



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADIMIQUE

Domaine : Sciences et technique

Spécialité : Génie électrique

Option : contrôle et diagnostic de système électrique

Présenté par : Salah Hommadi

Walid Hamdi

Meraghni Houcine Tahar

Thème

**ÉTUDE DE LA FOUDRE ET PROTECTION
CONTRE LE COUP DE FOUDRE**

Soutenu le 27 Juin 2009

Proposé et dirigé par :

Mr: A. Khchekhouche

2008-2009

بسم الله الرحمن الرحيم

"و يرسل السواحق فيصيب بها من يشاء"

صدق الله العظيم

سورة - الرعد -

Remerciements

Nous adressons nos plus vifs remerciements à toutes personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr A. Khchekhouche , pour se conseil et directive , le prof D.Benatouse et Mr I.Mida, pour leurs fructueux conseils et leurs suivi constant.

En fin, nous remercions vivement notre famille pour l'aide matérielle et morale durant la période de préparation.

Hommadi Salah

Hamdi Walid

Meraghni houcine Tahar

التهنئة

الحمد لله ومهما حمدناه فلن نستويه في حمده

إلى قدوتي الأولى ونبراسي الذي ينير دربي إلى من علمني أن أصمد أمام أمواج البحر الثائرة
إلى من أعطاني ولم ينزل يعطيني بلا حدود إلى من رفعت رأسي عالياً افتخاراً به

إليك أبي الحبيب

إلى التي مرآتي قلبها قبل عينيها وحضنتني أحشاءها قبل يديها

إلى من يشتهي القلب نطقها وترق العين لوحشتها

إلى شجرتي التي لا تذبل إلى الظل الذي آوي إليه

إليك أُمي الغالية

إلى أجدادي وجداتي

إلى من قاسمني حلو الحياة ومرها إخوتي وأخواتي

إلى أعمامي وعماتي وأخوالي وخالاتي وأبنائهم وبناتهم كل واحد باسمه.

إلى كل أصدقائنا بوبكر، الحبيب، أحمد، يحيى، عبد الغني، بشير، توفيق، حسان

إلى كل من علمني حرفاً.

إلى كل من اتسع له قلبي ولم تتسع له ورقتي، إلى كل هؤلاء أهدي ثمرة جهدي وأقول لهم: إن طال الزمان ولم تروني

فهذا جهدي فاذكروني، داعياً المولى أن يجزينا في الدنيا والآخرة.

إلى قسم مراقبة وتشخيص أنظمة كهربائية لموسم 2008-2009.

وليد حامدي

حمادي صالح

مرغني حسين الطاهر

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la foudre	
I.1. Introduction	2
I.2. Phénomène de foudre	2
I .2.1 Formation des nuages orageux	3
I .2.2. Caractéristiques du cumulo-nimbus	4
I.3. Décharge du foudre	4
I.3.1. Principe d'une décharge	4
I.3.2. La décharge atmosphérique	5
I.3.3. Classification des coups de foudre	6
I.3.4. Paramètres électriques de la foudre	8
I.3.5. Courbe du champ électrique au voisinage du sol	10
I.4 . Les surtensions de foudre	11
I.5 . Effets de la foudre	13
I.5.a. Effets thermiques (effet Joule)	13
I.5.b. Effet mécanique	13
I. 5.c. Effets acoustiques	13
I.5.d. Effets lumineux	13
1.5.e. Effets électromagnétiques	13
1.6. Conclusion	14
Chapitre II : Les décharges dans l'air	
II.1- Introduction	15
II.2. Phénomènes fondamentaux	15
II.2.1. Théorie cinétique des gaz	15
II.2.2. Phénomène de collision	15
II.2.3. libre parcours moyen	17
II.3. Mécanismes fondamentaux d'ionisation des gaz	17
II.3.1. Ionisation par simple collision	17
II.3.2. Excitation	18
II.3.3. Photo ionisation	18

II.4. Décharges dans les gaz	18
II.4.1.1. Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend).....	19
II.4.1.2. Modélisation de la décharge de Townsend.....	20
II.4.2. Loi de Paschen.....	24
II.5. Evolution de la décharge.....	26
II.5.1. En champ uniforme.....	26
II.5.2. En champ non uniforme.....	26
II.6. Conclusion.....	28

Chapitre III : Protection contre le coup de foudre

III.1. Introduction	29
III.2. Le principe de la protection	29
III.3. Les moyens de protections	30
III 3.1. Les protections primaires	30
III.3.1.1. Paratonnerre	31
III.3.1.2. Les fils tendus (câble de garde)	36
III.3.2. Les protections secondaires	37
III.3.2.1. Parafoudre	37
III.3.2.2 .Technologie des parafoudres	38
III.3.2.3. Principales caractéristiques des parafoudres	40
III.4. Conclusion	41
Conclusion générale	42

Listes des Figures

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de figure	page
Figure. I.1 :	Cumulo-nimbus.....	3
Figure. I.2 :	Principe d'une décharge	4
Figure. I.3 :	les éclairs intra nuageux (à l'intérieur du nuage) et inter nuageux (entre différents nuages)	5
Figure. I.4 :	les coups de foudre pour lesquels la décharge électrique s'effectue entre le nuage et le sol	5
Figure. I.5 :	Classification des coups foudre.....	7
Figure. I.6 :	Différents types de coups de foudre	8
Figure. I.7 :	Oscillogramme d'un courant de foudre.....	9
Figure. I.8 :	Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment au va éclater la foudre.....	11
Figure.I.9 :	Ondes de surtensions de foudre normalisées	12
Figure. II.1:	Cylindre de collision	16
Figure. II.2 :	Libre parcours moyen λ	17
Figure. II.3 :	Schéma de l'avalanche de Townsend	19
Figure. II.4:	Caractéristique de Townsend	20
Figure. II.5 :	Modélisation de la décharge de Townsend.....	21
Figure. II.6 :	Courbe de Paschen	25
Figure. II.7 :	Manifestation de l'effet couronne	26
Figure. II.8 :	Manifestation des aigrettes	27
Figure. II.9 :	Manifestation de décharge	27
Figure III.1:	Prince d'une protection par paratonnerre	30
FigureIII.2 :	Utilisation de la méthode de la sphère fictive.....	31
Figure. III.3 :	<i>Schéma de principe</i> paratonnerre à tige simple.....	32
Figure. III.4:	<i>Schéma de principe</i> paratonnerre à cage maillée	33
Figure. III.5 :	Schéma de principe de paratonnerre à <i>dispositif d'amorçage</i>	34
Figure. III.6 :	<i>Schéma de point de l' impact</i> et pose le <i>paratonnerre</i>	35
Figure. III.7:	types de <i>paratonnerre à dispositif d'amorçage</i>	35
Figure. III.8:	<i>Les câbles de garde</i>	36

Figure. III.9:	<i>les différents cas d'amorçage d'une ligne aérienne.....</i>	37
Figure. III.10:	<i>Utilisation des parafoudres</i>	38
Figure. III.11:	<i>fonctionnement d'un parafoudre</i>	38
Figure. III.12:	<i>fonctionnement des composants <parafoudre>.....</i>	39

Table Notations & Symboles

Table Notations et Symboles

$t[\mu s]$	Temps de simulation
$i[KA]$	Courant de foudre à la base du canal
Q	La charge totale
$V(t)$	Onde conventionnelle
$K [j/k]$	la constante de boltzmann ($K=1.38.10^{23} j/k$)
$v[m/s]$	la Vitesse quadratique moyenne de la particule
T	la température thermodynamique
m	la masse de la particule
n	la densité de particule de gaz
σ	la section efficace de collision
n_0	Nombre d'électrons / seconde émis de la cathode
n_x	Nombre d'électrons à l'abscisse x
dn_x	Nombre d'électrons créés à l'abscisse x
$I_0[A]$	le courant photoélectrique initial à la cathode
η	le coefficient d'attachement
n_{0+}	le nombre d'ions positifs
γ	Deuxième coefficient d'ionisation de Townsend
n_d	Nombre d'électrons à la distance d
h	Constant de Planck = $6,624 \cdot 10^{-34} j.s$
$V_d[v]$	la tension de décharge
P	Pression du gaz
$I_n[A]$	Courant de décharge nominale
$I_{imp}[A]$	Courant de choc impulsionnel
$I_{max} [A]$	Courant de décharge maximal
$U_p[v]$	Niveau de protection du parafoudre
$U_c [v]$	Tension maximal de 50 Hz
NFC 15-100	Normes Françaises, Installations électriques à basse tension

Introduction Générale

Introduction générale

L'importance de l'étude des décharges électriques dans de grands intervalles n'est pas à démontrer afin de concevoir l'isolement et la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (lignes à haute tension, transformateurs, générateurs...).

Une décharge électrique (ou étincelle) est instantanée pour l'oeil humain et s'accompagne d'un claquement sec et violent, comme un gigantesque coup de fouet [3].

La foudre est une décharge électrique qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre des nuages orageux ou entre des nuages orageux et la terre. Les éclairs transportent jusqu'à 100 millions de volts d'électricité et passent de nuage à nuage, ou de nuage à la terre, et en sens opposé. La foudre a tendance à frapper les régions de haute altitude et les objets proéminents, particulièrement les bons conducteurs d'électricité comme le métal.

Par ciel clair ce champ est de l'ordre de 100 volts par mètre, mais il est très variable dans le temps; il peut atteindre des valeurs de 30.000 volts par mètre, par temps nuageux, et même s'inverser en polarité. L'origine de ce champ est mal connue; elle peut provenir des rayonnements solaires ou des frottements entre les molécules de l'air, des cristaux de glace des nuages ou les grêlons: il est de fait que ces causes perturbent profondément ce champ électrique. Même par temps calme et clair on constate des charges électriques dues à l'ionisation de l'air et qui se dirigent vers le sol.

La foudre produit des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques pour déterminer ces surtensions induites on doit concevoir des modèles qui servent à calculer le courant d'arc en retour. Les modèles utilisés sont : modèles de Bruce et Golde, modèle ligne de transmission et modèle de ligne de transmission modifié.

La protection des structures au sol contre la foudre consiste à déterminer le point d'impact .

Il trouve deux grands moyens de protection contre la foudre est protection extérieure (paratonnerre ,cage maille , file tendus ...) et protection intérieure (parafoudre) .

Chapitre I

Généralité sur la foudre

I.1. Introduction :

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres :

- Elle peut être à l'origine de perturbation momentanées dans la continuité de service, donc de dégradation de la qualité des alimentations.
- Elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations.
- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre).

La foudre a toujours été une cause de perturbation dans l'utilisation de l'électricité .

Dans ce chapitre nous allons revoir quelque information d'ordre générale sur la foudre et les surtensions.

I.2. Phénomène de foudre :

Qu'est-ce que la foudre ?

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge électrique accompagnée d'une lumière vive (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre). L'éclair est l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges d'origine atmosphérique. Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique .

-La terre et l'électrosphère, zone conductrice de l'atmosphère (épaisseur de l'ordre de 50 à 100 km), constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation .

-L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de 1500 A pour tout le globe terrestre.

La foudre est liée à la formation du nuage orageux, masses d'eau sous forme d'aérosols, il y'a un courant de conduction entre la base et le sommet due à la différence de température, ce courant d'air ascendant entraîne les particules les plus légères qui s'élèvent sous forme de glace et se chargent positivement tandis que les particules plus lourdes descendantes qui se trouvent en bas sont chargées négativement tombent sous l'action de leur poids. Il y'a trois type de décharges, une décharge se produit au sein du nuage ou entre nuage ou entre nuage et sol .dans ce dernier cas on parle de foudre.

Le phénomène conduit à un champ électrique nuage-sol peut atteindre -15 à -20 kv/m sur sol plat. Mais la présence d'obstacles déforme et augmente localement ce champ d'un facteur 10 à 100 ou même 1000 selon la forme des aspérités (phénomène aussi appelé « effet de pointe » .il apparait un canal ionisé appelé traceur en direction [2].

I .2.1 Formation des nuages orageux [1],[7] :

Les nuages orageux sont généralement de type cumulo-nimbus (Fig.I.1) , ils se forment sous l'effet de courant d'air chaud ascensionnel qui monte à des vitesses importantes entraînant dans ces turbulences des centaines de milliers de tonnes d'eau .

Le mouvement est si puissant que le sommet du nuage s'écrase contre une couche supérieure de l'atmosphère, ce qui explique qu'ils ont très souvent une forme caractéristique dite « enclumes » leur base peut atteindre des surfaces de plusieurs dizaines de km² et dont le sommet atteint 15 km et ils s'étendent entre des altitudes allant de 2 à 20 km .



