réseaux.
- La notion de tension assignée, claire pour les parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs, est ici assez ambiguë et pourtant c'est une notion capitale. Par analogie avec ceux-ci, elle a été définie par rapport à la tenue du parafoudre aux surtensions temporaires des

réseaux. Les essais normalisés montrent que c'est la surtension maximale à fréquence industrielle que l'on peut appliquer pendant 10 s à un parafoudre, qui vient juste d'absorber une forte énergie, sans constater d'emballage thermique. La tension assignée du parafoudre correspond donc à la valeur de surtension temporaire à fréquence industrielle des réseaux, appliquée pendant une durée maximale de dix secondes, que peut supporter sans dommage le parafoudre.

- Le courant nominal de décharge est la valeur de crête d'une onde de courante $8/20 \mu\text{s}$ de forme bi-exponentielle, qui sert à classer le parafoudre. Il est habituellement compris entre quelques kilo ampères et quelques dizaines de kilo ampères. Il ne faut pas le confondre avec le courant maximal que peut absorber le parafoudre, généralement appelé choc de courant de grande amplitude, caractérisé par une forme d'onde normalisée de type 4/10 ms.
- Le niveau de protection est la tension résiduelle apparaissant aux bornes du parafoudre pour une onde de courant de forme et d'amplitude données. Ainsi, le niveau de protection au choc de manœuvre est généralement défini pour des ondes rectangulaires dont l'amplitude peut varier de quelques centaines à quelques kilo ampères. Le niveau de protection au choc de foudre se rapporte généralement au courant nominal de décharge (il est généralement donné pour les valeurs de 0,5, 1 et 2 fois le courant nominal de décharge).
- La capacité d'absorption d'énergie est traduite soit par la tenue à des ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité, soit par la capacité du parafoudre à décharger une ligne électrique de longueur, d'impédance d'onde et de tension de charge données (ondes de manœuvre). Depuis 2006, la norme internationale (CEI 60099-4, amendement A1) propose dans son annexe normative N, en plus des classiques classes de décharge de ligne, des classes d'énergie de décharge aux chocs de foudre exprimées en kJ/kV de tension assignée. L'objectif de cette annexe est de caractériser spécifiquement la tenue énergétique des parafoudres vis-à-vis des contraintes de foudre. Cette nouvelle classification peut revêtir un intérêt pour les réseaux installés dans des régions où les niveaux karéniques sont particulièrement élevés [6].

Le (tableau IV.1) présente les paramètres caractéristiques du parafoudre au carbure de silicium et à éclateur :

Paramètres caractéristiques	Tension efficace nominale du réseau			
	63 kV	90 kV	225 kV	400 kV
Tension efficace assignée(kV)	75	102	246	378
Tension crête résiduelle au courant nominal de décharge (1) ...(kV)	190	255	615	900
Tension d'amorçage				
– Choc de foudre (2) :				
valeur de crête maximale(kV)	190	225	615	900
valeur de crête minimale(kV)	140	190	460	670
– Front de l'onde :				
valeur de crête maximale(kV)	225	305	705	1 050
raideur du front (kV/ms)	625	830	1 200	1 200
– Choc de manœuvre (3) :				
valeur de crête maximale(kV)	190	255	560	850
– Fréquence industrielle (à sec et sous la pluie) :				
valeur efficace maximale(kV)	140	190	395	600
valeur efficace minimale.....(kV)	110	150	330	510
Courant crête nominal de décharge (1)(kA)	5	5	10	10
(1) onde normalisée 8/20 μ s de forme bi-exponentielle. (2) onde normalisée 1,2/50 μ s de forme bi-exponentielle. (3) onde normalisée dont le temps de montée à la valeur maximale est de 250 μ s et de forme bi-exponentielle.				

Tableau IV.1 : Valeurs des paramètres caractéristiques des parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs [6].

IV.4 Parafoudre à oxyde de zinc :

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.

