

Chapitre 7

Décharge électrique et Rigidité diélectrique

1. Définitions

La **rigidité diélectrique** est le champ électrique maximal que peut supporter un isolant avant que se produise une décharge disruptive. La rigidité diélectrique se mesure en kV/mm ou kV/cm.

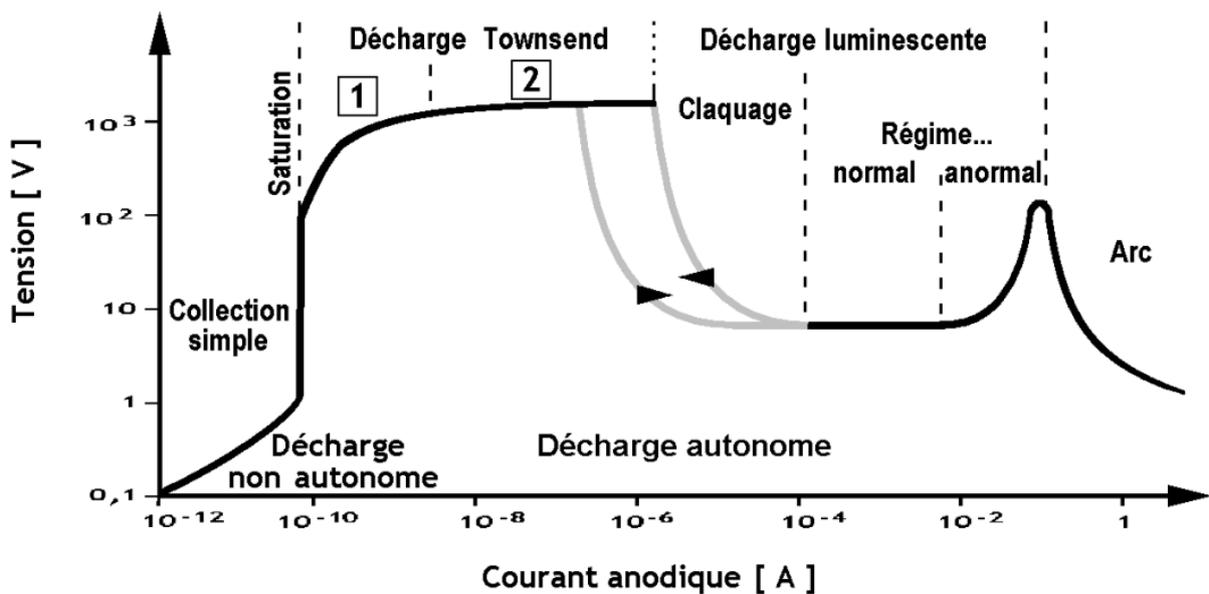
Une **décharge électrique** est un canal conducteur se formant, sous certaines conditions, entre deux électrodes, à travers un milieu normalement isolant.

Une décharge est dite **non autonome** lorsque l'émission des électrons doit être provoquée par apport d'énergie thermique (cathode chauffée) ou par irradiation. La décharge non autonome cesse en l'absence de l'agent ionisant extérieur.

La décharge est dite **autonome** lorsqu'elle se maintient sans agent ionisant extérieur. La décharge autonome est aussi appelée décharge indépendante.

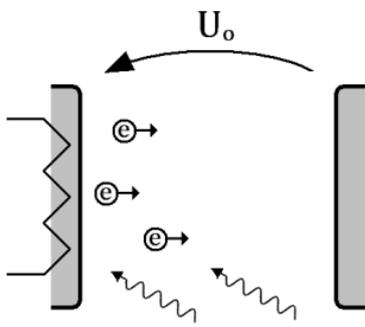
2. Mécanismes de décharge dans les gaz

Divers phénomènes se produisent entre deux électrodes séparées par un intervalle de gaz et soumises à une différence de potentiel.