Fig. I . 1: *Cumulo-nimbus*

On distingue deux sortes d'orages :

- Les orages de chaleur naissant d'un effet de réchauffement des sols, associé à une forte humidité. Ce sont des orages locaux. L'origine de la création du nuage réside dans l'apparition des bulles d'air chaud et humide qui s'élèvent et forment un nuage à des altitudes où peut s'initier la condensation. Ce type ne vit généralement qu'une ou deux heures .
- Les orages océaniques ou frontaux se formant lors de la rencontre de masse d'air importante de température et d'humidité différente, cette rencontre

Produit des mouvements d'air ascendant accompagnés de phénomènes de condensation. Ces orages peuvent présenter des fronts de centaines de kilomètres, persister des jours durant et se propager sur des milliers de kilomètres. Les nuages orageux sont donc caractérisés par la présence de masses d'eau considérables (vapeur, gouttes, cristaux de glace, grésil, grêlons) et de mouvements d'air puissants conduisant à des vents extrêmement violents pouvant dépasser la centaine de km/heure.

I.2.2. Caractéristiques du cumulo-nimbus [2] :

Le nuage orageux est le plus vigoureux des nuages. On l'appelle cumulo-nimbus ou roi des nuages. Les cumulo-nimbus se présentent rarement sous forme isolée (Fig. I.1), mais plutôt en agrégats. Ils diffèrent des autres nuages d'averses à la fois par l'échelle de leur extension tant verticale qu'horizontale et par leur aptitude à donner naissance à des phénomènes électriques.

Un cumulo-nimbus isolé a la forme d'une énorme tour verticale surmontée d'une zone supérieure en forme d'enclume et appelée enclume, située à une altitude variant entre 6 et 18 km, parfois davantage. Les cumulo-nimbus sont pratiquement tous observés dans la troposphère où la température décroît, en moyenne, jusqu'à la tropopause, limite supérieure de la troposphère.

I.3. Décharge du foudre :

I.3.1. Principe d'une décharge :

Le principe de la décharge d'un coup de foudre négatif descendant est le suivant

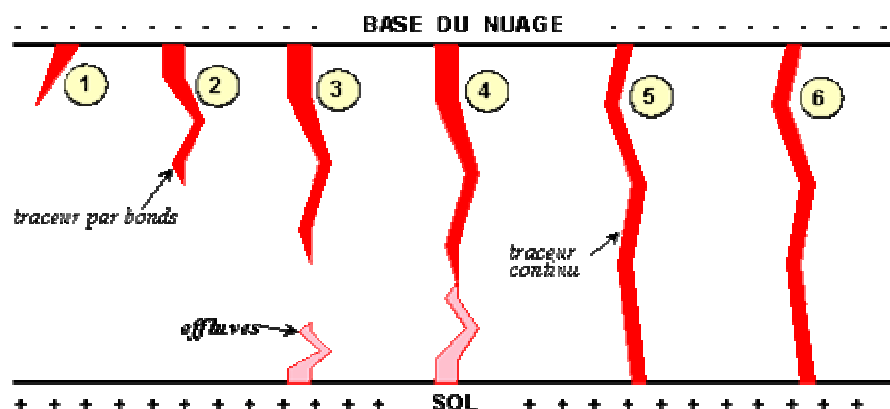


Fig. I . 2: Principe d'une décharge

- 1- Un traceur se développe à partir du nuage .
- 2- Ce traceur progresse par bonds vers le sol. Il est constitué de particules électriques arrachées au nuage par le champ électrique nuage-sol. Ces particules forment un canal lumineux qui se dirige vers le sol .
- 3- Lorsque le traceur arrive à proximité du sol, des effluves (étincelles) partent du sol .
- 4- Les effluves entrent en contact avec la pointe du traceur .
- 5- Un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur. Cet arc très lumineux permet l'échange des charges électriques entre le nuage et le sol. Le traceur ne progresse plus et devient continu, l'onde de choc se transforme en onde sonore (le tonnerre) .
- 6- Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra. Entre ces arcs, le traceur continu subsiste laissant circuler un courant .

I.3.2. La décharge atmosphérique :

On distingue deux grandes familles d'éclairs:



Fig. I . 3: *les éclairs intra nuageux (à l'intérieur du nuage) et inter nuageux (entre différents nuages)*



Fig. I. 4: *les coups de foudre pour lesquels la décharge électrique s'effectue entre le nuage et le sol*

- La première phase de la décharge qui se produit à l'intérieur même d'un nuage, ou entre deux nuages orageux, est appelée l'éclair intra-nuage ou inter-nuage .

- La deuxième phase d'un coup de foudre (donc entre la terre et le nuage) est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse, appelée traceur, qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible (environ 200 km/s). Un traceur (ou précurseur ou encore leader) est en fait un canal ionisé, d'une grandeur caractéristique importante à l'échelle macroscopique (typiquement 2 à 3 cm de diamètre), qui est la conséquence directe des phénomènes d'avalanche électronique.

En effet, l'air atmosphérique contient en permanence des ions négatifs et positifs, en quantité variant de 100 à 1000 ions par centimètre cube. Lorsqu'un de ces électrons se trouve dans une région de l'espace où règne un champ électrique important il va subir une accélération et acquérir une énergie cinétique. Très vite il va entrer en collision avec un atome neutre. Si à cet instant l'énergie acquise par l'électron est supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré, la collision va créer un nouvel électron libre. Ce processus est appelé "ionisation par choc" ou "ionisation collisionnelle". Ce nouvel électron se comporte comme le précédent et crée donc à son tour un autre électron libre et rapidement le phénomène prend une allure d'avalanche. L'intensité de champ électrique nécessaire pour qu'un électron puisse ioniser un atome est de l'ordre de 30 kV/cm dans l'air et à pression normale.

Lorsqu'un traceur établit un canal ionisé entre le sol et le nuage, une ou plusieurs décharges se produisent. Ces décharges constituent la foudre proprement dite. Elles se déplacent à une vitesse de l'ordre de 40 000 km/s et correspondent à une tension de l'ordre de 100 millions de Volts et un ampérage de 30 000 A. Le long du trajet de la décharge, l'air peut atteindre une température de 30 000°C.

I.3.3. Classification des coups de foudre [1],[4],[7] :

Les coups de foudre sont classés selon :

- La partie positive ou négative du nuage qui se décharge.
- Le sens de formation du traceur qui se développe entre le nuage et le sol.

a)Coups de foudre descendants :

- Négative
- Positif

b) Coups de foudre ascendants :

- Négative
- Positif

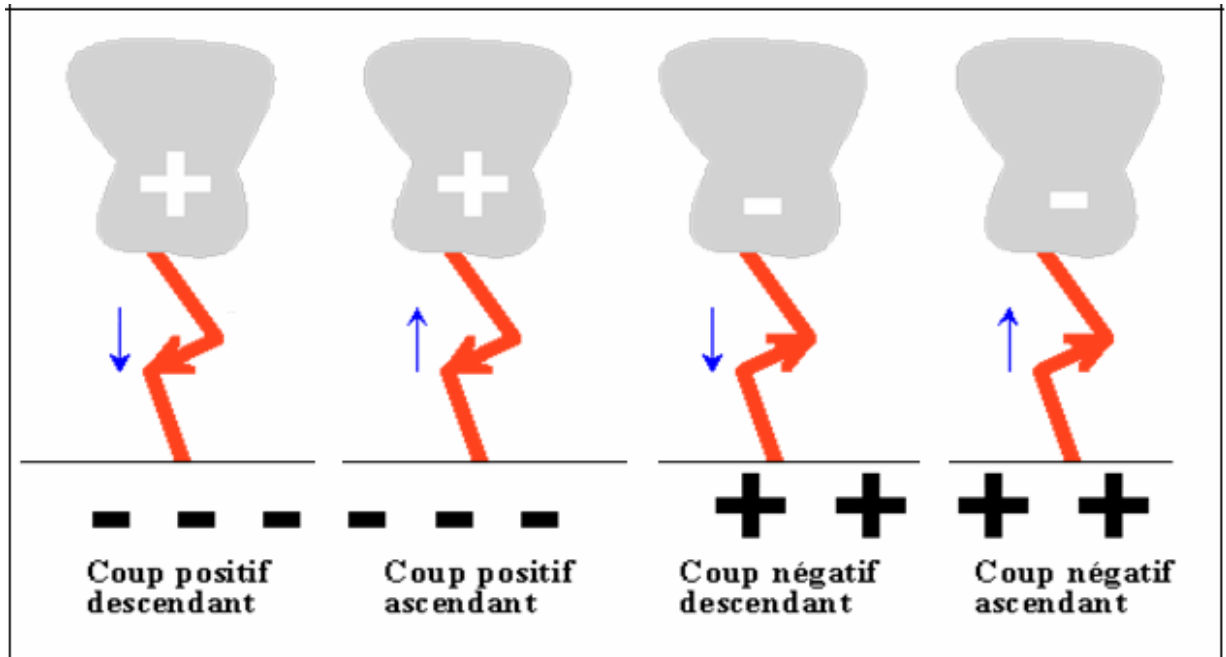


Fig. I . 5: *Classification des coups foudre.*

- Un Coup de foudre est dit descendant , lorsque le traceur se développe à partir du nuage, il est ascendant lorsque le traceur se propage à partir du sol.

- Un coup de foudre est dit négatif, si la partie négative du nuage se décharge, il est dit positif, si la partie positive se décharge.

1. Les coups de foudre négatifs descendants et ascendants sont les plus fréquents. Leurs fréquences d'apparition sont de l'ordre de 80 à 90 % en région tempérées . Le coup de foudre négatif descendant apparaît en régions plates, tandis que le coup de foudre négatif ascendant apparaît en région montagneuses et en présence d'aspérités (structures élevées, tours et pylônes) .

2. Les coup de foudre positifs descendants se présentent dans 10 à 20 % des cas, tandis que le coup positif ascendant est très rare par ce qui précède, nous pouvons conclure qu'en terrains plats, le coup de foudre négatif descendant est plus fréquent et plus dangereux.

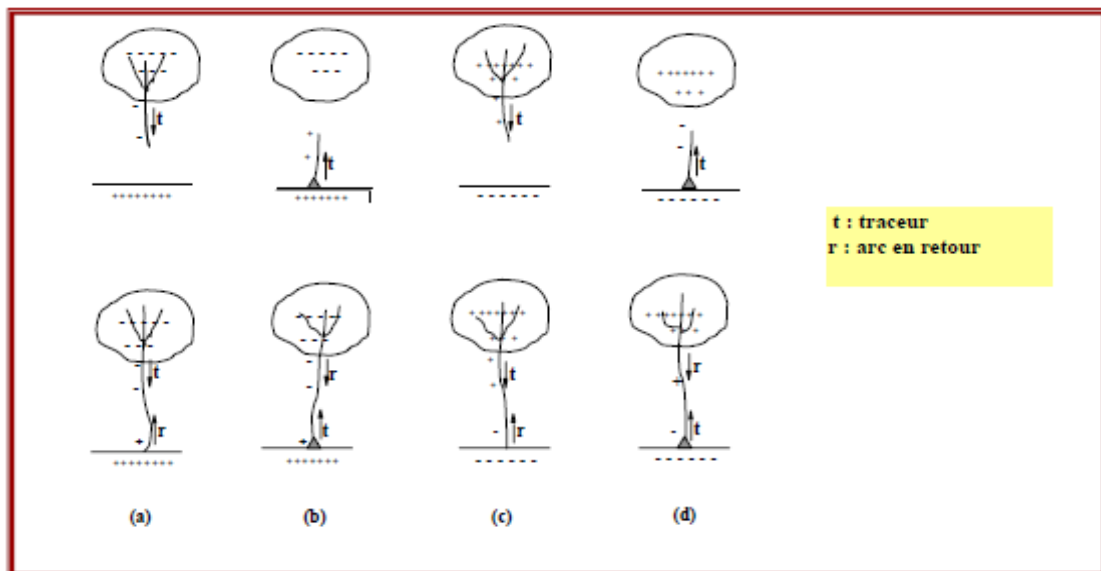


Fig. I . 6: Différents types de coups de foudre [3]

I.3.3.1 Le traceur[4] :

Le canal ionisé formé établi ainsi entre les deux pôles un pont suffisamment conducteur pour permettre à la foudre de se propager. On l'appelle « traceur par bonds », car il « trace » le chemin de l'éclair, enformant une ramification dans le ciel visible à l'œil nu , en progressant par bonds. 40 à 100 μ s s'écoulent entre chaque bond .

I.3.3.2 L'arc en retour[4] :

Dès que la pointe du traceur s'approche du sol, les pré-décharges ascendantes se forment et rejoignent le traceur ascendant situé à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol (60 mètres en moyenne). Dès que le traceur par bonds négatif rencontre les pré-décharges positives du sol, une connexion se produit entre elles. Les pré-décharges qui neutralisent à ce moment le traceur par bonds en remontant le canal ionisé est appelé « arc en retour ».

I.3.4. Paramètres électriques de la foudre[7] :

➤ 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 . 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 .

