

LA Foudre

Phénomène de décharge électrique et Protection primaire

A.Boubakeur

Ecole Nationale Polytechnique, Dpt d'Electrotechnique – Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

1. RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR

1.1 INTRODUCTION

L'air est l'isolant le plus utilisé en Technique de la Haute Tension (lignes et postes).

En l'absence de champ électrique, les molécules de gaz sont soumises à l'agitation thermique, et subissent une multitude de chocs. Ces chocs peuvent être élastiques, sans transfert d'énergie de la particule bombardant vers la particule bombardée, ou parfois non-élastiques, avec transfert total ou partiel d'énergie. Ces chocs ont pour cause des agents extérieurs tels que la radioactivité terrestre et atmosphérique, ainsi que les différents rayonnements cosmiques. En présence d'un champ électrique, les molécules de gaz se mettent en mouvement dans la direction du champ. Leur vitesse variera en fonction de la distribution et de l'intensité du champ, ainsi que d'autres paramètres tels que la pression, la température et l'humidité du gaz. Les mécanismes de décharge disruptive dans l'air sont principalement: -le mécanisme de Townsend et -le mécanisme des canaux (streamers).

1.2 MECANISME DE TOWNSEND:

Ce mécanisme concerne les intervalles d'air à champ uniforme dans le cas des faibles produits "p.a" où "p" est la pression du gaz et "a" la distance entre électrodes. Dans ce cas la disruption est établie lorsque le critère dit de décharge autonome de Townsend (ou critère de Townsend) est rempli.

Critère de Townsend

Townsend définit deux coefficients, l'un concernant l'ionisation par choc dans l'air et l'autre l'ionisation superficielle caractérisée par une émission d'électrons à la cathode, après le bombardement de cette dernière par des ions positifs en particulier.

Le premier coefficient de Townsend (α) représente le nombre d'électrons libres par unité de longueur dans la direction du champ engendrés par l'ionisation par choc.

Le second coefficient de Townsend (γ) représente le rapport du nombre d'électrons libérés de la cathode par émission secondaire sur le nombre d'ions positifs ayant bombardés la cathode.

Dans le mécanisme de Townsend, la décharge disruptive a lieu dès la formation d'avalanches électroniques provoquées par les électrons quittant la cathode. Le critère de décharge autonome de Townsend s'écrit comme suit:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha a} - 1) = 1$$

Lorsque le produit p.a est inférieur à la valeur limite de 1000 torrs.cm, la variation de la tension disruptive U_d en fonction du produit p.a est définie par la loi de Paschen. D'après cette loi la tension disruptive passe par une valeur minimale, qui est d'environ 350V pour l'air, 275V pour l'azote, 450V pour l'oxygène, dans le cas d'une cathode en fer, et 295V pour l'Hydrogène avec une cathode en platine.

1.3 MECANISME DES CANAUX:

Ce mécanisme décrit le phénomène de décharge disruptive, aussi bien en champ uniforme dans le cas des grands produits "p.a", qu'en champ non-uniforme. Dans ce cas la décharge disruptive est précédée par la formation d'un canal de plasma.

Pour les petits intervalles d'air, le canal prend naissance au voisinage de l'anode sous l'effet de la forte concentration de charges d'espace positives. Ces dernières attirent les électrons libres allant vers l'anode et accroissent leur vitesse de telle sorte qu'ils arrivent à engendrer des avalanches secondaires provoquant la formation du canal de plasma.

Pour des intervalles d'air relativement longs (en champ relativement uniforme), le canal de plasma peut aussi prendre naissance au voisinage de la cathode. Dans ce cas les électrons en tête de l'avalanche principale, peuvent sous l'effet du champ électrique, engendrer des avalanches secondaires, donnant naissance à un canal de plasma au voisinage de la cathode. Ce dernier rejoint la cathode, puis se déplace vers l'anode. Ainsi pour les grands produits "p.a", la décharge disruptive est précédée de phénomènes de pré-décharge: effet de couronne, effluves, aigrettes...

En champ non-uniforme, les phénomènes de décharge apparaissent initialement au niveau de l'électrode de plus faible rayon de courbure. Nous observons d'abord l'effet de couronne, suivi des aigrettes, puis finalement la décharge disruptive. La nature du canal de plasma dépend de la polarité de l'électrode où il prend naissance. Ainsi au niveau d'une pointe positive nous observons un canal anodique et au voisinage d'une pointe négative, un canal cathodique.

En tension alternative la nature des décharges variera avec la variation de la polarité des électrodes.

2. Foudre ET PROTECTION CONTRE LA Foudre

2.1 Foudre

La foudre est un phénomène naturel, de décharge électrique apparaissant en temps orageux. La décharge électrique peut avoir lieu à l'intérieur du nuage (cumulo-nimbus), entre deux nuages ou entre le nuage et la terre. Le dernier cas est celui qui nous intéresse le plus en technique de la haute tension. Les décharges de foudre sont dans ce cas, classées en quatre types selon le sens de développement du traceur par bonds (stepped leader) et la polarité de la charge de la base du nuage.

Dans 80% des cas la décharge est du type "descendante négative". Cette décharge est constituée d'un traceur par bonds, d'une

décharge principale (return stroke) et de plusieurs décharges secondaires.

Le traceur a pour rôle de tracer un chemin conducteur qui sera suivi par la décharge principale. Au moment du dernier saut du traceur (saut final - final jump), la position de la tête du traceur est appelée point critique. La distance entre ce point et la terre correspond à la distance d'amorçage. Cette distance dépend surtout de la charge cumulée dans le nuage. Plus cette charge est importante, plus le courant de foudre est important et plus la distance d'amorçage est grande.