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

- d'une part, ils ont un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs, dont la partie active reste sous tension en permanence ;
- d'autre part, leur capacité d'absorption d'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension (225 ou 400 kV), aussi bien pour la protection des équipements vis à vis des surtensions d'origine atmosphérique (foudre), que vis à vis des surtensions lentes, dites de manœuvre, si l'application l'exige [6].



Figure IV.3 : parafoudre a oxyde zinc HTB [21].

IV.4.1 Constitution :

Alors que la technologie des parafoudres à éclateurs dépend fortement du niveau de tension considéré, ces nouveaux composants sont, de la moyenne tension aux plus hautes

tensions, constitués simplement d'un empilage de résistances non linéaires à oxyde de zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placées en parallèle sur les varistances à la partie supérieure des parafoudres et destinées à améliorer la répartition de tension le long de la colonne de varistance. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matériau synthétique.

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction.

La fabrication des céramiques requiert, en effet, beaucoup de soin et de savoir faire, car leurs caractéristiques et leur stabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible [9].

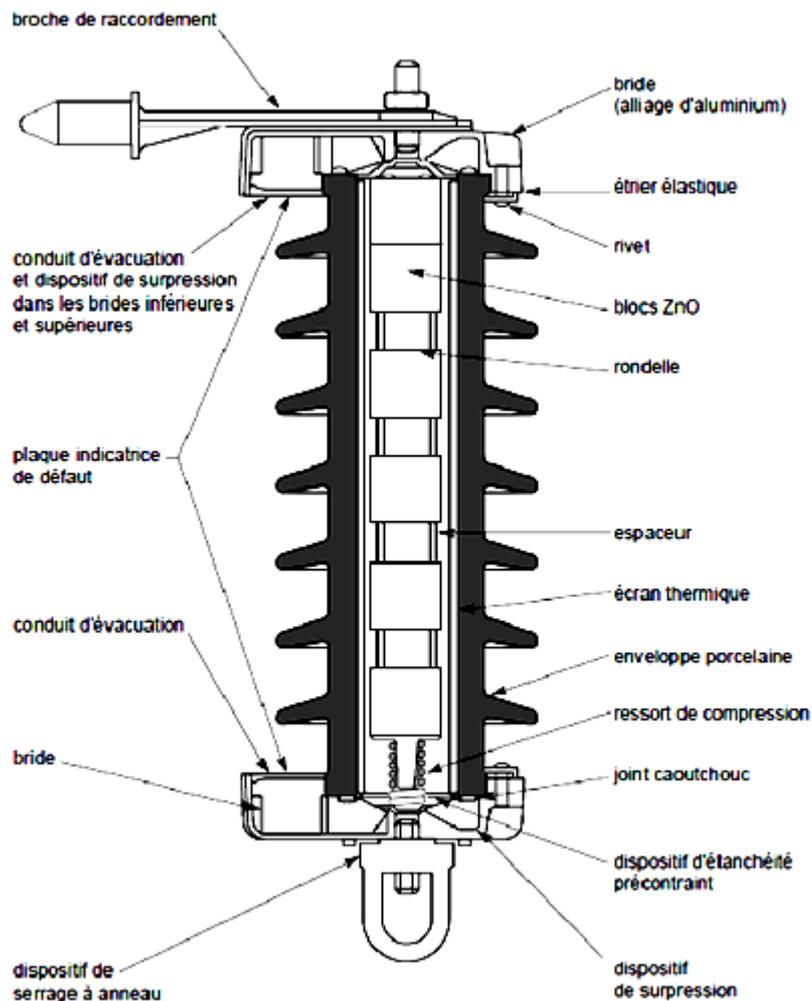


Figure IV.4 : Constitution d'un parafoudre à oxyde zinc [6].

IV.4.2 Principe de fonctionnement :

Tout l'intérêt de la varistance à base d'oxyde de zinc réside dans sa caractéristique courant-tension.