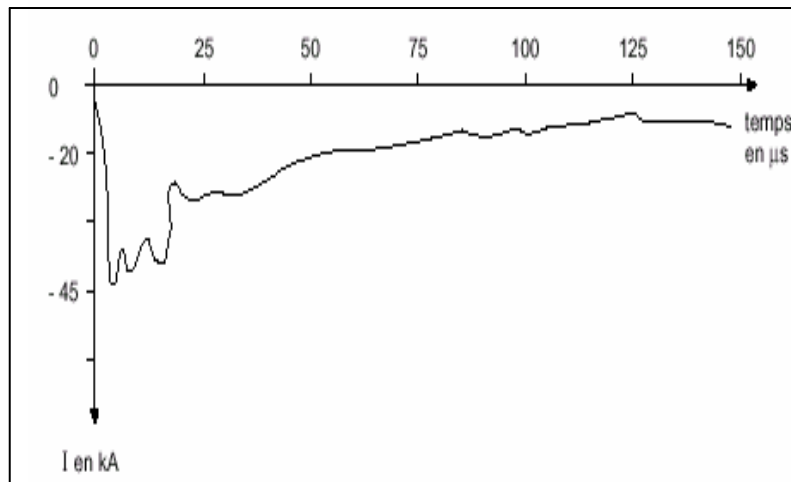


Fig. I . 7: *Oscillogramme d'un courant de foudre [6] .*

➤ **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 ou en ampères carrés ×seconde, et elle représente l'énergie

que le courant d'un coup de foudre peut dégager dans une résistance de $400\ \Omega$; ce paramètre sert à l'estimation des effets thermiques de la foudre [1],[4].

➤ Charge totale

Ce paramètre exprimé en coulombs© 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.3.5. Courbe du champ électrique au voisinage du sol [2],[4] :

Dans sa phase de maturité, le cumulo-nimbus chargé électriquement , à sa base, un potentiel électrique (encadré) de l'ordre de 100 MV (millions de volts) par rapport au sol. (Fig.I.8) représente le champ électrique que créent les charges électriques d'un cumulo-nimbus au voisinage du sol. En terrain plat, par beau temps (en l'absence de nuages orageux !), la composante verticale du champ électrique est de l'ordre de 100 V/m, à cause de la présence d'une charge électrique positive au niveau de l'ionosphère, et de charges négatives en même nombre au niveau du sol. L'approche du nuage orageux, qui se déplace à des vitesses atteignant parfois 80 km/h, le champ électrique au niveau du sol s'inverse et croît fortement , car la base du nuage agit comme une charge négative nette importante par rapport à un sol qui s'électrise positivement. Dès que le champ électrique atteint des valeurs de l'ordre de 10 kV/m, c'est-à-dire dix mille volts par mètre, la décharge au sol est imminente.

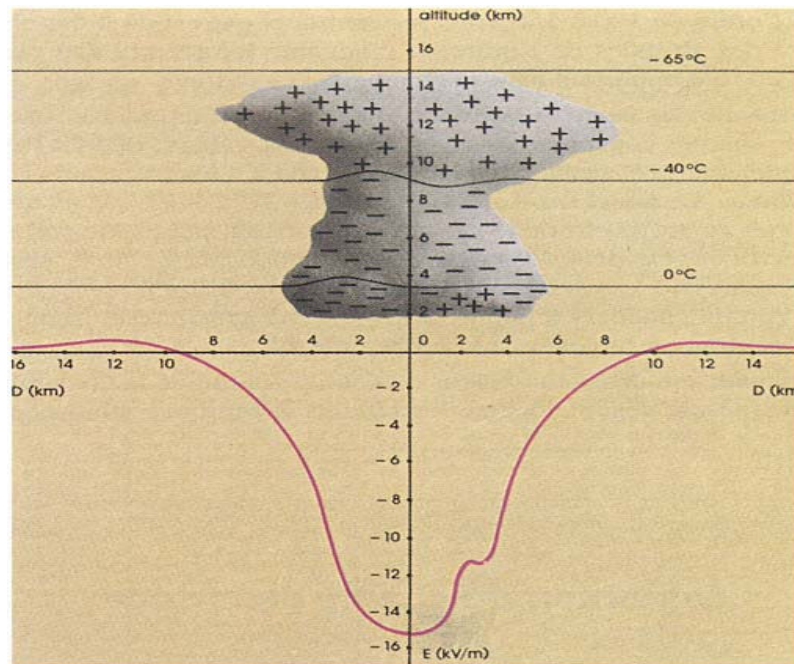


Fig. I . 8:

Schéma

montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment au va éclater la foudre .

I.4 . Les surtensions de foudre [5] :

Elles ont pour origine des décharges atmosphérique de foudre .d'après les statistiques, la moitié des coups de foudre ont une amplitude supérieure à 38 KA .pour les essais, les parafoudres sont testés avec une onde de choc de courant normalisée de 65 KA .

l'amplitude des surtensions de foudre peut atteindre, pratiquement de 2 à5 fois la tension nominale du réseau, et leur temps de montée est compris entre 0.1 et 10 μ s .l'onde conventionnelle universellement admis comme représentative de ces surtensions, est l'onde pleine normalisée 1.2/50 μ s, (Fig.I.9..a) .

l'apparition d'amorçages, aux éclateurs ou par contournement de chaînes d'isolement souvent cette onde en « onde coupée », représentée dans (Fig.I.9..b) .

La répartition des charges électrique de signes contraire, dans les parties basse et haute du nuage, lu donne l'aspect d'un condensateur plan. La rupture diélectrique à l'intérieure du nuage, engendre une décharge électrique accompagnée de l'éclair, et peut provoque une élévation de potentiel d'une ligne proche. On peut aussi considérer le sol comme une électrode de charge opposée à la partie basse du nuage distance de 2 à 3 Km l'air constituant le diélectrique du condensateur La foudre a lieu lorsque le gradient

limite est atteint .cela se concrétise par la formation d'un canal conducteur entre le sol et le nuage qui va permettre de décharger l'énergie du nuage en écoulant un courant intense .dans les régions à climat tempéré, la partie basse des nuages est chargée négativement , dans 80 à 90 %des cas .la décharge est alors désignée par :

Coup de foudre négatif. Dans le cas contraire, les coups de foudre sont dits positifs généralement, ce sont ces derniers qui sont les plus contraignants en véhiculant plus d'énergie. Notons que les aspérités ou saillies du terrain (arbre, tour, pylône, etc....) offrent des points d'impacts préférentiels, à cause de la croissance du champ électrique par effet de pointe .

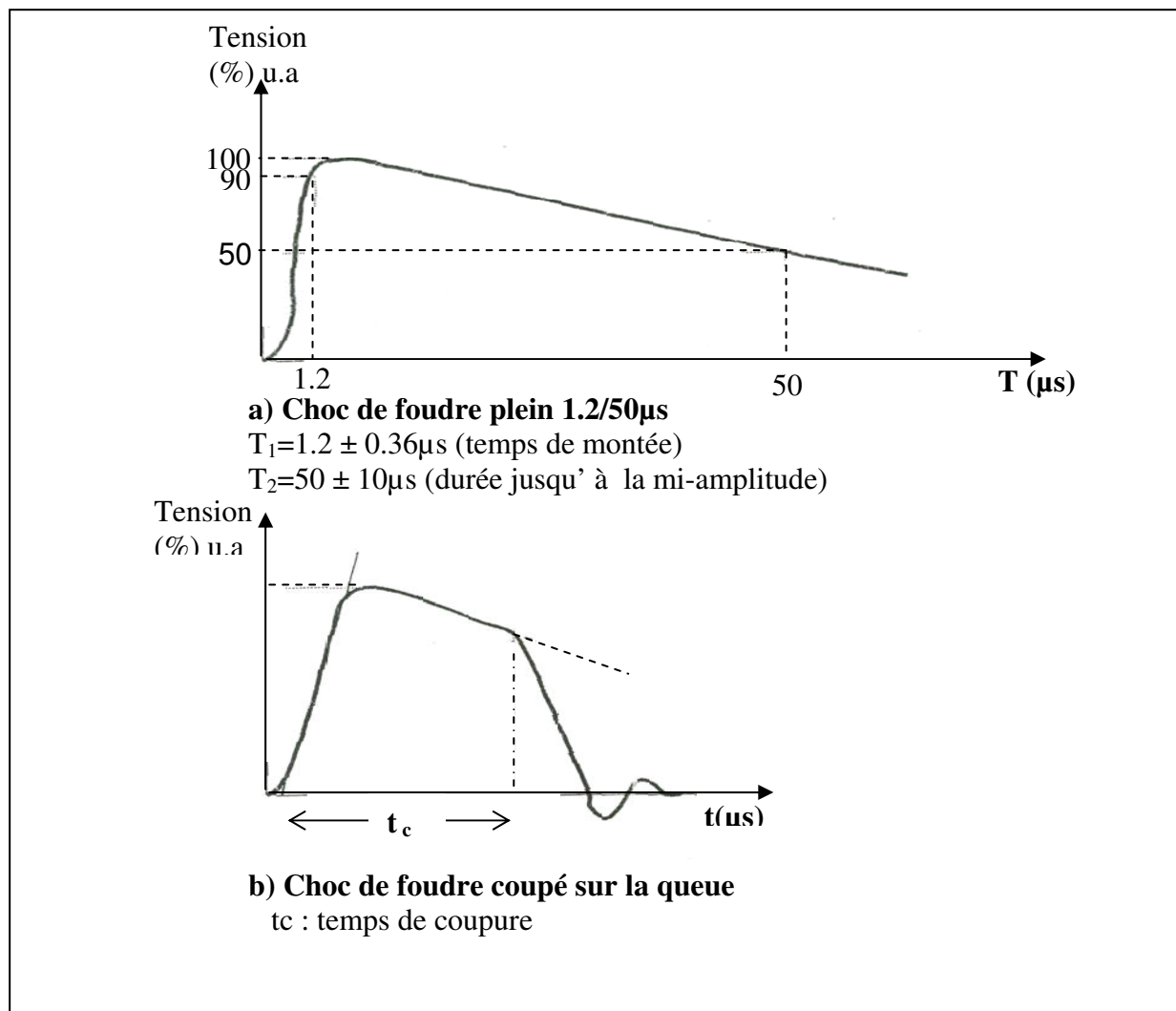


Fig. I. 9: Ondes de surtensions de foudre normalisées.

I.5 . Effets de la foudre :

Le courant de la foudre est un phénomène haute fréquence qui va provoquer en plus des effets d'inductions et de surtensions d'autres effets tel que [1],[4] .

I.5.a. Effets thermiques (effet Joule) :

La fusion des éléments au point d'impact du coup de foudre.

-Ecrasement des câble à cause de la produite par la vaporisation de l'eau dans les sols humides.

-Le risque d'incendie due à la circulation de courant importante (1 à 100 KA)

- Dissipation de l'énergie sous forme de chaleur.

I.5.b. Effet mécanique :

Lorsque le courant de la foudre circule dans des conducteurs parallèles, ils provoquent de la force d'attraction ou de répulsion pouvant entraîner des déformations mécaniques et des ruptures.

-Dégradation de matériel de façon brutale comme le claquage diélectrique par surtension ou par vieillissement prématuré à cause des contraintes des structures.

I. 5.c. Effets acoustiques :

Les forces électrodynamiques liées au courant s'écoulant dans l'éclair créent une dilatation de l'air du canal de foudre, accompagnée d'une élévation de pression dans le canal. Cette surpression et sa disparition brutale, créent une onde de choc se propageant ensuite dans l'atmosphère. Cette onde de choc peut générer de fortes surpressions sur des structures avoisinantes et conduire au renversement de panneaux, murs,...etc.

I.5.d. Effets lumineux :

Les effets sur les installations sont limités aux équipements optiques (cellules, caméra,...). En ce qui concerne l'homme, des lésions oculaires peuvent toutefois apparaître .

1.5.e. Effets électromagnétiques :

La foudre génération des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (KHz à MHz) provoque des perturbations radiophoniques.

1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons regroupé quelques informations sur la foudre, L'éclair est l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges d'origine atmosphérique. Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique. Surtensions a travers ces informations il s'est avéré que les surtensions de foudre sont les plus dangereux ,

Chapitre II

Les décharges dans l'air

II.1. Introduction :

Dans les systèmes à haute tension, il est indispensable de reconnaître et d'étudier les phénomènes complexes d'ionisation, de formation et de développement des décharges qui se produisent dans l'air. L'évaluation des lois de prédétermination générale des tensions de décharge entraîne le besoin d'une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et l'amélioration de ces connaissances passe nécessairement par l'étude physique de la décharge.

II.2. Phénomènes fondamentaux :

II.2.1. Théorie cinétique des gaz :

A l'équilibre, et en l'absence de forces extérieures, un gaz est constitué d'un ensemble de particule uniformément répartie, dont les vitesses n'ont aucune direction privilégiée (distribution isotrope). L'énergie de chaque particule peut être stockée sous différente forme, énergie de translation dans le cas d'un atome, énergie de rotation et de vibration dans le cas d'une molécule [4] .

Dans le cas simple d'un atome en translation, son énergie est égale à :

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} K T \quad (II.1)$$

Où :

m : est la masse de la particule.

K : est la constante de Boltzmann ($K = 1.38.10^{23}$ J/K)

T : est la température thermodynamique

v : est la vitesse quadratique moyenne de la particule.

II.2.2. Phénomène de collision :

Au cour de leur mouvement, les particules peuvent se rencontrer, au sens où elles se rapprochent suffisamment pour donner lieu à une modification de leurs énergies respectives (avec conservation de l'énergie totale).