Lorsque le traceur par bond progresse vers la terre, sa direction est purement aléatoire. Par contre au moment du saut final, le point d'impact au sol serait le point où le champ électrique aurait dépassé la valeur critique à partir de laquelle, des décharges ascendantes quitteraient la terre se dirigeant vers le traceur descendant. Pour une région donnée de la terre, correspondra un certain niveau kéraunique (nombre de jour d'orages par année) et une densité de coups de foudre au sol.

2.2 PROTECTION CONTRE LA Foudre

La protection contre la foudre, consiste à concevoir les moyens permettant une protection des hommes et des installations, avec le minimum de risque, contre les coups de foudre (foudroiement). La meilleure protection (idéale) est assurée par la cage (pleine) de Faraday ($E=0$). Les dispositifs de protection sont appelés "paratonnerres". Ces paratonnerres peuvent être des tiges verticales (tige de Franklin), des conducteurs horizontaux, ou, la combinaison des deux (paratonnerres à cage).

Pour chaque type de paratonnerre, nous définissons une zone de capture, ainsi qu'une zone de protection. Dans le cas d'une terre homogène et parfaitement conductrice, la zone de capture d'un paratonnerre, est définie selon le modèle électro-géométrique, par l'ensemble des points équidistants de la terre et du mât du paratonnerre. La zone de protection sera définie en fonction de la hauteur du paratonnerre et de la distance d'amorçage.

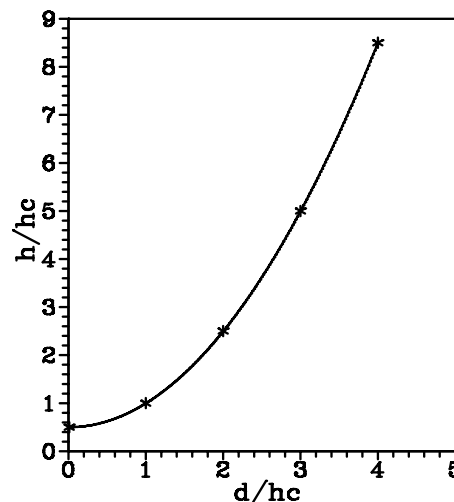
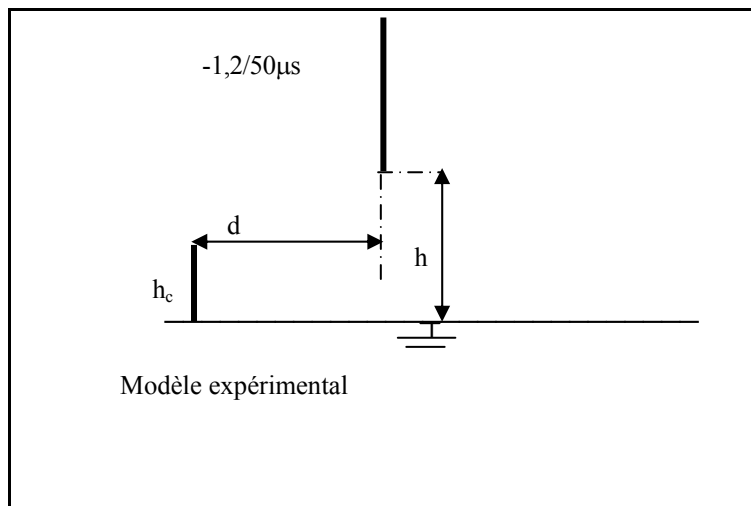
Dans le cas où la terre n'est pas parfaitement conductrice ou est hétérogène, le modèle électro-géométrique, est à compléter.

2.3 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL

Afin de vérifier un modèle de protection contre la foudre, on a fréquemment recours à des arrangements de laboratoire permettant une simulation pratique des systèmes à protéger.

La décharge préliminaire de foudre (traceur par bonds), juste avant le saut final, est simulée par une tige conductrice en cuivre, mise sous une haute tension du type choc de foudre négatif $-1,2/50 \mu s$.

Pour chaque essai, le niveau de tension appliqué doit engendrer une décharge disruptive certaine dans le système sans paratonnerre ($U_{100\%}$). Ce niveau dépendant de la hauteur h de l'électrode de haute tension, est appliqué 50 fois pour chaque configuration " h, h_c, d ", d étant la distance entre le paratonnerre et l'axe de la tige, et h_c la hauteur du paratonnerre (figure 1). La zone d'attraction est définie par les configurations pour lesquelles la probabilité de décharge au paratonnerre commence à être égale à 100%.



Zone d'attraction d'un paratonnerre (modèle électro-géométrique)

Conformément au modèle électro-géométrique, la zone d'attraction d'un paratonnerre est limitée, dans un plan perpendiculaire à la terre, par la parabole définie par l'ensemble des points équidistants de la terre et du mât du paratonnerre (Figure 2):

et avec: $X=d/h_c$ et $Y=h/h_c$ nous obtenons: $X^2 - 2Y + 1 = 0$

Pour déterminer expérimentalement cette parabole, on cherche, pour h et h_c données, la plus grande distance d pour laquelle la probabilité de décharge au paratonnerre est égale à 100%.

On applique 50 chocs négatifs à la tige de haute tension et on compte le nombre de décharges au paratonnerre. Ce nombre divisé par 50 représente la fréquence de foudroiement du paratonnerre. On reporte ensuite les fréquences pour différentes configurations " h, h_c, d " sur une échelle gaussio-arithmétique et on trace la droite de régression avec en abscisse le rapport d/h_c . On en tire les valeurs de d/h_c correspondant à une fréquence pratiquement égale à 100% (99,9 ou plus sur l'échelle).