

III. Claquage en champ non uniforme

En champ non uniforme (par exemple dans le système pointe (positive) –plan), le coefficient d’ionisation efficace $\bar{\alpha}$ varie le long de l’intervalle inter- électrodes, sachant que :

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \tag{3.1}$$

α : le premier coefficient d’ionisation de Townsend.

η : le coefficient d’attachement.

La multiplication électronique est gouvernée par l’intégral ($\int \bar{\alpha} dx$). Pour les pressions élevées et en champs non- uniforme, le critère du Townsend (décharge autonome) prend la forme:

$$\gamma \left(\exp \left(\int_0^d \bar{\alpha} dx \right) - 1 \right) = 1 \tag{3.2}$$

$\bar{\alpha}$: Le coefficient d’ionisation efficace

γ : Le deuxième coefficient d’ionisation de Townsend

d : la longueur de l’intervalle

L’intégrale est en général calculée le long de la ligne de champ la plus intense (figure 3.1),

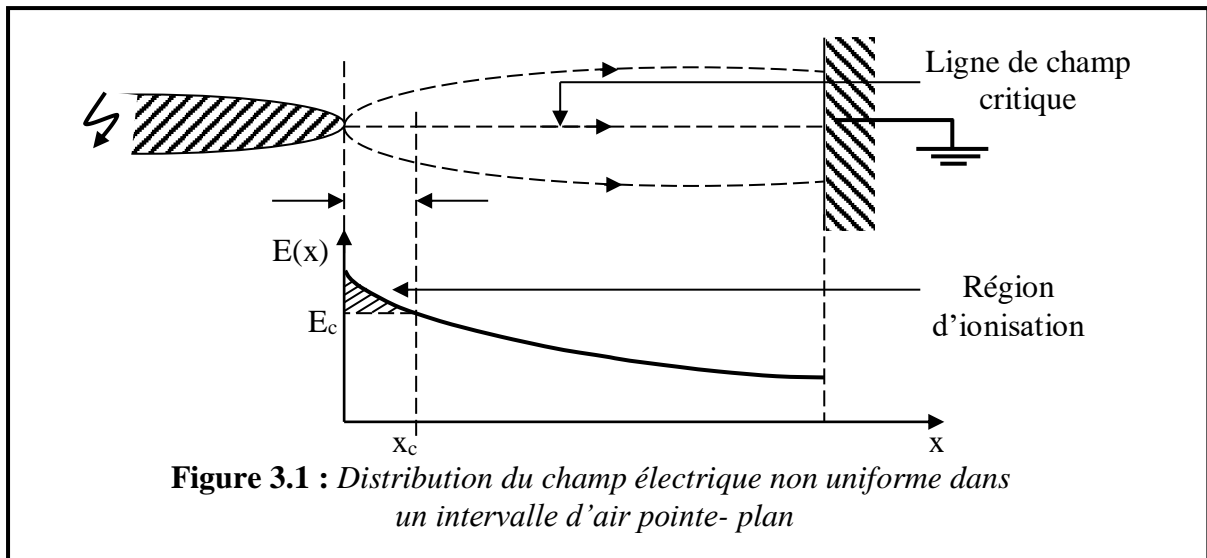


Figure 3.1 : Distribution du champ électrique non uniforme dans un intervalle d’air pointe- plan

Quand le champ atteint une valeur critique minimale E_c , l’intégrale $\int \bar{\alpha} dx$ cesse d’exister, et le mécanisme de Townsend perd sa validité. Par conséquent le phénomène d’ionisation n’apparaît que dans la région de l’espace inter -électrodes qui vérifie la condition $\bar{\alpha} > 0$.

La condition de claquage peut être donnée en modifiant l’expression (1.34) et en prenant en compte la non -uniformité de la distribution de $\bar{\alpha}$ comme suit :

$$N_{cr} = \exp \left(\int_0^{x_c} \bar{\alpha} dx \right) \tag{3.3}$$

N_{cr} : est la concentration de la charge critique dans l'avalanche donnant un niveau d'ionisation permettant la propagation du streamer (approximativement 10^8-10^{10}), x_c est la distance critique de l'avalanche. Alors l'équation (3.3) devient:

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha} dx \geq k \tag{3.4}$$

x_c : est la longueur de l'avalanche à partir de la pointe HT.