Si les particules n'échangent que l'énergie cinétique de translation on parle de choc élastique , c'est le cas presque tout les atomes dans un gaz pris dans les conditions de pression et de température normales.

Si les particules échangent une partie de leur énergie interne, on parle de choc non élastique. L'échange d'énergie est d'autant plus grand que les masses des particules sont voisines.

En ce qui concerne la décharge dans les gaz, les collisions non élastiques ne concernent que les électrons de la couche supérieure, électrons dits de valence qui sont impliqués dans la réaction chimique .

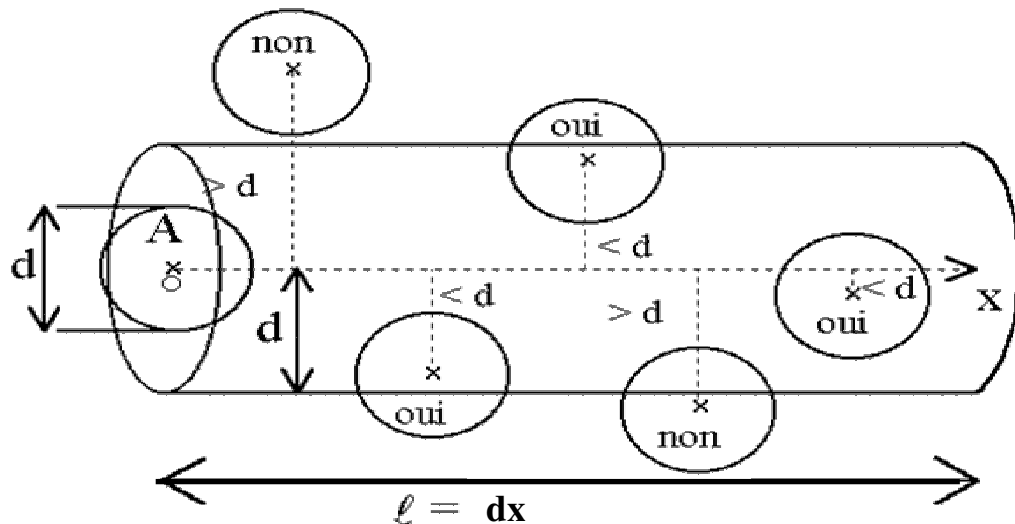


Fig. II. 1: *Cylindre de collision .*

Où :

d : est le diamètre de particule.

Oui : indique que le choc va voir lieu.

Non : indique que les particules ne pourront pas se rencontrer.

La probabilité q'une particule entre en collision est le rapport du nombre de collision

dn subit par la particule pendant un déplacement élémentaire dx .

Par définition on pose :

$$p = \frac{dn_x}{dx} = n \sigma \quad (II.2)$$

Où :

n : est la densité de particule de gaz.

σ : est la section efficace de collision.

II.2.3. libre parcours moyen[4] :

C'est la distance parcourue entre deux chocs successifs. Il est à prévoir que le libre parcours est une quantité aléatoire et sa valeur moyenne dépend de la concentration des particules ou la densité du gaz .

Il y a collision quand la distance entre les centres de particules est r_1+r_2 .

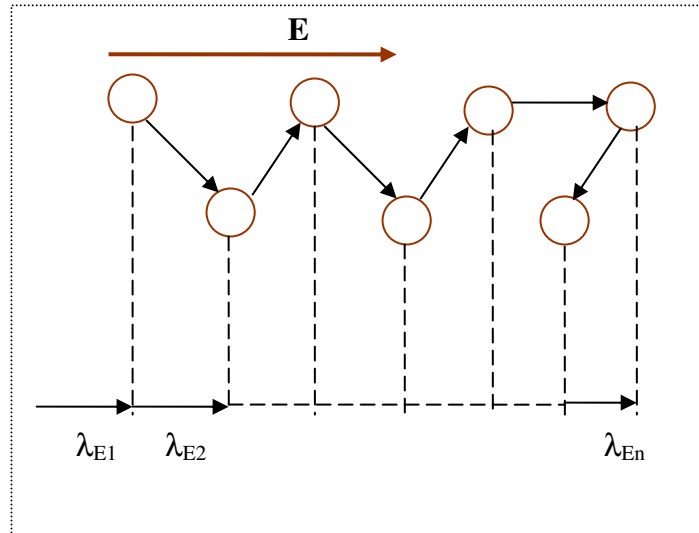


Fig. II. 2: Libre parcours moyen λ .

II.3. Mécanismes fondamentaux d'ionisation des gaz :

L'existence d'une décharge électrique résulte du passage d'un courant dans les diélectriques gazeux et donc de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou molécules neutres constituant ces gaz. Ce courant est «porté » essentiellement par les particules rapides, c'est-à-dire les électrons. Il est donc important d'étudier tous les mécanismes régissant l'existence de ces électrons libres .

II.3.1. Ionisation par simple collision :

Lorsque l'énergie cinétique d'un électron ($1/2 mv^2$), en collision élastique avec une molécule neutre de gaz, dépasse l'énergie d'ionisation ($E_i = e.V_i$) de cette molécule, une ionisation, schématisée comme suit, peut se produire .



En général, un ion positif et 2 électrons mobiles lents résulteront. La probabilité pour que ce processus se produise est nulle, pour des énergies égales à l'énergie d'ionisation et croît lorsque l'énergie cinétique de l'électron augmente.

II.3.2. Excitation :

Dans le cas où l'énergie transférée pendant la collision entre l'électron primaire et la molécule neutre est faible, il n'y aura pas possibilité d'ionisation. Toutefois, la molécule se retrouve dans un état excité M^* qui consiste en un déplacement de l'électron de son orbitale fondamentale (ou de repos) vers l'orbitale suivante.



Cette molécule excitée peut retrouver son état fondamental en libérant un photon d'énergie $h\nu$.



Où h est la constante de Planck = $6,624 \times 10^{-34}$ J.s

II.3.3. Photo ionisation :

Une molécule à l'état fondamental peut être ionisée par un photon de la fréquence ν à condition que les quantum d'énergie $h\nu$ émis par un électron déjà excité ou ionisé, lors de son retour à son état de repos (fondamental), est plus grande que l'énergie d'ionisation de la molécule.



II.4. Décharges dans les gaz :

La décharge est produite dans un gaz au moment où le champ électrique dépasse la valeur seuil nécessaire à l'amorçage de la décharge

Les mécanismes de décharge connus dans un gaz sont :

- 1- mécanisme d'avalanche électronique.
- 2- Loi de Paschen.

II.4.1.1. Mécanisme d'avalanche électronique (décharge de Townsend):

En l'absence de tout champ électrique appliqué, il peut exister dans un gaz contenu entre deux électrodes un certain nombre de particules chargées produites soit par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou par radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant la surface cathodique avec une source de rayonnements ultraviolets pour en extraire des électrons [3],[4].

Si un champ électrique est appliqué à l'espace inter-électrodes, un électron accéléré par ce champ appliqué, acquiert une énergie qui peut suffire, à partir d'une certaine valeur de champ électrique, à ioniser par collision une particule neutre du gaz pour produire de nouveaux électrons, qui à leur tour acquerront par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autre molécules.

Ce nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme ils continuent à se déplacer sous l'action du champ électrique en produisant ainsi une avalanche électronique. C'est ce phénomène qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode comme il est illustré sur (fig. II.3).

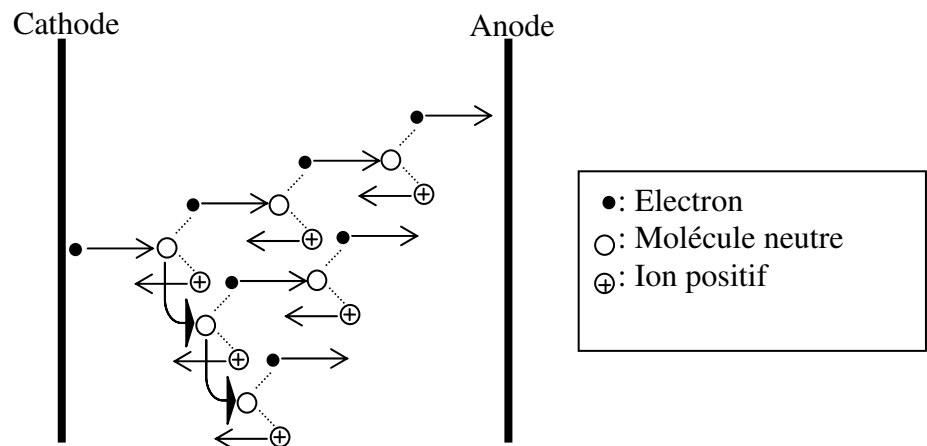


Fig. II. 3: Schéma de l'avalanche de Townsend

L'allure du courant obtenue quand on fait croître la tension est donnée par (fig. II.4)

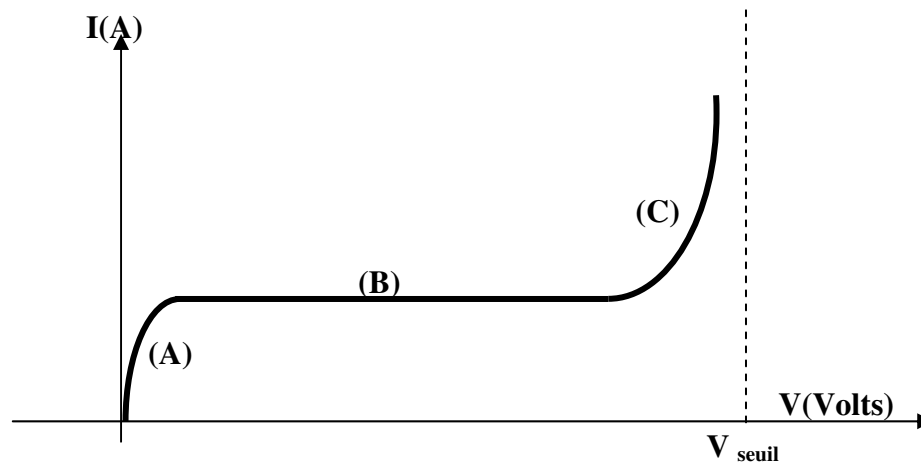


Fig. II. 4 : *Caractéristique de Townsend*

Nous constatons une augmentation linéaire dans la zone (A) représentant une phase ohmique, suivie d'une saturation (zone (B)) correspondant à la collecte de toutes les charges sur les électrodes. En augmentant la tension (zone (C)), à partir de la tension seuil V_{seuil} , le courant croît très rapidement. Cette tension est dite d'amorçage ou de décharge.

II.4.1.2. Modélisation de la décharge de Townsend [3] :

L'avalanche électronique peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance du coefficient α dit le premier coefficient d'ionisation de Townsend.

Ce coefficient représente le nombre d'électrons (ou ions positifs) créés par un électron par élément de longueur le long d'une ligne de force du champ appliqué .

A titre d'illustration considérant un système à champ uniforme : deux électrodes plane à une distance d l'une de l'autre contenant un gaz à la pression P avant le claquage (fig. II.5).

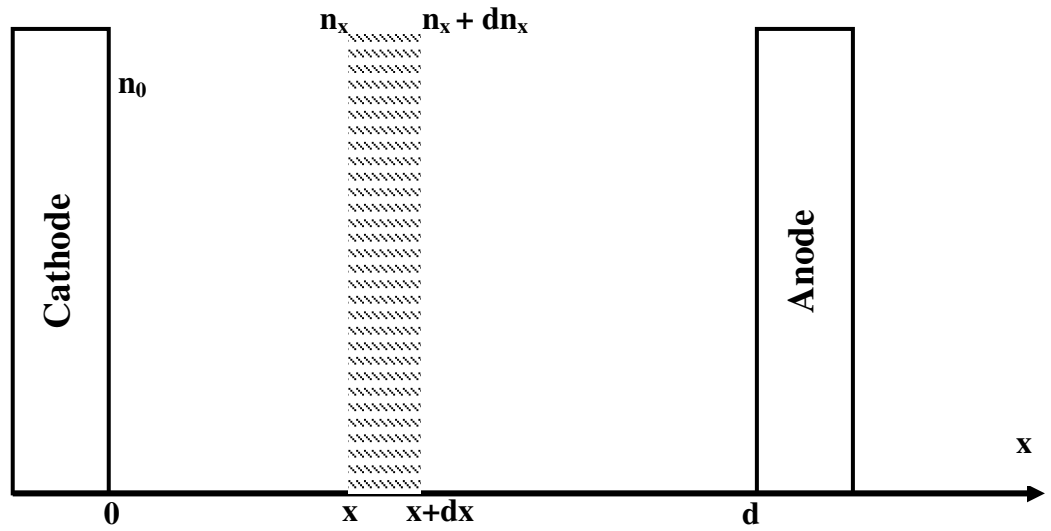


Fig. II. 5 : Modélisation de la décharge de Townsend .

Où :

n_0 : nombre d'électrons/seconde émis de la cathode

n_x : nombre d'électrons à l'abscisse x

dn_x : nombre d'électrons créés à l'abscisse x

Sur un élément de longueur dx , un électron crée $\alpha \cdot dx$ électrons, on écrit :

$$dn_x = \alpha dx \quad (\text{II.5})$$

Lorsqu'à une abscisse x , il existait n_x électrons, le nombre dn_x d'électrons créés sera multiplié par n_x .

