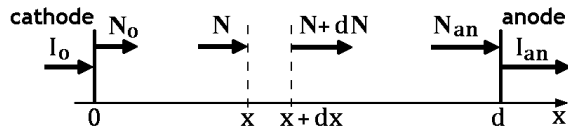


**Premier coefficient de Townsend**

Une cathode et une anode sont séparées par une distance  $d$ . Soit  $N_0$ , le nombre d'électrons émis par la cathode,  $N$  et  $N+dN$  le nombre d'électrons circulant respectivement en  $x$  et  $x+dx$ .



Par définition, le **premier coefficient de Townsend**  $\alpha$  est le nombre d'électrons générés par unité de longueur, pour 1 électron incident. On peut donc écrire :

$$dN = \alpha N(x)dx \quad [-] \quad (1)$$

$$\Rightarrow N(x) = N_0 e^{\alpha x} \quad [-] \quad (2)$$

En particulier au niveau de l'anode ( $x = d$ ) :

$$N_{an} \equiv N(d) = N_0 e^{\alpha d} \quad [-] \quad (3)$$

Ces flux d'électrons correspondent à des courants à la cathode et à l'anode :

$$I_{an} = I_0 e^{\alpha d} \quad [A] \quad (4)$$

**Libre parcours moyen**

Soit  $\bar{\lambda}$  la distance moyenne que franchit un électron avant d'entrer en collision avec un atome du gaz séparant la cathode de l'anode ; c'est par définition le **libre parcours moyen** des électrons. Si l'on admet que chaque collision produit un électron supplémentaire, le nombre d'électrons va alors être multiplié par 2 sur une distance  $\bar{\lambda}$ . Or pour la distance totale  $d$  séparant l'anode de la cathode, il y a  $d/\bar{\lambda}$  collisions. Les nombres d'électrons, et par conséquent les courants, seront donc liés par la relation :

$$I_{an} = I_0 2^{d/\bar{\lambda}} \quad [A] \quad (5)$$

En identifiant avec (4) on trouve la relation entre le 1<sup>er</sup> coefficient de Townsend et le libre parcours moyen :

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\bar{\lambda}} \quad [m^{-1}] \quad (6)$$

**Tension de seuil de l'avalanche électronique**

Selon la théorie cinétique des gaz, le libre parcours moyen  $\bar{\lambda}$  des électrons est inversement proportionnel à la pression du gaz :

$$\bar{\lambda} = \kappa \frac{1}{p} \quad [m] \quad (7)$$

avec :  $\kappa$  = constante caractéristique du gaz

Or l'énergie cinétique acquise par un électron avant une collision (c'est-à-dire sur une distance  $\bar{\lambda}$ ), due à un champ électrique appliqué  $E$  supposé uniforme, vaut :

$$W_{cin} = eE\bar{\lambda} = e \frac{1}{\eta} \frac{U}{d} \kappa \quad [J] \quad (8)$$

avec :  $e$  = charge de l'électron  
 $\eta$  = facteur de Schwaiger

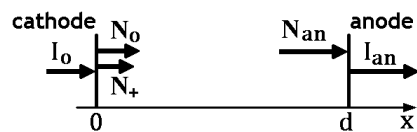
La tension de seuil  $U_s$  est atteinte lorsque cette énergie cinétique est égale à l'énergie d'ionisation  $W_{ion}$  de l'atome :

$$\Rightarrow U_s = \eta \frac{W_{ion}}{e \kappa} (p \cdot d) \quad [V] \quad (9)$$

Ainsi  $U_s$  apparaît proportionnel au produit ( $p \cdot d$ ).

**Second coefficient de Townsend**

Le bombardement de la cathode, par les ions produits au cours du processus de multiplication, provoque l'émission de  $N_+$  électrons secondaires, qui s'ajoutent aux  $N_0$  électrons primaires.



La relation (3) entre le nombre d'électrons émis par la cathode et reçus par l'anode reste valable, à condition de remplacer  $N_0$  par  $(N_0 + N_+)$  :

$$N_{an} = (N_0 + N_+) e^{\alpha d} \quad [-] \quad (10)$$

Par définition, le **second coefficient de Townsend**  $\gamma$  est la fraction du nombre  $N_{ion}$  des ions générés dans le gaz, qui contribuent à produire un électron par bombardement de la cathode :

$$N_+ = \gamma N_{ion} \quad [-] \quad (11)$$

Or le nombre d'ions générés dans le gaz est égal au nombre d'électrons également générés par multiplication, soit la différence entre le nombre d'électrons arrivant à l'anode et le nombre d'électrons quittant la cathode :

$$N_+ = \gamma \cdot [N_{an} - (N_0 + N_+)] \quad [-] \quad (12)$$

En éliminant  $N_+$  entre (10) et (12) (et en passant des flux d'électrons aux courants) on trouve :

$$I_{an} = I_0 \cdot \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad [A] \quad (13)$$

**Loi de Paschen**

Dans la relation (13), le dénominateur peut devenir nul, le courant à l'anode devenant alors infini. Physiquement, cette brusque augmentation du courant, vers une valeur très grande, correspond au claquage d'une étincelle entre les électrodes. La condition de cet événement s'exprime donc par :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \quad [-] \quad (14)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad [m^{-1}] \quad (15)$$

Selon la théorie cinétique des gaz, le rapport entre  $\alpha/p$  ( $p$  = pression du gaz) ne dépend que du rapport  $E/p$  ( $E$  = champ électrique), suivant la loi :

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{B \cdot p}{E}} \quad [m N^{-1}] \quad (16)$$

avec :  $A, B$  = constantes

$$\Rightarrow \frac{\alpha}{p} = \frac{1}{(p \cdot d)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = A e^{-\frac{B \cdot p}{E_d}} \quad [m N^{-1}] \quad (17)$$

avec :  $E_d$  = champ disruptif, puisque cette relation exprime la condition de claquage.

En remplaçant  $E_d$  par  $\frac{1}{\eta} \frac{U_d}{d}$ , où  $\eta$  est le facteur de Schwaiger,

et en prenant le logarithme de chaque côté de (17), on obtient :

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right] = \ln[A(p \cdot d)] - B \eta \frac{(p \cdot d)}{U_d} \quad [-] \quad (18)$$

Finalement, en posant  $C \equiv \ln\left[\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right]$  et  $k = B \eta$  et en sortant la tension de claquage  $U_d$  :

$$U_d = k \cdot \frac{(p \cdot d)}{\ln[A(p \cdot d)] - C} \quad [-] \quad (19)$$

Établie en 1889, cette relation est connue sous le nom de **loi de Paschen**, du nom du physicien allemand Friedrich Louis Carl Heinrich Paschen qui s'est également rendu célèbre par l'observation des *raies de Paschen*, dans le spectre d'émission infra-rouge de l'hydrogène. La loi de Paschen a fait l'objet de nombreuses mesures afin de déterminer les constantes  $k, A$  et  $C$  pour différents gaz et elle est largement utilisée pour dimensionner des dispositifs à haute tension.



Friedrich Paschen

## Minimum de Paschen

On pourrait penser que plus la distance est courte entre l'anode est la cathode, plus la tension nécessaire pour produire le claquage est faible. Pourtant la relation (19) présente un minimum relatif. Au-dessous de ce minimum, la tension disruptive remonte, lorsque la distance interélectrode diminue (à une pression donnée).

On peut expliquer physiquement l'existence d'un minimum dans la loi de Paschen :

- **Lorsque le produit ( $p \cdot d$ ) augmente** (au-dessus de la valeur qui correspond au minimum de la courbe), le libre parcours moyen des électrons devient petit par rapport à la distance qui sépare les électrodes. Le nombre croissant de chocs que les électrons subissent durant leur parcours de la cathode vers l'anode ralenti leur vitesse, nécessitant une tension de plus en plus grande pour provoquer l'amorçage de la décharge.

- **Lorsque le produit ( $p \cdot d$ ) diminue** (au-dessous de la valeur qui correspond au minimum de la courbe), les électrons traversent l'espace entre les électrodes en rencontrant de moins en moins d'atomes susceptibles d'être ionisés. Le phénomène d'avalanche devient ainsi de moins en moins probable, ce qui oblige à accroître le flux d'électrons par une augmentation de la tension, pour obtenir une probabilité suffisante de collisions.

## Facteurs d'influence

Les constantes intervenant dans la loi de Paschen (en particulier la constante  $k$ ) dépendent principalement :

- de la forme des électrodes (distribution du champ, facteur de Schwaiger) ;
- des conditions atmosphériques (correction de pression de température et d'humidité) ;
- de la nature de la tension appliquée (continue, fréquence de la tension alternative, temps de montée et de descente des impulsions) ;
- de la polarité de la tension (constante ou de choc) et de la polarisation de l'intervalle (pour les intervalles dissymétriques).

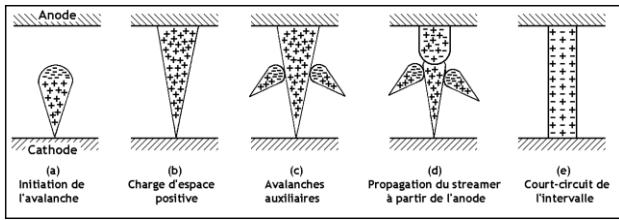
Par ailleurs, on constate que les conditions dans lesquelles se déroule le test de claquage influencent également le résultat. Les paramètres qui jouent un rôle sont :

- **Le conditionnement.** Lorsqu'on répète à plusieurs reprises une expérience de claquage, on constate souvent que la tension nécessaire pour provoquer la rupture diélectrique augmente au fur et à mesure des essais. On l'explique par le fait que les premières décharges « nettoient » les électrodes, c'est-à-dire détruisent les poussières ou les impuretés qui se trouvaient initialement à la surface.
- **La vitesse d'accroissement de la tension.** L'expérience montre que la tension à laquelle le claquage survient est d'autant plus élevée que sa vitesse d'accroissement est plus grande. Cela peut s'expliquer par le temps de relaxation de la charge d'espace qui se forme entre les électrodes.
- **La cadence de répétition des essais.** L'expérience montre également que la tension à laquelle le claquage survient est plus basse lorsque les essais sont répétés à une cadence plus rapide. La raison en est qu'après un premier claquage, des ions subsistent dans l'intervalle interélectrode pendant un certain temps, favorisant le claquage suivant.

## Mécanismes de claquage

Au niveau microscopique, l'amorçage de l'étincelle est assez difficile à analyser. Des enregistrements d'étincelles par des caméras à grande vitesse ont permis d'observer différents mécanismes de claquages, selon les conditions appliquées, en particulier l'uniformité du champ. Ci-dessous, une explication schématique de ces mécanismes.

### Claquage en champ uniforme



### Claquage en champ non uniforme