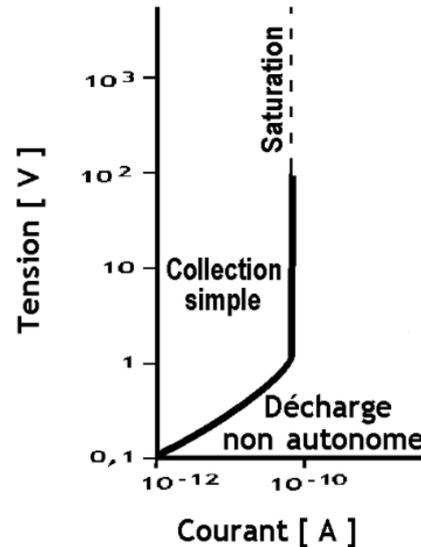


2.1. Décharge de collection simple

Soit deux électrodes baignant dans un gaz et soumises à une différence de potentiel U_0 . En l'absence de production d'électrons, aucun courant ne circule. Mais si, par exemple, la cathode est chauffée ou si un rayonnement provoque une ionisation du gaz, alors un courant I commence à circuler, selon une loi du type $I = (U_0)^\theta$ avec $\theta = 1,5 \sim 2$ (selon la pression du gaz). Le courant est limité par la quantité d'électrons produits par unité de temps.



Ce type de décharge est invisible.



2.2. Décharge avec multiplication



Le mécanisme décrit ici est principalement valable dans les gaz comme l'azote ou le CO_2 , qui ne sont pas trop fortement électronégatifs.

L'énergie des électrons accélérés devient suffisante pour ioniser le gaz, d'où une multiplication d'électrons disponibles pour contribuer au courant d'anode. On a alors une avalanche exponentielle d'électrons.

2.3. Premier coefficient de Townsend

Le phénomène de l'avalanche conduit à la relation suivante entre le courant émis par la cathode, I_0 , et le courant obtenu à l'anode, I_{an} :

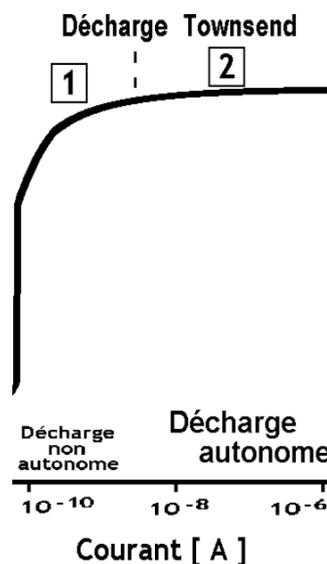
$$I_{an} = I_0 e^{\alpha d}$$

Le paramètre α est le premier coefficient de Townsend, il vaut le nombre d'électrons engendrés par électron incident et par unité de longueur.

Ce coefficient peut être relié au libre parcours moyen $\bar{\lambda}$ des électrons:

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\bar{\lambda}}$$

La tension de seuil d'apparition de l'avalanche, U_s , est proportionnelle au produit : pression du gaz x distance inter-électrodes ($p.d$).



2.4. Capture électronique

Dans les gaz fortement électronégatifs, comme l'hexafluorure de soufre (SF_6), un électron peut être capturé par une molécule du gaz pour former un ion négatif stable :



Dans ces conditions, les électrons disponibles pour produire l'avalanche sont un peu moins nombreux que dans le cas précédent, une certaine fraction η d'entre eux étant capturée par les molécules du gaz.

η est appelé **coefficient d'attachement** et le courant à l'anode est donné par la relation :

$$I_{an} = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right]$$

2.5. Décharge avec émission secondaire

L'émission secondaire est une émission d'électrons à la cathode, due au bombardement par les ions positifs.

Pour une tension assez élevée, les ions formés au cours des collisions avec les électrons sont accélérés en direction de la cathode, avec une énergie suffisante pour provoquer l'émission d'un nouvel électron, dit électron secondaire.

Pour que des électrons quittent la cathode, il faut qu'ils reçoivent suffisamment d'énergie pour franchir la barrière énergétique que constitue la frontière avec le milieu extérieur.

Avec le processus d'émission secondaire, le courant à l'anode est donné par :

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

γ est le **second coefficient de Townsend** ; il dépend principalement de la nature du gaz et de l'état de surface des électrodes.