Sous la tension de service permanent, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant de fuite très faible (d'amplitude inférieure à 1 mA), de nature principalement capacitive. Lorsqu'une surtension apparaît, la résistance diminue rapidement ; la varistance écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal [6].

IV.5 Choix des parafoudres :

La méthode générale de choix d'un parafoudre en HT consiste à déterminer ses paramètres caractéristiques à partir des données des réseaux à l'endroit où il sera installé.

Les paramètres caractérisant le parafoudre sont :

- Uc , tension de régime permanent ;
- Ur , tension assignée ;
- I_{nd} , courant nominal de décharge ;
- classe de décharge et capacité énergétique ;
- caractéristique mécanique.

Les données relatives au réseau sont :

- Um, tension la plus élevée pour le matériel ;
- TOV (Temporary Over Voltage), surtensions temporaires apparaissant lors d'un défaut à la terre ou un délestage sur le réseau de distribution publique

Le choix de parafoudre consiste en un compromis entre les niveaux de protection des équipements et la capacité énergétique du parafoudre.

Le niveau de protection doit être le plus bas possible pour la tenue des équipements. Cela implique un dimensionnement en tension le plus faible possible, donc une plus grande difficulté à tenir les surtensions temporaires [22].

IV.6 Essais :

Il existe deux types d'essais réalisés sur les parafoudres ; essais de série et essais de type.

IV.6.1 Essais de série :

On a vu l'importance de la maîtrise des paramètres de fabrication sur les caractéristiques des varistances. Il est donc essentiel de définir une procédure d'essais de série comprenant au moins les essais suivants [6] :

- la vérification du niveau de protection ;
- la vérification de la capacité d'absorption d'énergie ;
- un vieillissement accéléré.

Les deux premiers essais sont à réaliser sur toutes les varistances, le dernier uniquement sur quelques pièces prélevées dans chaque lot de fabrication.

IV.6.2 Essais de type :

Parmi la panoplie des essais, il en est trois qui sont essentiels et qui concernent plus spécifiquement les caractéristiques électriques des varistances à oxyde de zinc: la mesure du niveau de protection, les essais de fonctionnement combiné et le fonctionnement sous pollution.

- Pour vérifier le niveau de protection, il faut mesurer la tension apparaissant aux bornes du parafoudre traversé par des ondes de courant données (ondes de type 8/20 ms pour définir le niveau de protection en foudre, et ondes de type 30/60 ms, par exemple, pour définir le niveau de protection en ondes de manœuvre).
- Les essais de fonctionnement combiné sont plus compliqués. Ils se caractérisent par des combinaisons de contraintes que le parafoudre aura à supporter en exploitation et leur cumul au cours du temps : régime permanent, surtensions temporaires, contraintes de foudre et/ou de manœuvre.

Le but de ces essais est de vérifier que l'association de ces contraintes ne conduit pas à l'emballement thermique du parafoudre. Pour des raisons pratiques, en haute tension, les essais sont généralement effectués sur des fractions de parafoudre représentatives du parafoudre complet, en particulier en ce qui concerne le comportement thermique.

- Enfin le fonctionnement sous pollution est une contrainte non négligeable pour un parafoudre. Un consensus relatif aux modalités d'un essai sous pollution artificielle pour les parafoudres à enveloppe en porcelaine à plusieurs unités permet maintenant de proposer une procédure d'essai normalisée.

L'objectif de l'essai est d'évaluer un risque d'emballement thermique en présence de pollution. La procédure d'essai s'appuie sur l'augmentation de la température des varistances résultant du non linéarité de la distribution de potentiel, fortement accentuée en cas de pollution [6].

IV.7 Conclusion :

On a vu dans ce chapitre les principaux types de parafoudres utilisées dans les réseaux haute tension. Les parafoudres à base de carbure de silicium ont été historiquement les premiers utilisés avant d'être surmontés par la technologie à base de varistances en oxyde de zinc.