Le coté gauche de cette équation stipule que l'ionisation efficace a lieu dans la région du champ où $0 \leq x \leq x_c$ avec la condition $\bar{\alpha} > 0$. Pour le coté droit, k est le nombre qui tient compte de toutes sortes de processus de retour ($k=18-20$).

III.1 Décharges couronnes

Les décharges couronnes sont caractéristiques des champs fortement non uniformes et ont de faibles intensités. Du fait d'une forme et d'une taille particulière des électrodes, le champ électrique est beaucoup plus fort en certains points proches d'une électrode. Cette situation se produit en particulier lorsque la taille caractéristique de l'électrode est très petite devant la distance inter-électrodes. L'effet de pointe traduit le fait que la valeur du champ électrique est considérablement augmentée au voisinage d'une pointe ou d'une aspérité, par le resserrement des surfaces équipotentiellles, restant parallèles à la surface de l'électrode au voisinage de la pointe. Pour une modélisation précise il faut effectuer le calcul électrostatique correspondant à la géométrie des électrodes.

Le processus d'ionisation par multiplication des électrons dépend de l'électrode à partir de laquelle se développe la couronne. Pour les cas où elle part de la cathode, on parle alors de couronne négative. Après l'avalanche primaire, c'est essentiellement l'émission cathodique qui produit les électrons. Le processus de claquage est alors semblable au claquage de Townsend et le critère de claquage s'écrit en tenant compte des processus d'attachement et en intégrant sur la distance x perpendiculaire à l'électrode :

$$\int_0^{x_1} [\alpha(x) - \eta(x)] dx = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \tag{3.5}$$

γ : le deuxième coefficient d'ionisation de Townsend

La borne d'intégration supérieure x_1 correspond au point où la multiplication des électrons cesse et est entièrement compensée par l'attachement $\alpha = \eta$, en effet α décroît avec x en même temps que le champ électrique. Au-delà de x_1 , il y a très peu d'électrons et absence de luminosité, cette distance délimite la taille de la couronne.

Pour les cas où la couronne dite positive se développe de l'anode, on pense que la multiplication des électrons se fait à partir de l'anode par des streamers produits par photo - ionisation. Le critère de claquage s'écrit alors :

$$\int_0^{x_1} (\alpha - \eta) dx = 20 \quad (3.6)$$

Dans la région extérieure à la couronne, les ions négatifs pour la couronne négative et les ions positifs pour la couronne positive, sont portés par le faible champ électrique dans un gaz non ionisé. La charge d'espace créée par ces ions s'oppose au mouvement vers l'électrode et limite le courant .

Pour les différentes polarités, on distingue les apparences de la couronne. Sous la polarité positive, la couronne apparaît sous forme d'une enveloppe bleue- blanchâtre uniforme au delà de la surface de la décharge. Sous la polarité négative, la couronne apparaît comme un spot rougeâtre incandescent le long de la décharge .

III.2 Effet Couronne – d'un point de vue Pratique

L'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse. La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre.

Inconvénients : pertes couronne, interférence avec les ondes radio, bruit et vibrations des conducteurs. **Avantages** : plusieurs applications industrielles (Filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie...)

L'effet couronne devient très gênant pour les réseaux à partir de 345 kV. Le bruit et le champ électrique superficiel représentent actuellement les paramètres d'environnement les plus importants à prendre en considération lors de la construction de nouvelles lignes $U \geq 750\text{kV}$. L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne, mais aussi sur les parties métalliques aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

Champ électrique

Le champ électrique produit par le conducteur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du conducteur, il s'agit donc d'un champ non uniforme.

Important : L'effet couronne a lieu dans un champ non uniforme.

Soit un système d'électrodes pointe-plan. Que se produit-il si le champ près de la pointe est égal à 30 kV/cm ?

Réponse : Décharge couronne

Le champ étant non uniforme, l'ionisation se produit uniquement près de la pointe et ne se produit pas près de l'électrode plane.