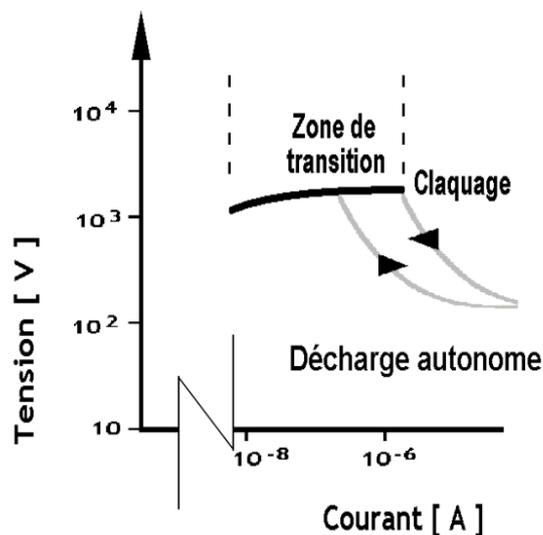
2.6. Décharge disruptive

Lorsqu'on cherche à imposer une tension croissante, on aboutit à une **décharge disruptive** ou **claquage diélectrique**.

En pratique, on observe une brusque augmentation du courant et une chute de la tension : l'impédance du milieu gazeux s'effondre.

Ce phénomène crée un canal ionisé à travers le matériau et s'accompagne de divers effets lumineux, sonores, chimiques, etc.

Dans les gaz ou les liquides, l'apparition d'une décharge disruptive est souvent appelée claquage ou amorçage.



2.7. Loi de Paschen

La limite à laquelle le courant d'anode tend vers l'infini correspond à la rupture diélectrique du gaz (ou claquage).

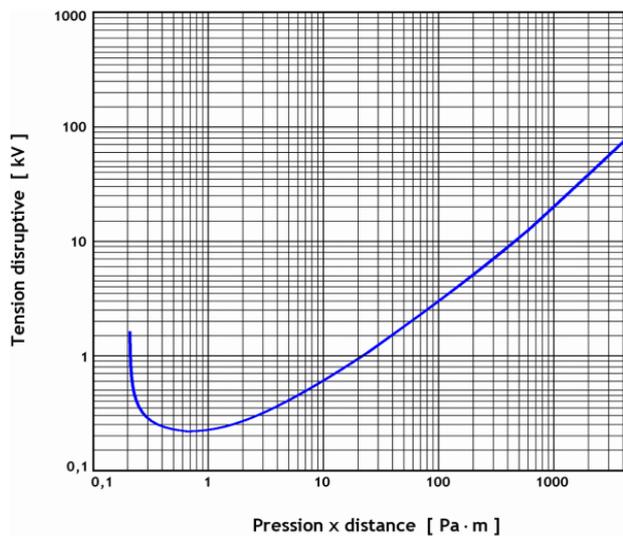
Lors du claquage, la décharge devient fortement lumineuse et l'impédance du canal ionisé tombe subitement : le courant augmente fortement et la tension s'effondre.

Compte tenu de la relation donnant α à partir de la théorie cinétique des gaz, on obtient la **Loi de Paschen** donnant la tension disruptive en fonction du produit de la pression p du gaz par l'écartement d des électrodes :

$$U_d = k \frac{(p \times d)}{\ln[A(p \times d)] - C}$$

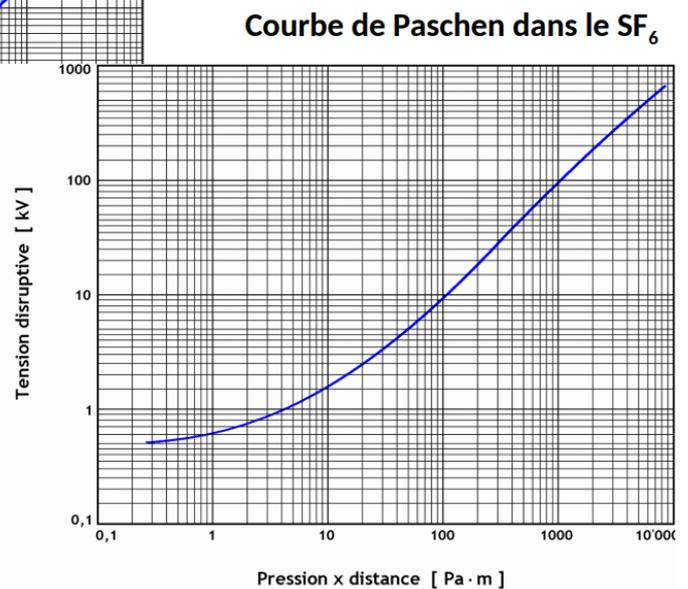
k , A et C : constantes dépendant du gaz et de la température.