Conclusion générale

De nos jours, la plus grande disponibilité de l'énergie électrique est demandée pour différents raisons, soit purement économiques (recherche de productivité maximale), soit pour des impératifs de sécurité, ou plus simplement de confort dans les utilisations domestiques.

Il est donc bien évident que dans ce contexte savoir supprimer, ou tout au moins réduire très fortement, les risques notamment celles dues aux surtensions.

Cette exigence passe par la maîtrise de la coordination de l'isolement et tout d'abord par l'application d'une méthode simple d'investigations conduisant à des associations et choix des appareils de protection et des parafoudres. Ces derniers (les parafoudres) devant limiter les surtensions prévisibles sur le réseau à un niveau acceptable par les premiers (appareils de protection).

Pour cela il faut :

- Estimer les surtensions d'origine atmosphérique (la foudre) qui peuvent apparaître sur le réseau électrique.
- Connaître les caractéristiques des appareils de protection installés et plus particulièrement leur principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients.
- Choisir les protections en tenant compte les schémas de liaisons à la terre du réseau électrique.
- Choisir les éléments techniques indispensables aux choix des parafoudres.

Ces points ont été détaillés dans le cadre de ce travail à travers ses quatre chapitres.

Le premier permet au lecteur de cerner la problématique posée par la nécessité de limiter les surtensions quelle que soit son origine, interne ou externe.

La protection des installations basse tension de ces surtensions a été présentée dans le second chapitre en détaillant les différents types de parafoudres rencontrés dans cette gamme de tensions.

Enfin, les deux derniers chapitres permettent de comprendre l'utilisation presque généralisée des parafoudres à base d'oxyde de zinc au détriment de ceux basés sur le carbure de silicium notamment dans la protection des réseaux électriques de moyenne ou haute tension.

Bibliographie et référence

- [1] Mouloud MECHATI : « Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques », Mémoire Magister, Annaba 2010.
- [2] Site internet : <http://www.france.paratonnerre.com/paratonnerre> France.
- [3] Catalogue technique, Cite1_catalogue56_1304_pdf ; Basse Tension.
- [4] A.ROUSSEAU : « Parafoudres basse tension- Composants réseau basse tension», Technique de L'ingénieur D4840 ,10 Aout 2003.
- [5] Site internet : <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/regime-de-neutre-tt-tn-ou-it>.
- [6] F.MACIELA : «Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB», Technique de L'ingénieur D4755 ,10 Mai 2008.
- [7] Affolter Jean-François : Haute Tension, Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud eivd, édition Yverdon-les-Bains, octobre 2000.
- [8] D.Fluchiron : Surtension et coordination des isolements, Cahier technique de Schneider n°179.
- [9] 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.
- [10] M.Ataoua, O. Mehammdia : «Comparaison des Modèles d'Arc en Retour d'un Coup de Foudre en Présence d'une Tour », Mémoire Master, Beskra Juin 2010
- [11] Dr FATMI : « Protection réseaux électriques-Les surtensions dans les réseaux », polycopie de cours, Centre universitaire d'ain Temouchent, 2017.
- [12] Luc Lasne : Electrotechnique, édition Dunod 2008.
- [13] INERIS. Institut International de l'Environnement et des Risque : « Le risque de foudre et les installations classés pour la protection de l'environnement », Septembre 2011.