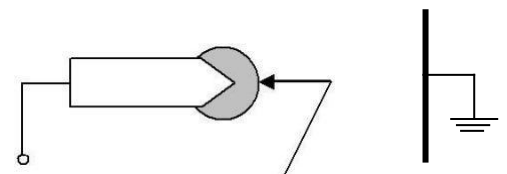
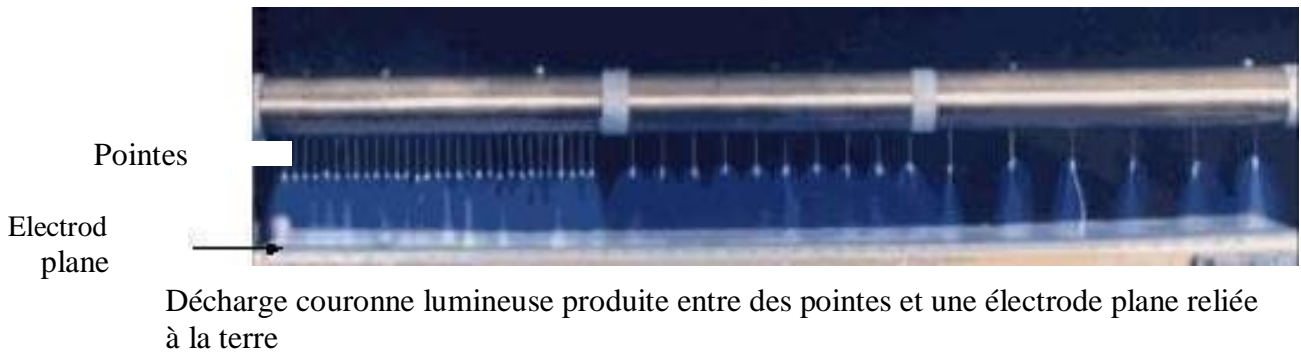
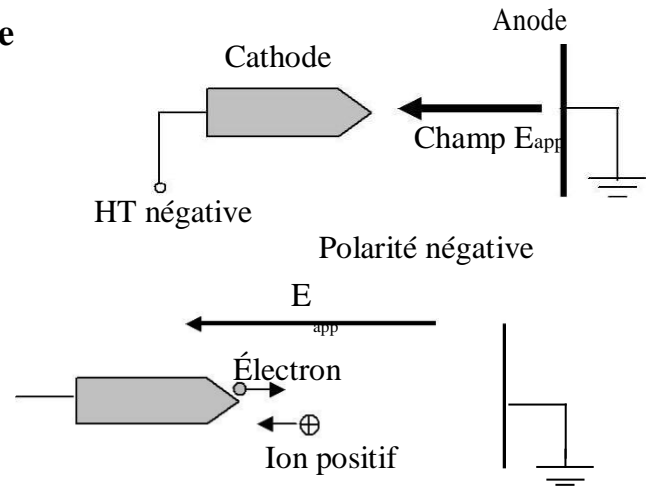


Figure 3 : Zone où se produit l'effet Couronne



III.3 Décharge Couronne -Polarité Négative

- a) Pointe portée à un potentiel HT négatif ;
Electrode plane : reliée à la terre.

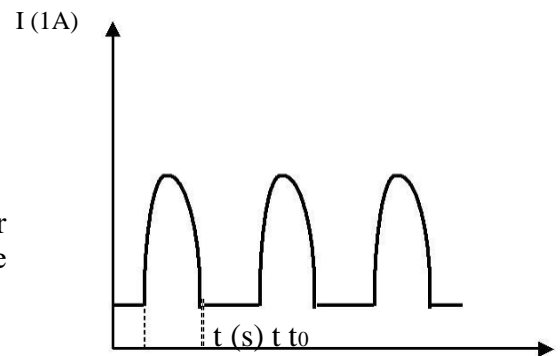


Dans les gaz électronégatifs (air, SF6...), les électrons s'attachent aux atomes pour former des ions négatifs \Rightarrow le courant électronique devient courant ionique.
Le courant de la décharge couronne est très faible : de quelques +A à quelques mA.

- b) Courant à haute fréquence : t

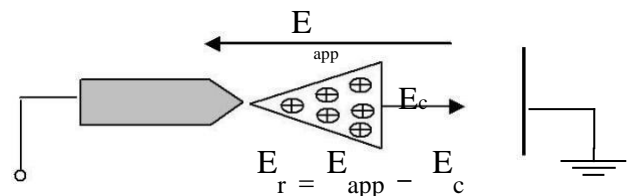
: déroulement des avalanches t_0
: arrêt des avalanches
Fréquence : environ 1 MHz

La fréquence des impulsions augmente avec la pression, car la charge d'espace qui s'oppose au champ appliqué est vite formée.