Courbes de Paschen



Courbe de Paschen dans l'air

Source : CEI 60052

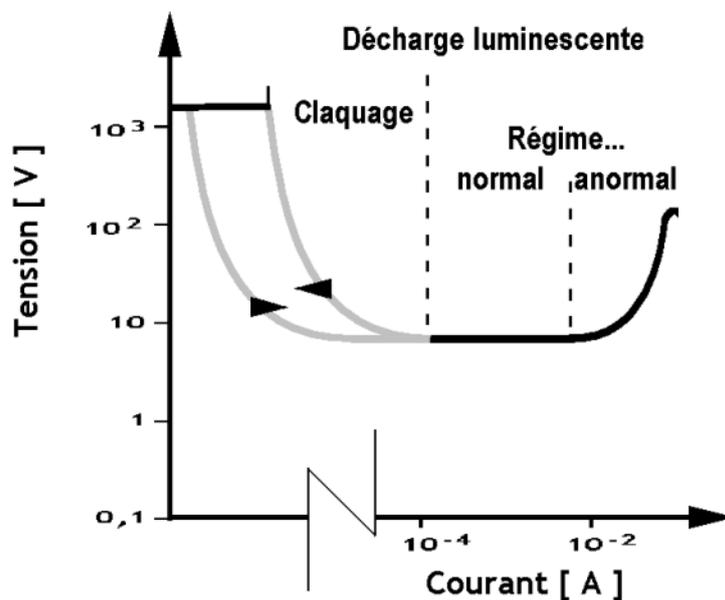


Courbe de Paschen dans le SF₆

2.8. Décharge lumineuse

Dans un tube fluorescent (gaz à basse pression, entre 100 et 5000 Pa) ou dans les ampoules à gaz à haute pression (xénon, krypton, mercure, sodium : $10^5 - 10^6$ Pa), le dépassement de la limite disruptive conduit à une décharge lumineuse, caractérisée par :

- ✓ l'augmentation du courant ;
- ✓ l'augmentation de la surface émissive de la cathode (régime normal), puis...
- ✓ l'augmentation de la tension lorsque toute la surface cathodique est devenue émissive (régime anormal).



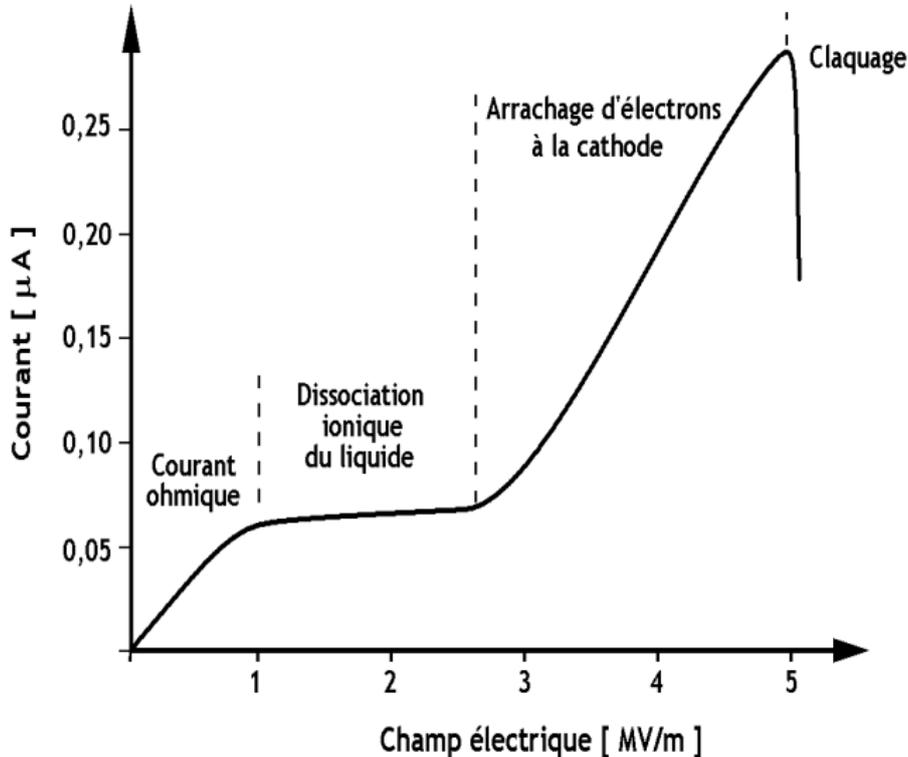
Dans la décharge lumineuse, la cathode reste froide.