- [14] Guide technique ABB Marché industriel : « les parafoudre »
- [15] Guide technique INDELEC : «La foudre apprivoisée ».
- [16] A.ROUSSEAU : « Parafoudres basse tension- description réseau basse tension»,
Technique de L'ingénieur D4841 ,10 Aout 2003.
- [17] Guide technique , Schneider Electric : «mt partner_b42_parafoudre ».
- [18] Dr. SOUAG.S :«Modélisation de base des réseaux électriques » polycopie de cours,
Centre universitaire d'ain Temouchent, 2017.
- [19] Guide technique , Schneider Electric: «installation électrique ».
- [20] M. ALTI NADJIM : « Contribution à l'étude de performances électriques des
parafoudres synthétiques sous tension alternative », Mémoire de Magister setif 2012.
- [21] Parafoudres haute tension Guide de l'acheteur : «parafoudre ABB ».
- [22] Nacer _Ghoul : « le comportement électrique d'un parafoudre ZnO suite à un régime
transitoire ».mémoire de master, Tébessa 2017.
- [23] Parafoudre MT site web : ABB.
- [24] Christian Bouquegneau : «les effets physique d'un impact de foudre »
- [25] Schneider Electric - Electrical installation guide 2010.
- [26] Parafoudre BT (éclateur) Site internet : <https://fr.farnell.com/epcos>.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I :

Généralités

I.1 Les réseaux électriques.....	2
I.2 Caractéristiques générales du transport électrique.....	2
I.3 Le réseau électrique réel.....	3
I.4 Les surtensions transitoires	4
I.4.1 Surtension internes.....	4
I.4.1.1 Surtensions de manœuvre	4
I.4.2 Surtensions externes	6
I.5 Surtension transitoires de foudre.....	6
I.6 Les coups de foudres.....	8
I.6.1 Coups de foudre direct.....	8
I.6.2 Coups de foudre indirect.....	9
I.6.3 Les effets physiques de la foudre.....	10
I.7 Protection des réseaux électriques contre les surtensions.....	11
I.7.1 Principe de protection	11
I.7.1.1 Premier niveau de protection.....	11
I.7.1.2 Deuxième niveau de protection	11
I.7.1.3 Troisième niveau de protection	11
I.7.2 Les paratonnerres.....	11

I.7.2.1 Paratonnerres à tige simple.....	12
I.7.2.2. Paratonnerre à cage maillée.....	12
I.7.2.3. Paratonnerre à fils tendus.....	13
I.7.3 Les éclateurs	13
I.7.3.1 Principe de Fonctionnement.....	14
I.7.3.2 L'éclateur à gaz	14
I.7.3.3 L'éclateur à air	15
I.7.3.4 Avantages	15
I.7.3.5 Inconvénients	16
I.7.4 Le parafoudre	16
I.7.4.1 Définitions et caractéristiques du parafoudre.....	16
I.8 Conclusion.....	17

Chapitre II:
PARAFOUDRES BT

II.1 Introduction.....	18
II.2 Installation des parafoudres BT.....	18
II.2.1 Installation sur les réseaux d'énergie.....	19
II.2.2 Surtensions en mode différentiel.....	21
II.2.3 Normes pour les installations Basse Tension.....	22
II.3 Types de Parafoudres.....	22
II.3.1 Parafoudres de Type 1.....	23
II.3.2 Parafoudres de Type 2.....	23
II.3.3 Parafoudres de Type 3.....	24

II.3.4 Parafoudres combinés.....	26
II.4 Les composants d'un parafoudre	26
II.5 Paramètres des Parafoudres	26
II.6 Choix des parafoudres.....	29
II.7 Essais.....	30
II.9 Conclusion.....	30

Chapitre III :

PARAFOUDRES MT

III.1 Introduction.....	31
III.2 Constitution du parafoudre	31
III.3 Principe de fonctionnement.....	32
III.4. Choix des parafoudres	33
III.5 Caractéristiques à considérer dans le choix du parafoudre	34
III.6 Enveloppe des parafoudres	35
III.6.1.Parafoudres à enveloppe en matériau synthétique	35
III.6.2 Parafoudres à enveloppe en porcelaine.....	36
III.6.3. Parafoudre à enveloppe métallique.....	36
III.7 Essais.....	38
III.8 Dispositifs annexes et accessoires de parafoudres.....	39
III.8.1 Déconnecteurs.....	39
III.8.2: Dispositifs de signalisation.....	40
III.8.3 Limiteurs de surpression.....	40
III.8.4 Compteurs de fonctionnements.....	40
III.8.5 Anneaux de champ.....	41
III.9 Conclusion.....	42