L'équation (II.5) peut s'écrire

$$\frac{dn_x}{n_x} = \alpha dx \quad (\text{II.6})$$

L'intégration

$$\int \frac{dn_x}{n_x} = \int \alpha dx \Rightarrow \ln(n_x) = \int \alpha dx \quad (\text{II.7})$$

La répartition des électrons en fonction de l'abscisse x sera donnée par :

$$n_x = Ae^{\int \alpha dx} \quad (\text{II.8})$$

Dans le cas que nous traitons, le champ est uniforme donc constant dans l'intervalle inter-électrodes, de ce fait, le premier coefficient de Townsend est constant. L'équation (II.8) se simplifiera pour s'écrire :

$$n_x = A e^{\alpha x} \quad (\text{II.9})$$

En considérant la condition à $x=0$ (à la cathode) $n_x=n_0$, on aura $A=n_0$ et l'expression finale de la répartition devient :

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (\text{II.10})$$

Le nombre d'électrons à la distance d est :

$$n_d = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{II.11})$$

Le courant mesuré est donné par

$$I_d = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{II.12})$$

Où :

I_0 : est le courant photoélectrique initial à la cathode

Par conséquent, en moyenne chaque électron laissant la cathode produit : $\frac{n_d - n_0}{n_0}$

nouveaux électrons (et ions correspondant) dans l'espace inter électrodes .

Afin de mieux décrire la multiplication électronique dans la zone à faible champ, où l'attachement ne peut plus être négligé, on est amené à écrire :

$$n_x = n_0 e^{\int (\alpha - \eta) dx} \quad (\text{II.13})$$

Où :

η : est le coefficient d'attachement.

La multiplication électronique s'arrête lorsque l'attachement équilibre la formation des nouveaux électrons donc : $\alpha = \eta$.

Pendant que les électrons se déplacent sous l'action du champ électrique vers l'anode, les ions positifs se déplaceront vers la cathode. En se retrouvant sur la cathode,

ces ions positifs auront tendance à récupérer les électrons qui leur manquent en les arrachant à la cathode .

Le nombre d'ions positifs qui arrivent sur la cathode et qui proviennent du gaz est donné par :

$$n_{+0} = n_d - n_0 = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{II.14})$$

On définit un coefficient γ , dit deuxième coefficient d'ionisation de Townsend , γ représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par ion positif incident .

En exploitant cette dernière définition, le nombre d'électrons arrachés à la cathode sera :

$$n_{\text{arra}} = \gamma n_{+0} = \gamma n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{II.15})$$

Si le nombre d'électrons arrachés n_{arra} est inférieur à n_0 , l'avalanche s'arrêtera au bout de quelques cycles, Il y aura extinction. Par contre, si ce nombre n_{arra} est supérieur à n_0 , le nombre d'électrons augmentera continuellement et une décharge électrique s'établira. Le seuil est dit critère de Townsend de décharge autonome .

$$n_{\text{arra}} \geq n_0 \Rightarrow \gamma (e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (\text{II.16})$$

Le courant généré par la décharge de Townsend est donné par l'expression suivante :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{II.17})$$

On voit que si $\gamma (e^{\alpha d} - 1)$ s'approche de l'unité I croît d'une façon rapide que $I_0 e^{\alpha d}$.

Le critère de claquage selon Townsend est alors défini comme la tension pour la quelle le courant devient infini .

Le critère de Townsend peut s'interpréter simplement en considérant que $e^{\alpha d}$ représente le nombre d'ions positifs créés par une avalanche primaire à partir d'un seul électron.

Ces ions arrivant vers la cathode vont produire en moyenne $\gamma e^{\alpha d}$ électrons secondaires.

Si $\gamma e^{\alpha d} < 1$, la décharge est dite «non autonome», car elle ne peut se maintenir d'elle-même par le fait des mécanismes secondaires si l'apport d'électrons créés par une source extérieure est interrompu.

Si $\gamma e^{\alpha d} = 1$, le nombre d'ions créés par l'avalanche primaire est en moyenne juste suffisant à maintenir par bombardement de la cathode l'avalanche électronique. La décharge est autonome, c'est-à-dire qu'elle peut se maintenir en l'absence d'une source extérieure de production des décharges. Ce critère définit donc la tension d'amorçage.

Si $\gamma e^{\alpha d} > 1$, le processus des avalanches successives est cumulatif et le courant de décharge croît d'autant plus rapidement que $\gamma e^{\alpha d}$ dépasse l'unité.

II.4.2. Loi de Paschen :

La loi de Paschen décrit la tension de décharge qui varie avec la pression du gaz et la distance d entre les deux électrodes. La loi s'applique uniquement dans le cas d'un champ électrique uniforme entre les deux électrodes. Dans ce cas $E = V/d$.

- En utilisant le phénomène de décharge de Townsend on a l'équation (II.17) :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Il y a décharge lorsque le dénominateur tend vers 0. Cela implique que :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \Leftrightarrow e^{\alpha d} = \frac{1}{\gamma} + 1 \Leftrightarrow \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (\text{II.18})$$

On peut déterminer α de manière expérimentale pour obtenir :

$$\alpha = P.A.\exp\left(\frac{-BP}{E}\right) \quad (\text{II.19})$$

Où :

P : est la pression du gaz,

A et B sont des constantes connues.

En remplaçant la valeur de α dans (II.18) on obtient :

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = PdA \exp\left(\frac{-B.P}{E}\right) \Leftrightarrow \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(PdA) - \frac{BP}{E} \quad (\text{II.20})$$

Dans le cas d'un champ électrique uniforme $E = V/d$

Où

V est la tension appliquée.

Un tel potentiel signifie que les champs dûs aux électrons et ions sont petits comparés aux champs appliqués.

En substituant pour E on obtient :

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(PdA) - \frac{BPd}{V} \quad (\text{II.21})$$

En isolant V et en appelant V_d la tension de décharge et en considérant $\gamma = \gamma_j$ le coefficient d'ionisation secondaire de Townsend pour un métal j .

$$V_d = \frac{B.P.d}{\ln(P.d.A) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma_j} + 1\right)\right)} \quad (\text{II.22})$$

$$B = \frac{\sigma.V}{K.T}, \quad A = \frac{\ln 2.\sigma}{K.T}.$$

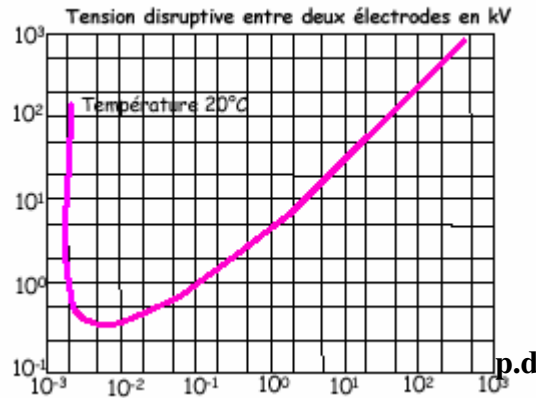


Fig. II. 6: Courbe de Paschen [3]

- Ces courbes montrent que V_s a un minimum unique, pour une valeur : $pd = (pd)_{\min}$. Si l'on augmente le produit pd , un électron accéléré par le champ électrique aura une probabilité plus grande de rencontrer une molécule du gaz, mais l'énergie moyenne acquise entre deux collisions étant plus faible, la probabilité d'obtenir une collision

ionisation diminue, à moins d'augmenter la tension. Si $(pd) < (pd)_{\min}$, la tension d'amorçage croît également par diminution du nombre de collisions.

II.5. Evolution de la décharge :

II.5.1. En champ uniforme[8],[4] :

Dans le cas d'un système à champ uniforme, tout l'intervalle inter-électrodes est soumis à la même intensité. Dans le cas où ce champ dépasse le champ d'ionisation du gaz contenu, ces sont toutes les molécules qui seront ionisées. De ce fait, la décharge est totale et se produit en une seule étape.

II.5.2. En champ non uniforme [8],[3] :

Pour ce type de système la répartition du champ électrique n'étant pas la même dans l'intervalle inter-électrodes. Le champ électrique dans cette région, peut dépasser le champ seuil d'ionisation des molécules de gaz, et être inférieur à ce seuil dans d'autres.

En augmentant la tension, la décharge évoluera en trois étapes distinctes :

-Effet couronne : Décharge très localisée du côté de l'électrode acérée, elle se manifeste par des petites luminosités bleuâtres, et des bourdonnements (fig. II.7)



Fig. II. 7 : *Manifestation de l'effet couronne*

-Aigrettes : la décharge occupe plus d'espace que lors de l'effet couronne. Dans ce cas, on observe de la luminosité qui démarre de la pointe acérée et qui se développe sur une certaine longueur (fig.II.8). Cette longueur dépend de la tension appliquée. Plus cette tension (ou champ) est grande plus la longueur est importante[8].

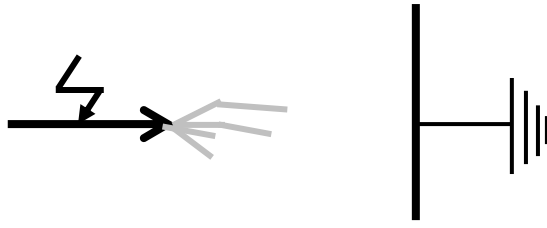


Fig. II. 8 : *Manifestation des aigrettes*

- **Décharge disruptive** : Au-delà de la tension de disruption, une décharge reliant les deux électrodes apparaît (fig.II.9). Il s'agit de l'ultime étape de détérioration.[4]

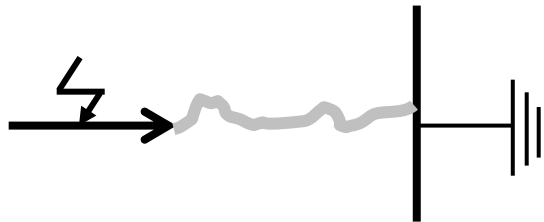


Fig. II.9 : *Manifestation de décharge [8],[4]*

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons représenté les phénomènes fondamentaux, et les lois généraux qui influent sur le mouvement des particules dans l'air, qui est considéré l'isolant le plus rigide ainsi que la physique de décharge électrique dans les gaz et les paramètres influant sur la décharge avec la représentation de la répartition du champ uniforme ou non .

Chapitre III

Protection contre le coup de Foudre

III.1. Introduction :

Dans Ce chapitre, étude d'informer et de sensibiliser Les utilisateurs d'une protection contre le de foudre en leur permettant démettre en application des principes simples et des méthodes appropriées .

III.2. Le principe de la protection :

Pendant la formation d'un orage, de grandes quantités de charges électriques de polarités opposées sont produites. Ces charges créent des différences de potentiel électrique très importantes qui, à partir d'un certain niveau, provoquent un arc électrique à l'intérieur des nuages ou entre les nuages et la terre. Un coup de foudre au sol permet la neutralisation des charges électriques au niveau du sol. Il est illusoire de vouloir s'opposer à cette circulation de courant, elle est nécessaire à la neutralisation des charges au sol à l'approche du nuage orageux [9] .

Bien que la durée d'un coup de foudre soit courte, son énergie est suffisante pour provoquer un incendie , déclencher une explosion ou tuer un homme ou un animal. Aussi, pour ne pas être frappé par la foudre plusieurs idées, parfois irréalistes, peuvent être avancées:

1. être capable de dévier les nuages orageux,
2. éviter la formation de charge au niveau du sol,
3. favoriser un lieu d'impact de foudre et canaliser le courant à l'extérieur de la zone à protéger.

L'observation du phénomène et le retour d'expérience ont permis de développer des dispositifs de protections qui reposent sur le principe de capter et canaliser la foudre plutôt que de vouloir s'y soustraire. Ainsi, tous les dispositifs de protection contre les coups de foudre sont conçus pour recevoir la foudre. Leur efficacité repose sur leur capacité à :

- attirer la foudre (lorsque le dispositif de protection est en un point précis),
- supporter les impacts (effets thermiques et mécaniques),
- canaliser la plus grande part possible d'énergie (limitation de la propagation du courant vers la zone protégée),
- diffuser le courant dans le sol (limitation de la propagation horizontale du courant au sol).