2.9. L'arc électrique

L'arc électrique est une décharge électrique autonome transportant un fort courant sous une faible différence de potentiel. Avec l'arc, la cathode devient chaude.

3. Claquage dans les liquides

Le courant qui s'établit dans un liquide isolant, en fonction de la tension (ou du champ E) passe schématiquement par 3 étapes, avant le claquage.



Le courant ohmique qui s'établit à faible champ est essentiellement tributaire des impuretés présentes dans le liquide.

Il n'existe pas de « Loi de Paschen » dans les liquides.

4. Claquage dans les solides

Divers processus peuvent conduire au claquage dans un solide.

Le **claquage thermique** dû à l'élévation de la température par effet Joule (à basse fréquence) ou par résonance avec la polarisation par orientation (autour du MHz).

Le **claquage électromécanique** dû aux forces de compression provoquée par le champ électrique.

Le **claquage par streamer** dû au déclenchement d'une avalanche électronique.

Le **claquage par érosion** dû essentiellement à l'effet des décharges partielles sur le long terme.

Dans les isolants solides, la décharge disruptive est appelée :

perforation, lorsqu'elle traverse le matériau en y produisant souvent des dégâts irréversibles.

contournement, lorsque l'arc ne traverse pas l'isolant mais suit sa surface externe ou un chemin extérieur.

5. Claquage dans le vide

Des intervalles « vides » soumis à des hautes tensions sont utilisés dans différents domaines : dispositifs de coupure sous vide, séparateurs, purificateurs, tubes à rayons X, spectromètre, accélérateurs de particules, canons à électrons, microscopes électroniques, tubes à vide, ...

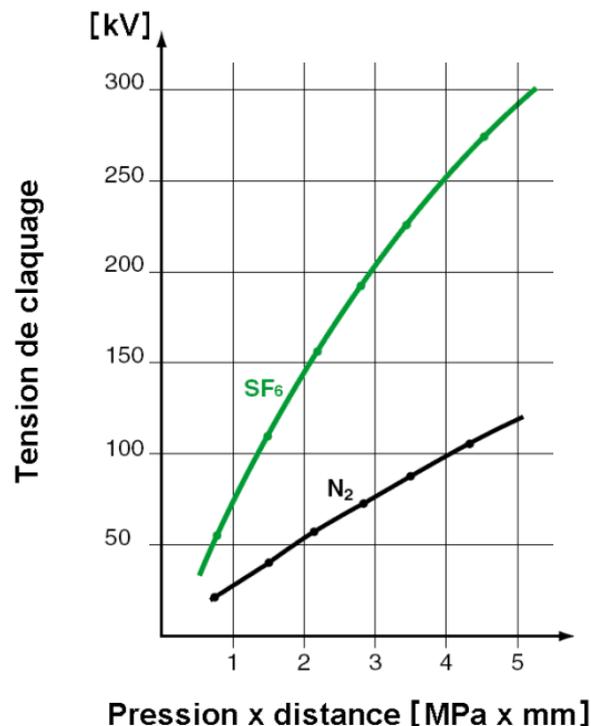
La tension de claquage d'un intervalle « vide » dépend de nombreux facteurs : le type et la pression des gaz résiduels, les matériaux et l'état de surface des électrodes, leur température et les impuretés qui s'y trouvent, la nature des matériaux formant l'enceinte à vide, etc.

Dans le vide, l'émission par effet de champ joue un rôle important. Une évaluation numérique montre que le champ à la surface des électrodes devrait être au moins 100 fois supérieur au champ homogène, ce qui n'est pas complètement élucidé.

Les tests de rigidité diélectrique d'un intervalle « vide » ne sont généralement pas reproductibles. Chaque claquage modifie la composition du gaz et l'état de surface des électrodes. D'où l'importance du conditionnement, avant la mise en service.

6. Rigidité diélectrique du SF₆

Une tension de claquage nettement plus élevée que l'air permet de réduire d'autant les distances entre les éléments entre lesquels existe une différence de potentiel (distance d'isolement).