Chapitre IV :
PARAFOUDRE HT

IV.1 Introduction.....	43
IV.2 Parafoudre au carbure de silicium à éclateur.....	43
IV.2.1 Constitution	43
IV.2.2 Principe de fonctionnement.....	44
IV.3. Paramètres caractéristiques	45
IV.4 Parafoudre à oxyde de zinc	48
IV.4.1 Constitution.....	48
IV.4.2 Principe de fonctionnement.....	50
IV.5 Choix des parafoudres.....	50
IV.6 Essais	51
IV.6.1 Essais de série.....	51
IV.6.2 Essais de type.....	51
IV.8 Conclusion.....	52
<hr/>	
Conclusion générale	53

RESUME

Les surtensions transitoires dues à la foudre sont à l'origine de perturbations aussi bien pour le matériel que pour le consommateur et nuisent donc à la qualité de l'énergie. Ceci a conduit à l'utilisation des appareils de protection de plus en plus performants pour assurer la continuité de service.

La protection des installations électriques contre les surtensions produites par la foudre sur les conducteurs des liaisons électriques est réalisée par l'utilisation de différents composants (parafoudres, éclateurs à gaz, paratonnerre...) qui ont pour but de court-circuiter les impulsions parasites cheminant sur les liaisons électriques en dérivant la majeure partie de l'énergie de l'impulsion directement vers la terre.

Le bon choix du parafoudre garantit leur fonctionnement et leur durée d'utilisation. L'objectif de ce mémoire est de réaliser une étude bibliographique sur les parafoudres, leur construction et les différents types selon le niveau de tension du réseau électrique.

Mots-clés : surtension transitoire, foudre, parafoudre.

ABSTRACT:

Transient overvoltage due to lightning are the source of disturbance for both equipment and consumers and therefore affect the quality of the energy. This has led to the use of more and more efficient protective devices to ensure continuity of service.

Protection of electrical installations against surges generated by lightning on electrical connections of the conductors is achieved by the use of surge components (surge arrester, gas discharge...) that for shorting purposes interference pulses traveling on electrical connections the major part of the energy of the pulse directly into the earth.

The right choice of surge arrester guarantees their correct operation and their duration of lifetime. The objective of this dissertation is to present the state of the art of surge arresters, their construction, and the different type existing according to the voltage level of the electrical network.

Keywords: Transients surges, lightning, surge arrester.

ملخص:

يعتبر الجهد الزائد العابر الناتج عن الصواعق مصدرًا للاضطراب لكل من الأجهزة والمستهلك وبالتالي يؤثر على جودة الطاقة. مما أدى هذا إلى استخدام أجهزة حماية أكثر فعالية لضمان استمرارية الخدمة.

إن الهدف من حماية المنشآت الكهربائية ضد العواصف التي يولدها البرق على التوصيلات الكهربائية باستخدام مكونات الحماية ضد الصاعقة (مانع الصواعق، الأنبوب الغازي...) هو تقصير دائرة النبض المنقول على شبكة التوصيلات الكهربائية مما يؤدي إلى تحويل الجزء الأكبر من طاقة النبض مباشرة نحو الأرض.

إن الاختيار الصحيح لمانع الصواعق يضمن تشغيلها و مدة استخدامها.

إن الهدف من هذه المذكرة هي دراسة البرق وتحليل مختلف وسائل الحماية ضد هذه الظاهرة، واستنتاجنا

أن مانع الصواعق هو أفضل وسيلة للحماية ضد التوتر الزائد في الغلاف الجوي (البرق).

الكلمات المفتاحية: التوتر الزائد, البرق, مانع الصواعق.