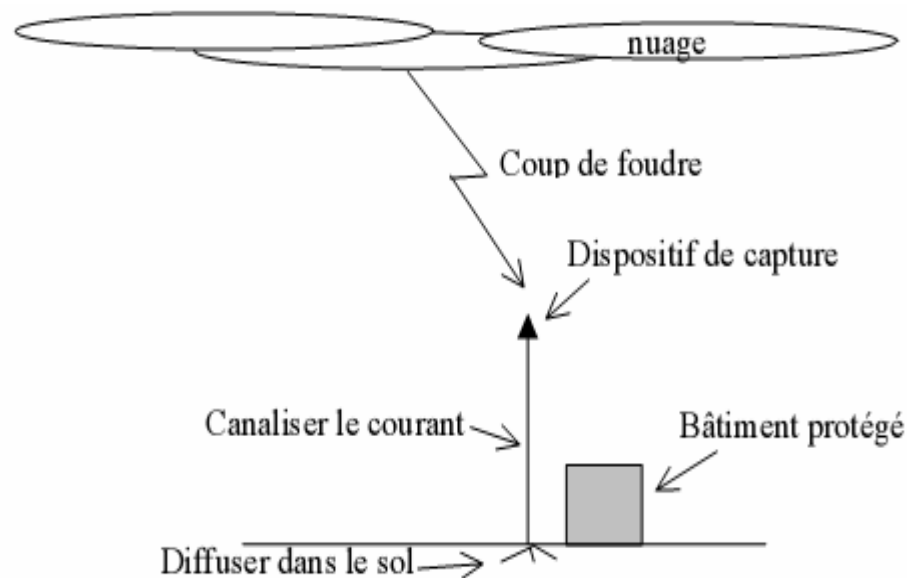


Fig. III.1 : *Principe d'une protection par paratonnerre*

III .3. Les moyens de protections :

Deux grands types de protection permettent de supprimer ou limiter les surtensions ; on les appelle IEPF (Installation Extérieure de Protection Foudre) ou protections primaires et IIPF (Installation Intérieure de Protection Foudre) ou protections secondaires [10].

III 3.1. Les protections primaires [9],[10] :

Leur but est de protéger les installations contre les coups de foudre directs. Ces protections permettent de capter et d'écouler le courant de foudre vers le sol. Le principe est basé sur une zone de protection déterminée par une structure plus haute que les autres. Il en est de même pour tout effet de pointe provoqué par un poteau, un bâtiment ou une structure métallique très haute. Il existe trois grands types de protection primaire

- le paratonnerre qui est la protection la plus ancienne et la plus connue,
- les fils tendus,
- la cage maillée ou cage de Faraday.

III.3.1.1. Paratonnerre :

➤ Le rôle des paratonnerres :

Il est connu depuis plusieurs siècles que la foudre frappe de préférence les endroits les plus hauts (les plus près des nuages). En particulier, des lieux d'impacts privilégiés sont les proéminences plus ou moins pointues. Cette prédisposition des objets effilés à être frappés par la foudre s'explique par l'effet de pointe appelé aussi effet Corona.

Le modèle électrogéométrique a été imaginé à partir de l'observation du cheminement des traceurs des coups de foudre descendants. Il a été inventé pour :

- tenter d'expliquer pourquoi la foudre frappe l'objet le plus haut .
- évaluer la zone autour de l'objet dans laquelle le coup de foudre ne devrait pas tomber.

Ce modèle repose sur l'utilisation d'une sphère fictive (Fig. III. 2) .

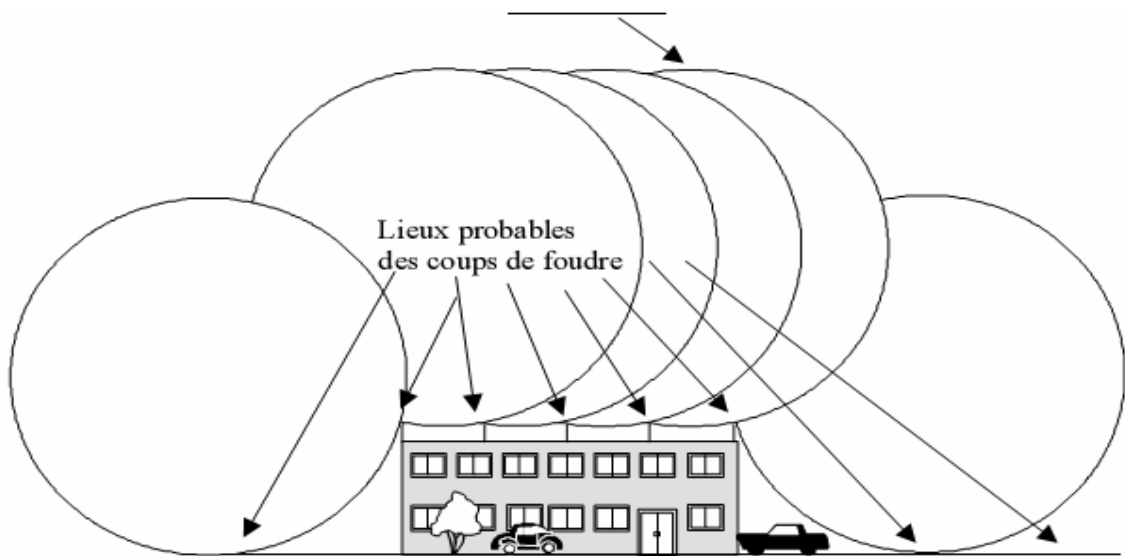


Fig. III. 2 : *Utilisation de la méthode de la sphère fictive*

Représentons, sur un plan du bâtiment en élévation, une sphère dont le rayon croît avec le courant de foudre considéré. Cette sphère est roulée sur le sol. On considère que les lieux d'attachement préférentiels de la foudre sont les points où la sphère fictive est en contact avec le sol .

La méthode de la sphère fictive permet de définir la position des dispositifs de capture de la foudre.

Le rayon de la sphère fictive est lié au courant du coup de foudre par la relation $R=10 \cdot I^{2/3}$, définie par le modèle électrogéométrique .

➤ **Type de protection par paratonnerre :**

A) Protection par paratonnerre à tige simple [7] :

Les paratonnerres à tige simple (appelé parfois tige de Franklin) ont une hauteur pratique de 2 à 6 mètres et présentent une pointe effilée. Elles peuvent être constituée d'un ou plusieurs éléments de même nature , à condition que leur continuité électrique soit assurée (NF C 17-100).

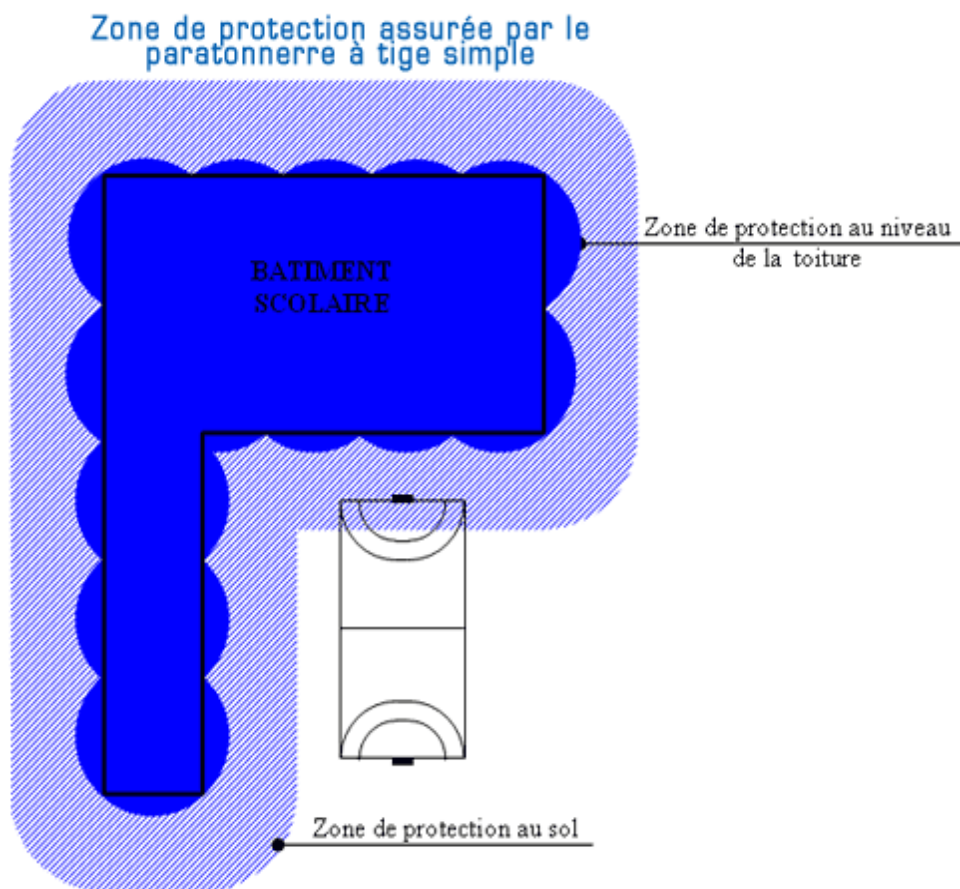
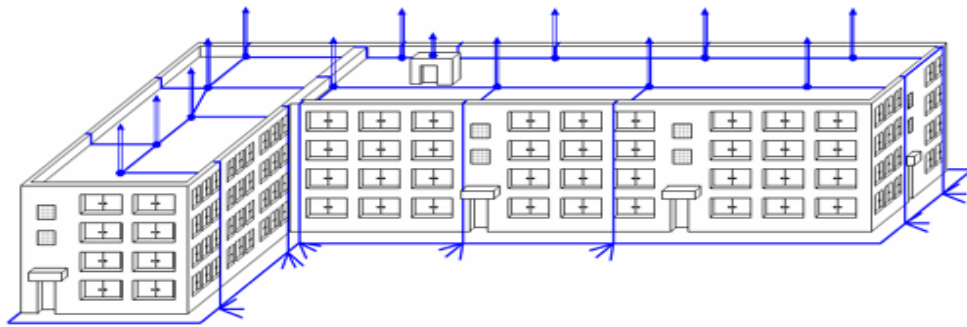


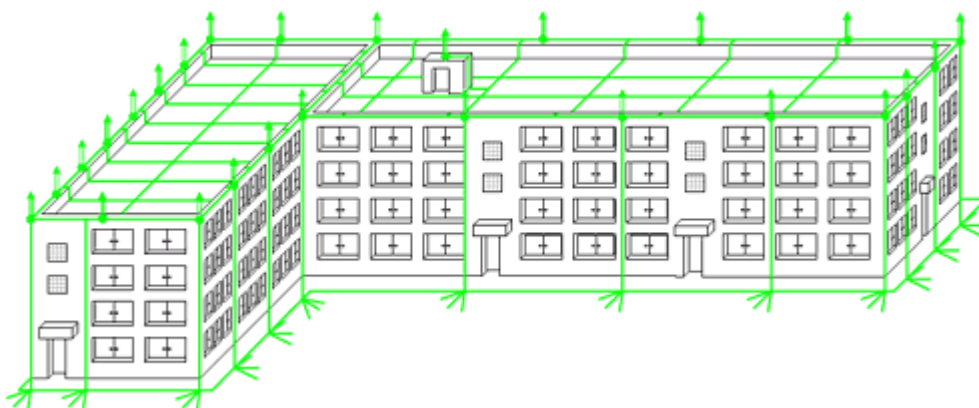
Fig. III. 3 : Schéma de principe paratonnerre à tige simple

B) Protection par paratonnerre à cage maillée :

Pointes caprices de 50cm implantées en périphérie de la toiture tous les 15 mètres et sur la cage d'ascenseur.

Maillage en toiture au pas de 10 mètres.

En façade, descentes tous les 15 mètres, reliées en partie basse à un ensemble de prises de terre spécifique.



Zone de protection assurée par le
paratonnerre à cage maillée

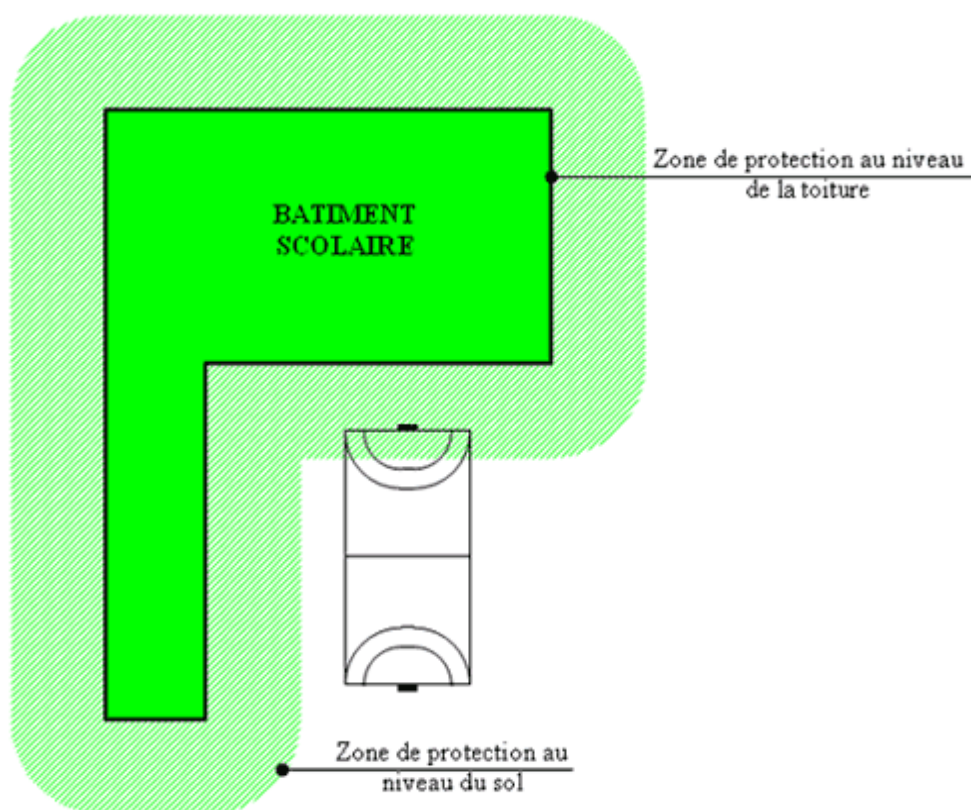
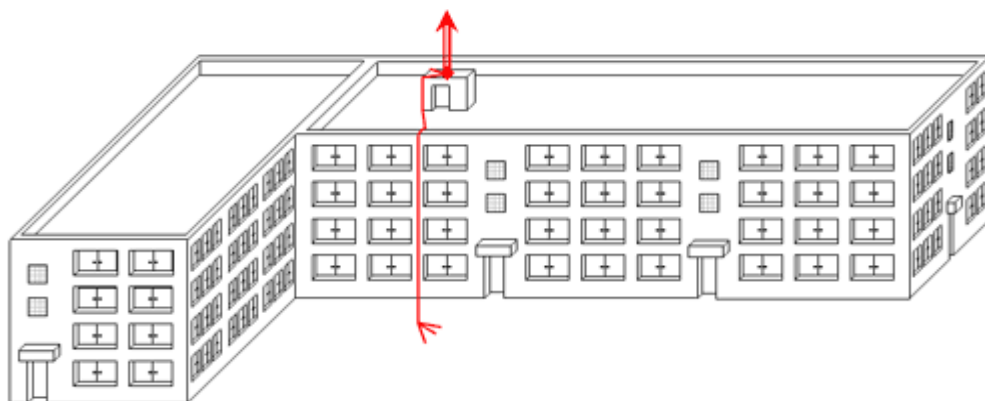


Fig. III. 4: Schéma de principe paratonnerre à cage maillée

C) Protection par paratonnerre à dispositif d'amorçage :

Paratonnerre à tige simple, où celle-ci est équipée d'un système électrique ou électronique générant une avance à l'amorçage (avance au démarrage de la pré décharge ascendante), mise en évidence lorsqu'il est comparé dans les mêmes conditions à un paratonnerre à tige simple. La méthode de calcul des rayons de protection d'un PDA .



Zone de protection assurée par le
paratonnerre à dispositif d'amorçage

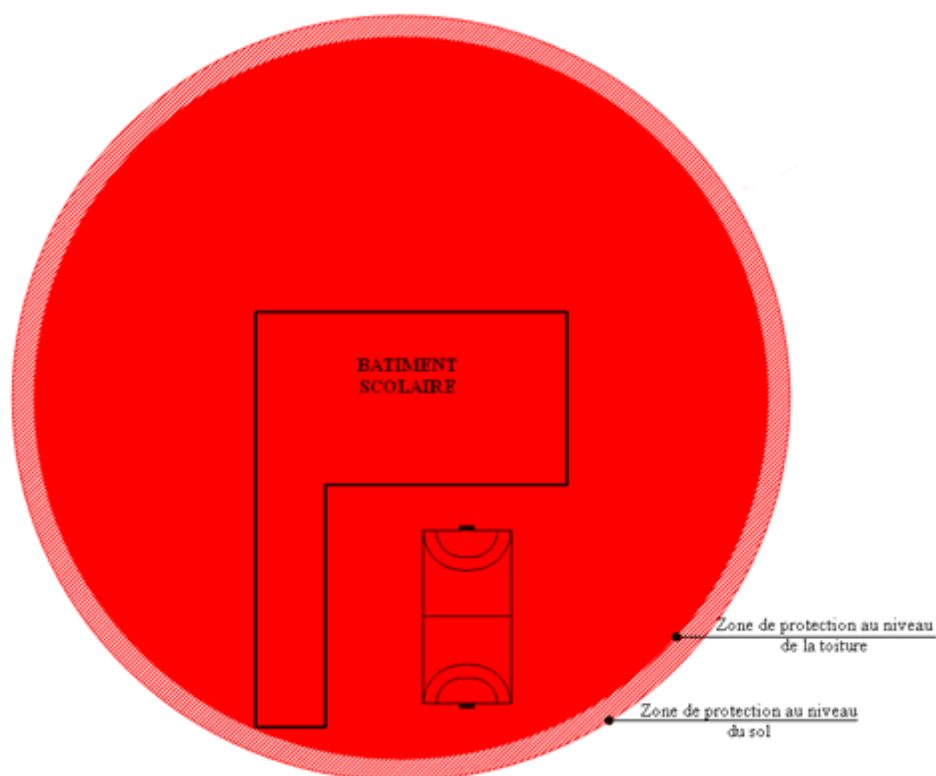


Fig. III. 5: Schéma de principe de paratonnerre à dispositif d'amorçage

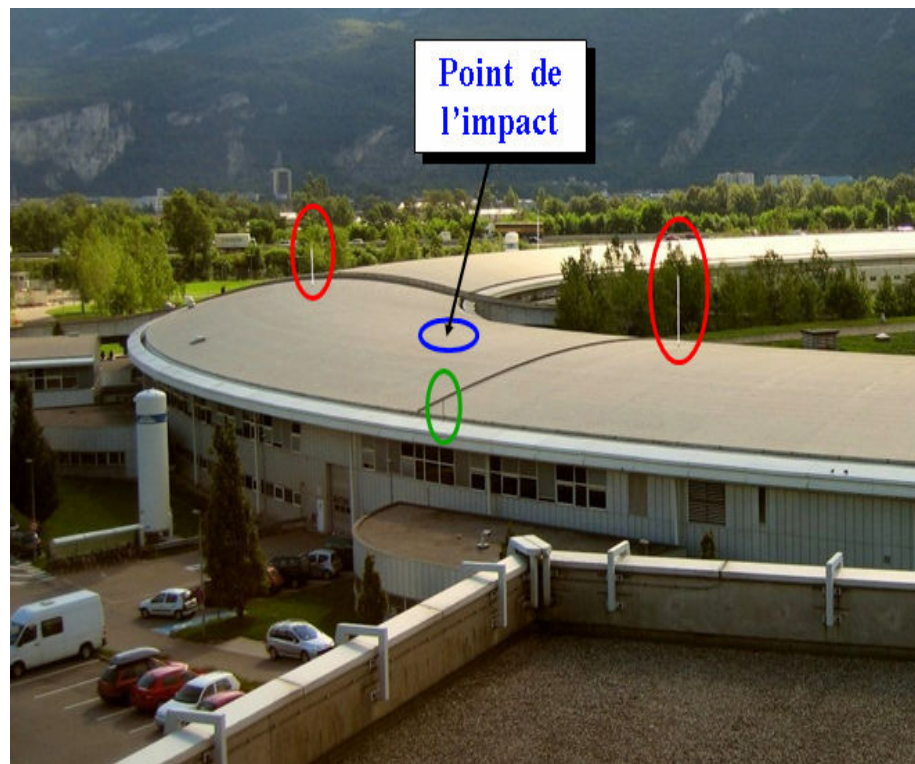


Fig. III. 6: Schéma de point de l' impact et pose le paratonnerre[11]

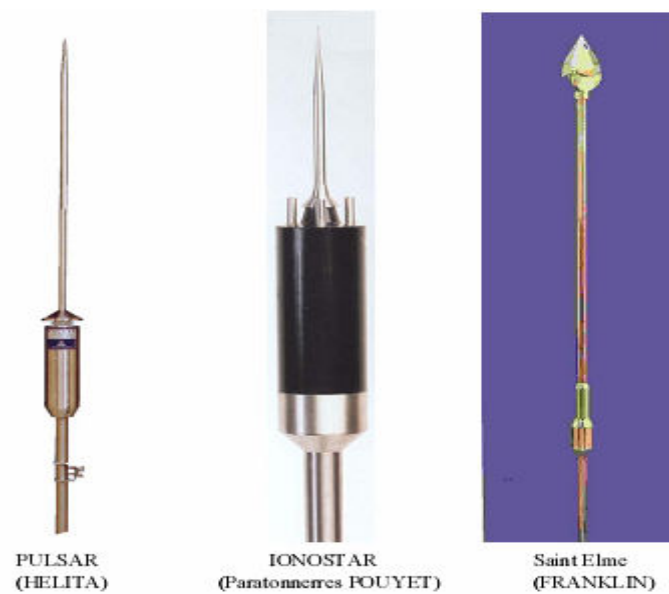


Fig. III. 7: types de paratonnerre à dispositif d'amorçage[11]

III.3.1.2. Les fils tendus (câble de garde) [6] :

Ce sont des câbles tendus au-dessus de l'ouvrage à protéger. Ils sont employés pour des ouvrages spéciaux : pas de tir de fusées, applications militaires et surtout câbles de garde au-dessus des lignes haute tension (Fig. III.8) .

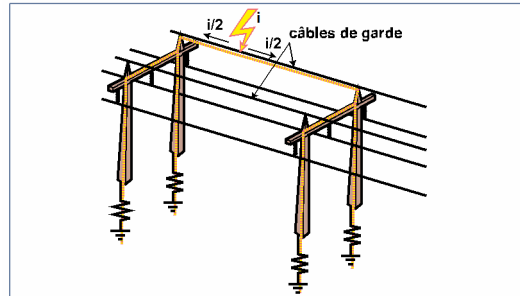


Fig. III. 8 : Les câbles de garde [10].

Cette protection s'applique en haute tension. Son objectif est d'assurer que le niveau d'isolement au choc ou BIL (Basic Impulse Level) des différents éléments du poste ne soit pas dépassé (coordination des isolements). Son principe est de créer un circuit de dérivation à la terre, permettant ainsi l'écoulement du courant de foudre, par amorçage ou conduction. Deux types d'appareils sont utilisés pour limiter la tension : l'éclateur, plus ancien, et le parafoudre qui tend à le supplanter dans de nombreuses applications [6].

L'éclateur, grande dispersion de sa tension d'amorçage (jusqu'à 40%), un retard à l'amorçage qui fonctionne par amorçage, présente des handicaps importants :

Une assez fonction de surtension, un amorçage sensible aux influences externes, conditions atmosphériques par exemple, il crée un front d'onde coupée très raide pouvant détruire les enroulements de machines situées à proximité, il crée aussi un courant de suite à 50Hz, le courant ainsi dérivé est vu par l'appareil de protection contre les défauts terre qui commande alors l'ouverture en amont de la ligne touchée [6]

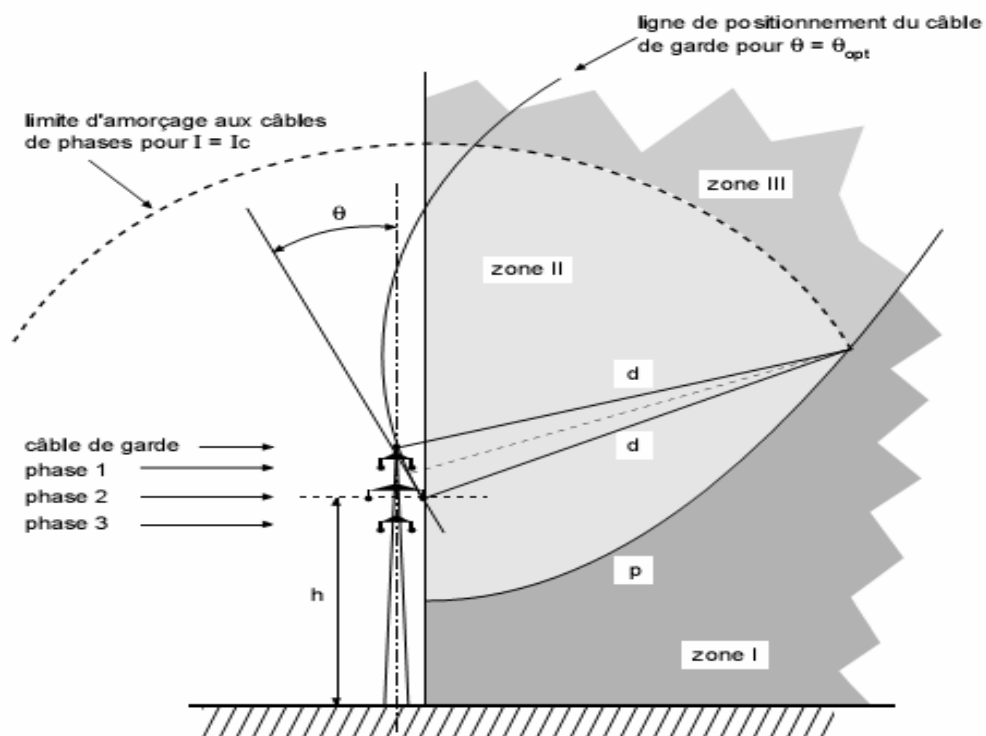


Fig. III. 9: les différents cas d'amorçage d'une ligne aérienne [6]

III.3.2. Les protections secondaires :

La protection des récepteurs électriques contre les surtensions d'origine atmosphérique la plus communément employée est la protection par parafoudre.