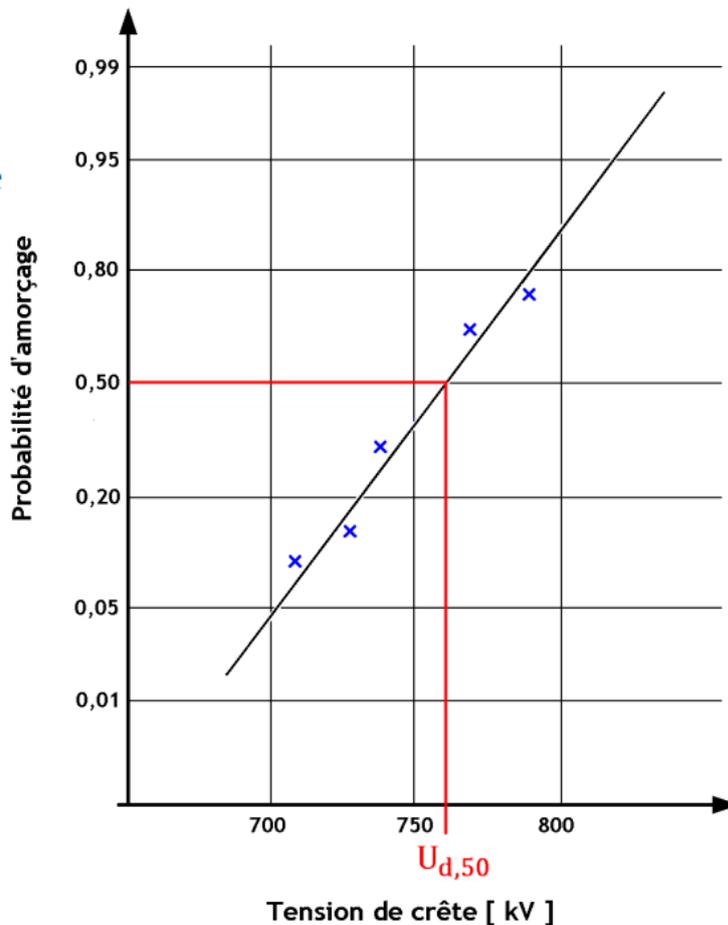
7. Rigidité diélectrique au choc (gaz)

Lorsqu'un choc de tension est appliqué sur un intervalle d'air, on observe que :

- Au-dessous d'une certaine valeur de crête de tension, il n'y a pas de claquage.
- Au-dessus de ce seuil, la probabilité d'amorçage passe de 0 % à 100 % quand la tension s'accroît.

On caractérise l'intervalle d'air par sa **tension $U_{d,50}$** : valeur de crête de la tension pour laquelle la probabilité d'amorçage est de 50 %.

Cette valeur est déterminée par interpolation, dans un diagramme gaucco-arithmétique.



8. Effet de Couronne

L'**effet de couronne** consiste en l'apparition d'aigrettes et d'effluves autour d'un conducteur porté à un potentiel élevé.

On appelle **effluve**, la décharge électrique faiblement lumineuse et ne produisant pas de bruit particulier. Les effluves correspondent à la fin de la zone de Townsend 2, proche du claquage.

On appelle **aigrette** la décharge électrique intermittente en forme de houppe mobile. Elle est généralement accompagnée d'un sifflement ou d'un crépitement. Les aigrettes constituent un état

instable de la décharge, sous forme d'aller et retour entre la zone de Townsend 2 et la zone de claquage.

L'effet de couronne peut être indésirable (par exemple autour des lignes à haute tension), ou au contraire mis à profit dans certaines applications : générateurs électrostatiques, traitement de surface, xérographie, production d'ozone, etc.

8.1. Effet de couronne sur ligne coaxiale

Lorsqu'on applique une tension croissante à une ligne coaxiale de rayons R_1 et R_2 , la décharge disruptive survient à partir d'un seuil de tension, U_c .

Deux cas sont à distinguer :

$R_1 < R_2/e$: apparition d'une zone ionisée, de rayon croissant, autour du conducteur central ; puis amorçage d'une étincelle.

$R_1 > R_2/e$: amorçage d'une étincelle sans effet de couronne.