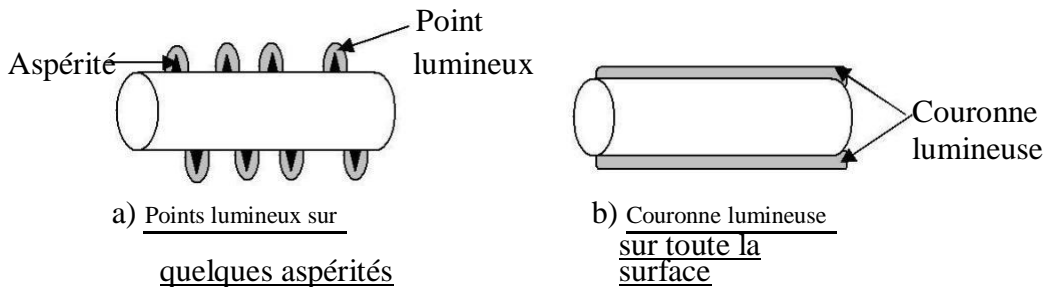
III.3.1 Apparence lumineuse

Comme le champ de la charge d'espace est opposé au champ appliqué, on dit qu'en polarité négative l'effet couronne se déroule dans un « champ décroissant ». L'aspect lumineux est limité dans l'espace.



Ligne HT :

- a) Apparition de points lumineux sur les aspérités.
- b) Pour une ligne THT, une couronne lumineuse peut couvrir tout le conducteur



III.4 Loi De Peek- Champ Critique D'apparition De L'effet Couronne

Le champ critique d'apparition de l'effet couronne sur un conducteur est :

III.4.1 Conducteur lisse

$$E_{cc} = E_s \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad (\text{kV/cm})$$

Pour une tension continue : E_{cc} en valeur efficace ;

Pour une tension alternative : E_{cc} en valeur max ou amplitude

avec $\delta = \frac{3,92 P}{273 + T}$ densité relative de l'air

Remarque : conditions normales $P = 76 \text{ cm}$ et $T = 25^\circ\text{C} \Rightarrow \delta = 1$

Où

$E_s = 30 \text{ kV/cm}$;

r (cm) : rayon du conducteur ;

P (cm Hg) : pression en cm de mercure

T ($^\circ\text{C}$) : température ;

$k = 0,308$.

III.4.2 Conducteur réel

Le conducteur réel d'une ligne aérienne présente une surface non lisse et rugueuse (toronnée). En plus, la graisse du conducteur favorise le dépôt de poussières, particules végétales et même des insectes. Ces particules forment des micro-pointes qu'on appelle aspérités.

Le pouvoir de pointe fait diminuer le champ critique : $E_0 = m \cdot E_{cc}$ avec $0 < m < 1$: coefficient de l'état de surface.

Conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse, oxydé	0,93 – 0,98
toronné	0,72 – 0,9
par défaut	0,85

L'effet couronne dépend de la géométrie des conducteurs (forme, présence d'irrégularités...) et de l'environnement (pression, humidité, pollution

De manière générale :

$$E_{cc} = E_i \cdot (1 + 0,3 / (\sqrt{\delta \cdot r}))$$

$$E_i = 21,2 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \delta$$

m_1 : état de surface

m_2 : conditions climatiques

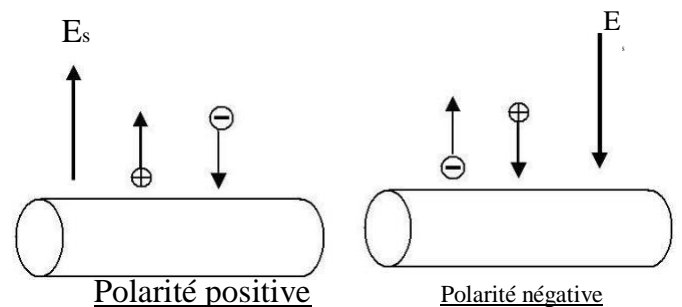
III.5 Pertes Couronne Dans Les Réseaux

III.5.1 Nature des pertes

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

Alternance positive : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions positifs.

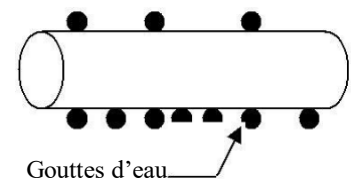
Alternance négative : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives. tout se passe comme si le conducteur émet des ions négatifs.