III.3.2.1. Parafoudre :

Le parafoudre est généralement placé entre un conducteur et la terre, et parfois, entre conducteurs actifs. Les deux cas sont représentés en (Fig. III.10). Sous une tension normale, le parafoudre se comporte pratiquement comme une résistance infinie et le courant qui le traverse est nul ou négligeable (courant de fuite). Par contre, à l'apparition d'une surtension, dès que la tension aux bornes du parafoudre dépasse une certaine limite, le parafoudre devient conducteur, laissant s'écouler un courant, ce qui limite la tension à ses bornes et protège ainsi l'installation et les récepteurs. Pour chaque cas d'utilisation, le parafoudre est choisi principalement en fonction des paramètres suivants [10] :

- la surtension admissible par les appareils à protéger,
- l'intensité du courant que le parafoudre devra supporter pendant la durée de la surtension.

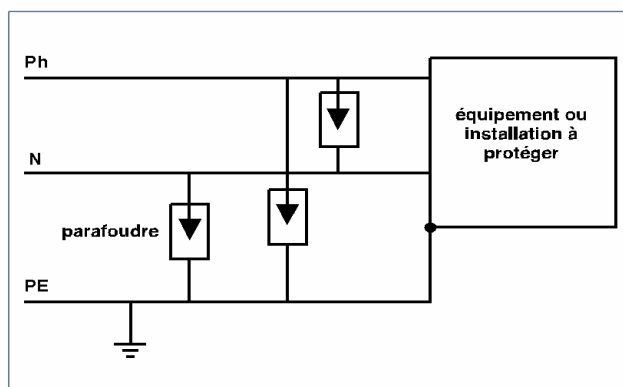


Fig. III. 10: Utilisation des parafoudres [10].

- Dispositif de protection contre perturbations d'origine atmosphérique et de manœuvre .
- Rôle : limiter des surtensions transitoires d'origine « foudre » et industrielles à un niveau acceptable .

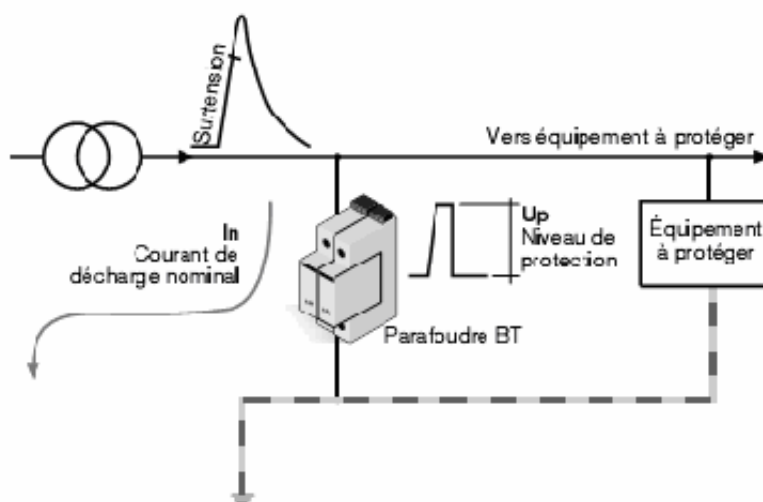


Fig. III. 11: fonctionnement d'un parafoudre

III.3.2.2 .Technologie des parafoudres :

Afin de répondre efficacement aux contraintes imposées par ces différents réseaux, plusieurs technologies de parafoudres sont disponibles. Ainsi, les parafoudres peuvent comporter différents composants internes:

- les éclateurs
- les varistances
- les diodes d'écrtage.

Ces composants ont pour but de limiter rapidement les tensions apparaissant à leurs bornes : cette fonction est obtenue par modification brutale de leur impédance à un seuil de tension déterminé.

A) Deux comportements sont possibles :

amorçage: le composant passe de l'état de très haute impédance au quasi court-circuit c'est le cas des éclateurs .

écrêtage : après un seuil de tension déterminé, le composant, passant en faible impédance, limite la tension à ses bornes : varistances et diodes d'écrtage.

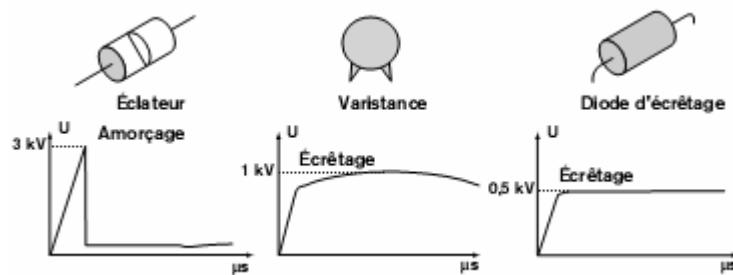
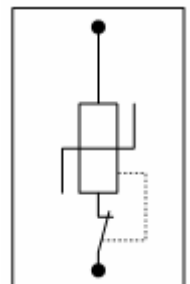


Fig. III. 12: *fonctionnement des composants <parafoudre>*

D) Principales technologies :

- **Varistance à déconnecter thermique**

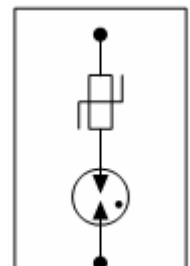
Varistance équipée d'un dispositif auxiliaire destiné à déconnecter le composant du réseau en cas d'échauffement excessif: ce comportement est indispensable pour garantir une fin de vie contrôlée des varistances raccordées sur le réseau électrique.



- **Éclateur iveristance**

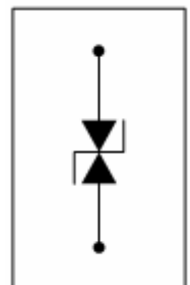
Association en série de composants, conçue pour bénéficier des avantages des deux technologies:

pas de courant de fuite et faible U_p (éclateur) et pas de courant de suite (varistance).



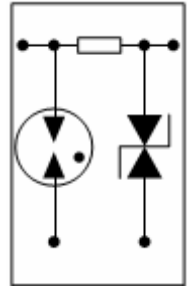
- **Diode d'écrtage**

Diode de type Zener (limitation de tension) dotée d'une structure particulière pour optimiser son comportement en écrtage sur des surtensions transitoires. Ce composant est caractérisé par un temps de réponse particulièrement rapide.



- **Éclateur /Diode d'écrtage**

Association en parallèle d'éclateur(s) à gaz et de diode(s) d'écrtage ; ce qui permet de bénéficier de la capacité d'écoulement de l'éclateur et du temps de réponse rapide de la diode. Une telle association nécessite un élément de découplage en série afin que la coordination de fonctionnement des composants de protection soit assurée.



III.3.2.3. Principales caractéristiques des parafoudres :

➤ Caractéristiques d'un parafoudre

Un parafoudre est conçu en fonction de :

- La configuration de l'installation, (capacité à dissiper l'énergie).
- La tenue aux chocs du système à protéger, (capacité à écrtier la surtension).

Il existe des parafoudres dédiés aux courants forts (Énergie) et d'autres destinés aux courants faibles (Mesure, Commande, Régulation, Télécommunication, etc) et répondent à une application toujours bien définie.

Le parafoudre se caractérise par sa tension admissible U_c , son pouvoir de décharge I_{max} et I_n , ainsi que son niveau de protection U_p .

U_c :Tension maximale à 50Hz que peut supporter le parafoudre en permanence. En régime TT (ou TN) cette valeur doit être supérieure ou égale à 1,45 .

I_{max} : Courant de décharge maximal que peut écouler le parafoudre une seule fois sans dommage. Cette valeur est mesurée à partir de l'onde d'essai 8/20 μ s.

I_n : Courant de décharge nominal que peut écouler le parafoudre 20 fois. Cette valeur est mesurée à partir de l'onde d'essai 8/20 μ s.

U_p : Niveau de protection du parafoudre, cette valeur doit être inférieure ou égale à la tension de tenue de choc U_{tc} du matériel électrique à protéger.

I_{imp} : Courant de choc impulsional que peut écouler le parafoudre une seule fois sans dommage. Cette valeur est mesurée à partir de l'onde d'essai 10/350 μ s.

➤ Protection du parafoudre

La norme NFC 15-100, rend obligatoire les parafoudres dans les installations équipées des paratonnerres.

La durée de vie du parafoudre dépend du nombre de sollicitations. Selon la norme NFC 15-100, la fin de vie du parafoudre ne doit pas entraîner un court-circuit entre neutre et terre.

Cela implique l'usage d'un dispositif de protection en amont du parafoudre, soit en série dans le circuit à protéger (continuité de protection assurée, continuité de service non assurée), soit dans la branche de dérivation du parafoudre (continuité de service assurée, continuité de protection non assurée).

III.4. Conclusion :

la protection contre la foudre ne peut garantir une efficacité à 100% quelque soit le système de protection utilisé : cage maillée, pointe simple, PDA, ... Cependant, dans le cas du PDA, correctement dimensionné et installé conformément aux normes, le retour d'expérience montre que la probabilité d'un impact non capté reste très faible et ses conséquences toujours minimales puisque liées à des coups de foudre de moindre intensité .

Conclusion Générale

Conclusion générale

La protection contre la foudre consiste à prendre en compte tous les dispositifs mis en jeu depuis le dispositif de capture jusqu'à ses extrémités les plus lointaines : prises de terre ou barre d'équipotentialité par exemple. Il faut prévoir, autant que faire se peut, à l'origine de la conception de l'installation, l'emplacement des conducteurs de descente, naturels ou non, et aussi les prises de terre et leurs interconnexions, entre elles et avec le réseau électrique ou de télécommunications. C'est pourquoi il est préférable de parler de système de protection contre la foudre qui est plus général

que le terme usuel de paratonnerre .

Le courant de foudre est un courant électrique comme les autres, qui circule suivant les lois ordinaires de l'électrotechnique, dont on peut prévoir le comportement dans la mesure où la configuration du système se prête au calcul et que l'on peut étudier à tension réduite au moyen de générateurs de choc .

Nous pensons que tous les moyens pratiques de protection contre le coup de foudre se ramènent à un seul : offrir au courant un chemin conducteur aussi direct que possible et y interconnecter tous les éléments métalliques voisins. La foudre est un personnage important auquel on ne résiste pas sans danger, mais qui se laisse diriger assez facilement quand on se plie à ses désirs. Elle dispose de millions de volts pour briser les obstacles isolants, mais s'écoule inaperçue dans des conducteurs de petit diamètre. Si elle a la curiosité, au cours de sa descente, d'explorer des masses ou des conducteurs métalliques voisins où elle pense , à tort ou à raison , trouver un exutoire

plus facile, il vaut mieux l'y aider par des interconnexions appropriées que lui opposer des obstacles qui risquent généralement de présenter un point faible .

- L'idée essentielle de tout système de protection doit être de lui éviter les occasions de mettre ce moyen en œuvre .

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Rahim Zineb , Gatt Sihem , « Calcul du champ magnétique généré par un coup de foudre » , Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état En Électrotechnique , Université Mohamed kheider - Biskra - Juin 2008 .
- [2] CHRISTIAN BOUQUEGNEAU , « Doit-on craindre la foudre? » , EDP Sciences 2006 , Imprimé en France .
- [3] Ahmed BOUBAKEUR ,« Détermination de la zone d'attraction d'un paratonnerre (TP de HT) » , Ecole Nationale Polytechnique , Laboratoire de Haute Tension , Avenue Pasteur , Hacén Badi , B.P.182 , El-Harrach , Alger .
- [4] Lassoued Issa , Slimani soufiane , « l'étude de la foudre » , Mémoire de fin d'Etude en vue de l'Obtention du Diplôme de Ingénieur D'Etat en Electrotechnique , Université Mohamed kheider - Biskra - juin 2006 .
- [5] Christophe SÉRAUDIE , «surtensions et parafoudres en BT-coordination de l'isolement en BT- » , Cahier Technique Merlin Gerin n° 179 , septembre 1995 , Valence DTE - 09-95 - 3500 - Imprimeur: CLERC .
- [6] Benoît de Metz-Noblat , « la foudre et les installations électriques HT » , Technique Merlin Gerin , juillet 1993 , Illustration Technique Lyon - DTE- 07/93 - 3500 - Imprimeur : Léostic .
- [7] Alain ROUSSEAU , Claude GARY , Gérard BERGER , «Foudre et protection des bâtiments » , Techniques de l'Ingénieur , Centre franais .
- [8] P. GRUET , «Etude des Paratonnerres à dispositif d'amorçage » , Laboratoire d'Evaluation des Equipements Electriques Direction de la Certification , octobre 2001.
- [9] M.GUENFOUD , D.MIDA , « influence de la largeur des écran isolants sur l'amorçage des intervalles d'air "pointe – plant" » , Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur département génie électrique , école nationale polytechnique , JUIN .1996 .
- [10] « La protection des installations électriques contre la foudre » . Schneider

Electric. ART 62974 , Novembre 2000 .

[11] Alain CHAROY , « Les PDA (paratonnerres à dispositif d'amorçage) et leur normalisation » , Forum de l'électronique 2006 , PARIS .