Correction de Peek

$$U_c = E_{d0} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R_1}} \right) R_1 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

E_{d0} : champ disruptif standard, $E_{d0} = 30 \text{ kV/cm}$ en DC ou $21,2 \text{ kV/cm}$ efficace AC

K : facteur de corrections climatiques

m : facteur de corrections liées à l'état de surface du conducteur

Le facteur entre parenthèses tient compte de la difficulté des électrons à produire l'ionisation de l'air autour d'un conducteur de très petit diamètre.

Lignes monophasées

Pour une ligne monophasée, avec une distance D entre les conducteurs de rayon R , la valeur efficace de la tension d'apparition de l'effet de couronne est donnée par :

$$U_c = 2E_{d0} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

Lignes triphasées

Pour une ligne triphasée symétrique dans laquelle les trois conducteurs sont disposés en triangle équilatéral, l'effet de couronne apparaît dès que les tensions simples atteignent la valeur :

$$U_c = E_{d0} \frac{K m}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

8.2. Effet de couronne dans les réseaux

Les lignes électriques sont dimensionnées pour éviter l'effet de couronne. Celui-ci se produit toutefois dans différents cas :

- ✓ Par temps pluvieux ou par brouillard ; Les gouttes ou gouttelettes d'eau favorisent l'apparition d'aigrettes autour des conducteurs. Ce sont bien les gouttes qui produisent cet effet ; l'humidité a normalement l'effet inverse, sauf quand elle produit de la condensation sur les conducteurs.
- ✓ Lorsque les conducteurs ou les isolateurs de la ligne commencent à être pollués, comme cela finit forcément par arriver après un certain nombre d'années.
- ✓ Lorsqu'un conducteur ou un isolateur est devenu défectueux, à la suite d'une rupture mécanique localisée. Dans ce cas, les perturbations engendrées par l'effet de couronne peuvent servir à localiser le défaut.

8.3. Pertes dues à l'effet de couronne

Pour $U_s \geq 1,8 U_c$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de **Peek** :

$$P = 2,41 \cdot 10^{-9} \frac{f + 25}{K} \sqrt{\frac{R}{D}} (U_s - U_c)^2$$

P : perte de puissance active par unité de longueur [W/m ou kW/km]

f : fréquence du réseau [Hz]

U_s : tensions simples

L'expérience montre cependant que les pertes varient fortement selon l'état de surface des conducteurs, qui lui-même dépend de facteurs climatiques, ainsi que du vieillissement des conducteurs.

Pour $U_s < 1,8 U_c$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de **Peterson** :

$$P = \frac{2,25 \cdot 10^{-16} E_{d0} f U_s^2}{[\ln(D/R)]^2} \times F$$

Le facteur F dépend du rapport U_s / U_c :

U_s / U_c	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F	0,05	0,08	0,3	1	3,5

Les pertes dues à l'effet de couronne deviennent négligeables, par rapport aux pertes par effet Joule, pour les lignes de grandes longueurs.

8.4. Autres effets causés par l'effet de couronne

- **Perturbations électromagnétiques** : L'effet de couronne engendre un rayonnement électromagnétique. Une différence de 20 dB est régulièrement observée entre les niveaux des champs électriques perturbateurs mesurés par temps sec et par temps pluvieux.
- **Perturbations acoustiques** : Les fréquences sonores émises par l'effet de couronne dans le réseau électrique sont principalement comprises entre 2 et 15 kHz.
- **Production d'ozone** : La production d'ozone autour des lignes à haute tension est généralement modérée. Des mesures réalisées sous des lignes haute tension ont montré des concentrations d'ozone de l'ordre de 0,004 ppm d'ozone par temps sec et jusqu'à 0,009 ppm par temps pluvieux.

Les seuils de toxicité de l'ozone, pour des effets réversibles (sensibilité bronchitique) correspondent à 0,1 ppm pendant 7 heures ou 0,35 ppm pendant 1 heure. Dose létale : 50 ppm pendant 30 minutes. La limite admise dans l'atmosphère est de l'ordre de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit un peu moins de 1 ppm.

8.5. Utilisation de l'effet de couronne

- **Production d'ozone**
 - pour purifier : élimination des bactéries dans l'eau et dans l'air, oxydation des métaux lourds dans les rejets industriels.
 - pour blanchir : aliments, papier, textiles...
- **Production d'ions**
 - pour (dé)charger : élimination des charges statiques, xérographie.
 - pour séparer : analyse chimique, élimination de poussière...
 - pour la santé : ioniseurs d'airs.
- **Générateur corona**