Le mouvement des ions provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les atomes de l'air. Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les pertes couronne. Les pertes sont dues à un courant dans le plasma formant la couronne autour du conducteur, dont l'ordre de grandeur est environ $P \approx 100 \text{ kW/km}$.

Influence de la pluie

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et les pertes considérables.



Remarques :

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec ; c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.
- Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur.
- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlée au fur et à mesure par la décharge elle-même.
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules.

III.5.2 Perturbation Electromagnétique

L'effet couronne est à l'origine des perturbations des ondes radio, car les fréquences du courant de couronne (de l'ordre du MHz) sont du même ordre de grandeur que celles des ondes radio. Les charges créées par ionisation sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Le courant qui en résulte crée un champ électromagnétique variable qui se propage dans l'air et provoque la perturbation des ondes radio.

III.5.3 le Bruit

L'effet couronne produit un bruit ressemblant au bourdonnement d'abeilles. Le déplacement brusque des ions par le champ superficiel produit une variation locale de la pression de l'air qui se transforme en ondes sonores. Le bruit est un facteur nuisible qui peut avoir des conséquences nuisibles sur le tissu biologique.

Le bruit est tellement gênant pour l'environnement qu'il devient la paramètre principal à prendre en considération lors de la réalisation de réseaux THT ($U \geq 1000 \text{ kV}$).

III.5.4 Dégagement du gaz D’ozone

La décharge couronne, à l’instar de la décharge de claquage, est aussi accompagnée d’un dégagement d’odeur due à la formation de l’ozone.

Par ailleurs, en présence de l’humidité, de l’acide nitrique est produit qui cause la corrosion du conducteur.

III.5.5 Vibrations Des Conducteurs

Sous l’effet de la force électrique

III.5.6 Remède

Le champ électrique superficiel E_s produit à la surface d’un conducteur cylindrique peut être

$$E_s = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r}$$

calculé par le théorème de Gauss :

La seule solution utilisée pour remédier contre l’effet couronne est de diminuer le champ superficiel du conducteur en augmentant le rayon.

On utilise pour augmenter le rayon:

soit un conducteur creux

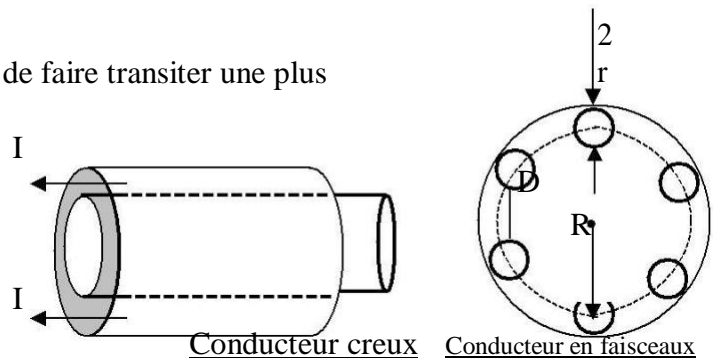
soit un conducteur en faisceaux (il permet en plus de faire transiter une plus grande puissance)

Conducteur en faisceaux :

$$R_{\text{équ}} = \frac{R_n \sqrt{n\pi}}{\sqrt{R}} \quad \text{avec } D = 2R \sin \frac{\pi}{n}$$

avec n nombre de conducteurs ;

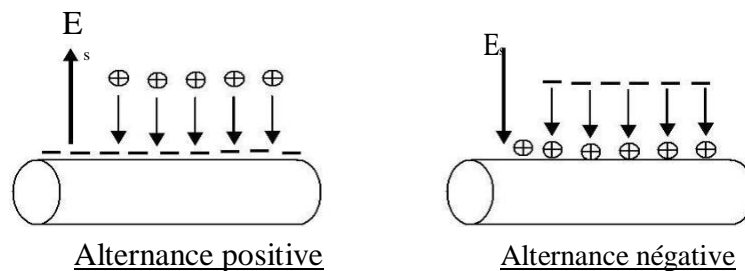
Réqui rayon équivalent qu’aurait un conducteur central dans cette cellule.



III.6 Avantage De La Décharge Couronne Dans Le Réseau et Applications

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur.

On dit que l’effet couronne est un régulateur de tension.



Conclusion : La décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l’effet couronne se produit autour de l’air environnant. celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur augmente, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique

III.6.1 Applications Utilisant La Décharge Couronne

- Parafoudre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre

- Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

- Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre.

- Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquière des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents.