



CENTRE UNIVERSAIRE D'EL-OUED

Domaine : Science et technique

Département : Génie électrique

Spécialité: Réseaux électriques

Les filtres électrostatiques

Promotion : 2010

Réalisé par :

- *MEDILEH Ahmed*
- *LAYES Bilal*

Encadré par :

- *M. A. KHECHEKHOUCHE*

Sommaire

TABLE DES FIGURES	III
TABLE DE NOTATION ET SYMBOLE.....	IV
INTRODUCTION GENERALE	VI
CHAPITRE I : PHENOMENES D'IONISATION DANS LES GAZ.....	8
I.1 INTRODUCTION.....	8
I.2 NOTIONS SUR LES GAZ.....	8
I.2.1 Constitution de l'atome.....	9
I.2.2 Mouvement des particules dans le gaz.....	9
I.2.3 Pression du gaz.....	9
I.3 CLAQUAGE.....	10
I.3.1 Tension critique de claquage U_c	10
I.4 PHENOMENES DE COLLISION	11
I.4.1 Choc élastique.....	11
I.4.2 Choc non élastique.....	12
I.5 PROCESSUS D'IONISATION ET D'EXCITATION.....	12
I.5.1 Ionisation par collision.....	12
I.5.2 Photo-ionisation.....	13
I.5.3 Ionisation thermique.....	13
I.5.4 Ionisation par les atomes métastables	14
I.6 AVALANCHE ELECTRONIQUE	14
I.7 DETACHEMENT ET RECOMBINAISON	15
I.8 ATTACHEMENT	15
I.9 GAZ ELECTRONEGATIFS	15
I.10 MILIEUX DE COUPURE DES DISJONCTEURS	16
I.11 PROCESSUS CATHODIQUES	16
I.11.1 Emission par bombardement d'ions positifs.....	17
I.11.2 Emission par photon.....	17
I.11.3 Emission thermique.....	17
I.11.4 Emission par champ.....	17
I.11.5 Emission par les métastables.....	17
CHAPITRE II : MECANISMES DE CLAQUAGE DES ISOLANTS GAZEUX.....	19
II.1 INTRODUCTION.....	19
II.2 INFLUENCE DE LA PRESSION	19
II.3 MECANISME DE TOWNSEND (BASSE PRESSION)	20
II.3.1 Modélisation de la décharge de TOWNSEND.....	20
II.3.2 Caractéristique de TOWNSEND	24
II.4 LOI DE PASCHEN :	25
II.5 DECHARGE COURONNE	26
II.5.1 Cas d'une pointe négative	27
II.5.2 Cas d'une pointe positive.....	29
II.5.3 Loi de PEEK- champ critique.....	30
II.5.4 Pertes couronne dans les réseaux.....	31
II.5.5 Perturbation électromagnétique.....	32
II.5.6 Bruit.....	32
II.5.7 Dégagement d'ozone	32
II.5.8 Solutions contre l'effet de couronne	33
II.5.9 Avantage de la décharge couronne dans le réseau.....	35
II.5.10 Applications utilisant la décharge couronne.....	35

CHAPITRE III : LES DEPOUSSEIERS ELECTROSTATIQUES.....	38
III.1 FILTRAGE ELECTROSTATIQUE	38
III.2 LES DEPOUSSEIERS ELECTRIQUES	38
III.3 LES FILTRES A AIR OU UN DEPOUSSEIERS	40
III.4 LES FILTRES A AIR ET LES DEPOUSSEIERS A L'EXTRACTION DES PARTICULES	40
III.5 LE CHOIX D'UN FILTRE A AIR OU D'UN DEPOUSSEIERS	41
III.6 FILTRES ELECTROSTATIQUES SERIE 60 ET 120	41
III.6.1 <i>Le fonctionnement.....</i>	<i>42</i>
III.6.2 <i>Le système du filtre</i>	<i>42</i>
III.6.3 <i>Choix de l'emplacement</i>	<i>42</i>
III.6.4 <i>Spécification</i>	<i>43</i>
III.6.5 <i>Entretien et maintenance</i>	<i>43</i>
III.6.6 <i>Vues éclatées.....</i>	<i>44</i>
III.6.7 <i>Schéma de câblage</i>	<i>46</i>
III.6.8 <i>Vues du montage.....</i>	<i>48</i>
CONCLUSION GENERALE	50
BIBLIOGRAPHIE.....	52

Table des figures

FIGURE I - 1. :	CONSTITUTION D'UN ATOME.....	9
FIGURE I - 2. :	MOUVEMENT DES PARTICULES ET GAZ.....	9
FIGURE I - 3. :	PRESSION DU GAZ.....	9
FIGURE I - 4. :	DECHARGE ELECTRIQUE	10
FIGURE I - 5. :	ARC ELECTRIQUE	10
FIGURE I - 6. :	COLLISION	11
FIGURE I - 7. :	SCHEMA DE L' AVALANCHE DE TOWNSEND.....	14
FIGURE II - 1. :	BASSE PRESSION	19
FIGURE II - 2. :	HAUTE PRESSION.....	19
FIGURE II - 3. :	MODELISATION DE LA DECHARGE DE TOWNSEND	20
FIGURE II - 4. :	CARACTERISTIQUE DE TOWNSEND.....	24
FIGURE II - 5. :	COURBE DE PASCHEN.....	26
FIGURE II - 6. :	COURONNE LUMINEUSE	26
FIGURE II - 7. :	CAS D'UNE POINTE NEGATIVE	28
FIGURE II - 8. :	CONDUCTEUR AERIEN	30
FIGURE II - 9. :	POLARITE POSITIVE ET POLARITE NEGATIVE	31
FIGURE II - 10. :	INFLUENCE DE LA PLUIE.....	32
FIGURE II - 11. :	CONDUCTEUR CREUX ET CONDUCTEUR EN FAISCEAUX.....	33
FIGURE II - 12. :	CONDUCTEURS EN FAISCEAUX.....	34
FIGURE II - 13. :	ENTRETOISES UTILISEES PAR HYDRO-QUEBEC	34
FIGURE II - 14. :	UTILISATION DES ANNEAUX DE GARDES.	35
FIGURE II - 15. :	ESSAIS DES NOUVEAUX ESPACEURS SUR LA LIGNE EXPERIMENTALE 0.....	35
FIGURE II - 16. :	L'EFFET DE COURONNE ET REGULATION DE TENSION	35
FIGURE II - 17. :	PARAFOUDRE.....	36
FIGURE II - 18. :	NEUTRALISATION	36
FIGURE II - 19. :	SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE.....	36
FIGURE III - 1. :	VUE SCHEMATIQUE D'UN FILTRE ELECTROSTATIQUE AVEC UN RESEAU DE POINTES	39
FIGURE III - 2. :	VUE ECLATEE DE AIR SERIE 60	44
FIGURE III - 3. :	VUE ECLATEE DE AIR SERIE 120	45
FIGURE III - 4. :	SCHEMA DE AIR SERIE 60.....	46
FIGURE III - 5. :	SCHEMA DE AIR SERIE 120	47
FIGURE III - 6. :	FERMETURE D'ACCES A LA CELLULE.....	48
FIGURE III - 7. :	VIS DE RETENUE DE FILTRE	48
FIGURE III - 8. :	ENTREE DU CABLE	48
FIGURE III - 9. :	CLIPS DE PRE-FILTRE.....	48
FIGURE III - 10. :	PLAQUE DE RETENUE DE FILTRE	48
FIGURE III - 11. :	BLOC DE TERMINAUX	48

Table de Notation et symbole

U_c	Tension critique de claquage
v	Vitesse de m avant le choc
v'	Vitesse de m après le choc
V	Vitesse de M après le choc
W_c	L'énergie cinétique
W_i	L'énergie d'ionisation
W_{ext}	L'énergie d'excitation
W_p	L'énergie d'un photon
W_{th}	L'énergie thermique
V_{ext}	Potentiel d'excitation
m	Masse de la particule
	Nombre d'atomes/unite de volume
	Libre parcours moyen (lpm)
V_i	Potentiel d'ionisation
e	Charge élémentaire d'un électron
A^*	L'atome excité
h	Constante de Planck égale à $6,625.10^{-34}$ J.s
A^m	Les atomes métastables
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	Le courant photoélectrique initial à la cathode
γ	Deuxième coefficient d'ionisation de Townsend
ρ	Permittivité du milieu dans le vide ($8,85 \times 10^{-12}$) F/M
	Premier coefficient de Townsend

Introduction générale

Introduction Générale

Des applications industrielles de l'électrostatique pour manipuler des particules ou des gouttelettes en suspension sont actuellement utilisées dans de nombreux domaines : peinture et poudrage électrostatiques, précipitation électrostatique (PES), pulvérisation électrique de liquides, guidage électrostatique de poudres (par rideaux électriques), séparation électrostatique de granules, etc. Dans tous ces cas, les particules ou gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Alors, sous l'effet du champ électrique, elles sont dirigées ou entraînées vers une cible, une zone de capture ou de séparation, etc.

La plus ancienne de ces applications est le dépoussiérage électrostatique. Les précipitateurs électrostatiques (PES), appelés également électrofiltres ou dépoussiéreurs électrostatiques, sont des installations de filtration largement utilisées depuis le début du 20^{ème} siècle pour épurer les fumées. Ils prennent une part importante dans la filtration des rejets industriels dans l'atmosphère. Les dépoussiéreurs électrostatiques sont actuellement les séparateurs les plus utilisés par l'industrie, en particulier pour les grands débits gazeux. On les trouve, par exemple, dans les industries métallurgiques et chimiques ou celle du ciment, ainsi que pour traiter les fumées produites par les centrales électriques brûlant du charbon Pulvérisé. Le succès de ce procédé s'explique par la grande efficacité de filtration (en général, supérieure à 99% en masse) et la faible perte de charge dans ces installations de traitement.

De nos jours, la qualité de l'air est devenue une préoccupation majeure qui a de nombreuses implications sur la vie et les activités de l'homme. Dans les années 1960 et 1970 on a pris conscience de l'importance de la qualité de l'air et les législations ainsi que les normes ont commencé à évoluer. Ce n'est pas un problème restreint à quelques usines, mais, au contraire, très largement réparti à travers une grande variété d'industries. C'est pourquoi les gouvernements ont règlementé les émissions de polluants dans les rejets industriels et imposent des normes de plus en plus sévères.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante : le premier chapitre donne une description détaillée des phénomènes d'ionisation dans les gaz. Le deuxième chapitre présente les mécanismes de claquage des isolants gazeux. Le troisième chapitre a pour objectif de présenter les dépoussiéreurs électrostatiques.

Chapitre I :

Phénomènes d'ionisation dans les Gaz

Chapitre I : Phénomènes d'ionisation dans les gaz

I.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.[1].

I.2 Notions sur les Gaz

- Tous les gaz sont isolants
- Ont la même constante diélectrique $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F/m}$
- L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par dessus le marché il est gratuit.
- Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen.
- N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que :
 - Grande résistivité ;
 - Perte faible ;
 - Rigidité diélectrique élevée ;
 - Non inflammable ;
 - Résistant aux effets thermiques et chimiques ;
 - Absence de toutes toxicités ;
 - Maintenance pas chère et pratique.
- Les gaz ne sont pas généralement considérés comme des "matériaux", parce que la distance entre les molécules adjacentes est si grande et le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume est si petit, qu'ils ne sont pas capables de résister aux forces mécaniques. Cependant, les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant.

I.2.1 Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

- des protons : $m_p = 1,6725.10 \text{ kg}$; $q_p = 1,6.10 \text{ C}$
- des neutrons : $m_n = 1,6748.10 \text{ kg}$; $q = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

$$m_e = 9,1019.10^{-31} \text{ kg} ; q_e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$$

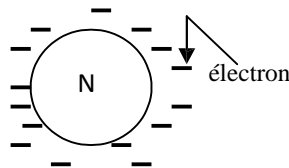


Figure I - 1. : Constitution d'un atome

A l'état fondamental, l'atome est neutre ;

- S'il libère un électron il devient un ion positif ; $A - 1e \rightarrow A_+$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif ; $A + 1e \rightarrow A_-$

Remarque : Le photon est un quantum d'énergie ($m=0$; $q=0$).

I.2.2 Mouvement des particules dans le gaz

Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est une masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes.

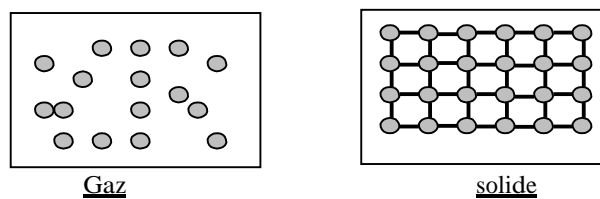


Figure I - 2. : Mouvement des particules et gaz

I.2.3 Pression du gaz

La pression P est proportionnelle à la densité atomique .

: Nombre d'atomes/unité de volume

: libre parcours moyen (l.p.m) : distance séparant deux particules voisines.

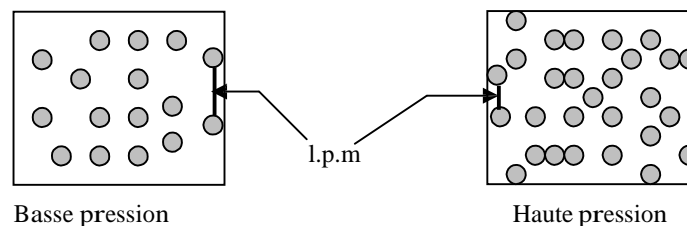


Figure I - 3. : Pression du gaz

I.3 Claquage

I.3.1 Tension critique de claquage U_c

Si $U > U_c$: l'isolant ne peut pas supporter cette tension \Rightarrow Claquage (décharge électrique).[2].

Remarque : A la pression atmosphérique, si $d = 1\text{cm}$: $U_c \approx 30\text{ kV}$; donc

le champ critique $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$.

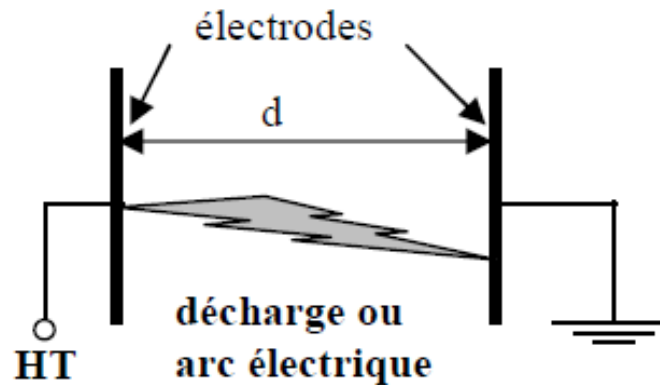


Figure I - 4. : Décharge électrique

Étincelle-arc électrique :

Lors d'un claquage, si l'on contrôle le courant avec une résistance élevée, la décharge se stabilise pour des courants de l'ordre du μA (*Étincelle*). Sinon, s'il n'y a pas de résistance de protection R , la décharge évolue rapidement vers d'autres régimes caractérisés par des courants beaucoup plus élevés (*arc électrique*), si la source d'alimentation a une puissance suffisante.

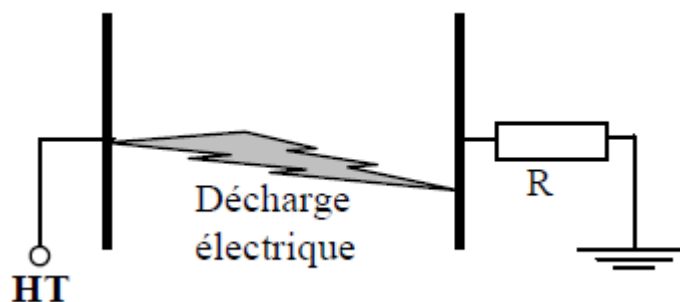


Figure I - 5. : Arc électrique

I.4 Phénomènes de collision

Collision : choc entre deux particules.

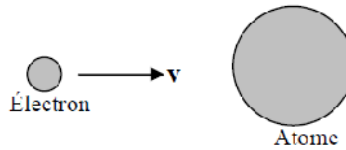


Figure I - 6. : Collision

I.4.1 Choc élastique

On considère une boule de masse m qui entre en collision avec une autre boule de masse M .

Soient :

v : vitesse de m avant le choc ; v' : vitesse de m après le choc ; V : vitesse de M après le choc.

- Principe de conservation de l'énergie cinétique W_c :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV^2 \quad (\text{I-1})$$

- Principe de conservation de la quantité de mouvement :

$$mv = mv' + MV \quad (\text{I-2})$$

A partir des équations (I-1) et (I-2), on obtient :

$$\frac{v'}{v} = \frac{M - m}{M + m} \quad (\text{I-3})$$

- a) Si $M \cong m$: collision entre un atome et un ion ;

$v' \cong 0 \Rightarrow$ la particule incidente perd son énergie cinétique.

- b) Si $M \gg m$: entre un atome et un électron;

$v' \cong v \Rightarrow$ la particule incidente conserve son énergie cinétique

Dans un choc élastique, il y a un transfert d'énergie cinétique seulement. Lors de chocs élastiques l'électron garde pratiquement toute son énergie et n'en cède qu'une très faible part par collision aux autres particules. Les électrons possèdent donc une énergie supérieure à celle des ions et des molécules neutres. Comme l'électron conserve pratiquement toute son énergie cinétique après un choc élastique, il sera d'une grande importance pour les chocs non élastiques qui se produisent dans le mécanisme de claquage des gaz.

I.4.2 Choc non élastique

Au moment de la collision, si l'énergie cinétique de l'électron incident est suffisamment grande, l'atome libère un électron et devient ionisé (ionisation par collision) \Rightarrow choc non élastique.

I.5 Processus d'ionisation et d'excitation

Les électrons dans un conducteur sont libres, dès qu'on applique un champ aussi faible soit-il ils se détachent de l'atome et se déplacent avec le champ. Par contre dans un isolant, les électrons sont liés et ne se détachent que si on leur fournit une énergie suffisamment grande supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome.

Remarque : L'énergie d'ionisation W_i est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome. $W_i = eV_i$

e : charge élémentaire d'un électron ; V_i : potentiel d'ionisation

On donne ci-dessous les énergies d'ionisation de quelques gaz.

Tableau I – 1 Les énergies d'ionisation de gaz

Molécules	W_i (eV)
CO ₂	13,7
N ₂	15,5
O ₂	12,2
H ₂	15,4
H ₂ O	12,6

I.5.1 Ionisation par collision

a) Ionisation :

Sous l'action de \mathbf{E} l'électron qui se déplace avec une énergie cinétique W_c entre en collision avec l'atome ; avec : $W_c = \frac{1}{2} m v^2$

m : masse de la particule

v : vitesse de la particule

Si $W_c > W_i \Rightarrow$ ionisation de l'atome ; $A + W_c \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$

avec $\Delta W = W_c - W_i$ énergie supplémentaire cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

b) Excitation :

Un atome excité A^* est un atome qui a absorbé et emmagasiné une énergie. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique est légèrement inférieure à W_i .

Si W_c est légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ excitation de l'atome. $A + W_c \rightarrow A^*$

Chaque type de gaz possède une valeur propre de l'énergie d'excitation W_{ext} :

$W_{\text{ext}} = e V_{\text{ext}}$; telque V_{ext} : potentiel d'excitation

Désexcitation : Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément, lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.

Après un temps très bref (entre 10^{-7} et 10^{-10} s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie $W_p = h\nu$ ($A^* \rightarrow A + W_p$)

avec $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s : constante de Planck ; ν fréquence du photon

I.5.2 Photo-ionisation

L'atome absorbe l'énergie d'un photon W_p .

- Si $W_p > W_i \Rightarrow$ photo-ionisation $A + W_p \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$
avec $\Delta W = W_p - W_i$ cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.
- Si W_p légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ photo-excitation $A + W_p \rightarrow A^*$

I.5.3 Ionisation thermique

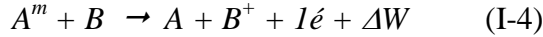
Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée (>1500 °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée W_{th} .

- Si $W_{\text{th}} > W_i \Rightarrow$ ionisation $A + W_{\text{th}} \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$ avec $\Delta W = W_{\text{th}} - W_i$ cédée à l'électron libéré.
- Si W_{th} légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ excitation et donc $A + W_{\text{th}} \rightarrow A^*$

L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. Dans ce cas, l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives ; en effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs élevée. Le temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation.

I.5.4 Ionisation par les atomes métastables

Un métastable A^m est un atome excité qui garde assez longtemps l'énergie absorbée (de l'ordre de 1s). Lors de la rencontre avec un atome B, il peut se produire un transfert d'énergie qui permettra l'ionisation de ce dernier.



C'est le processus le moins fréquent.

I.6 Avalanche électronique

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

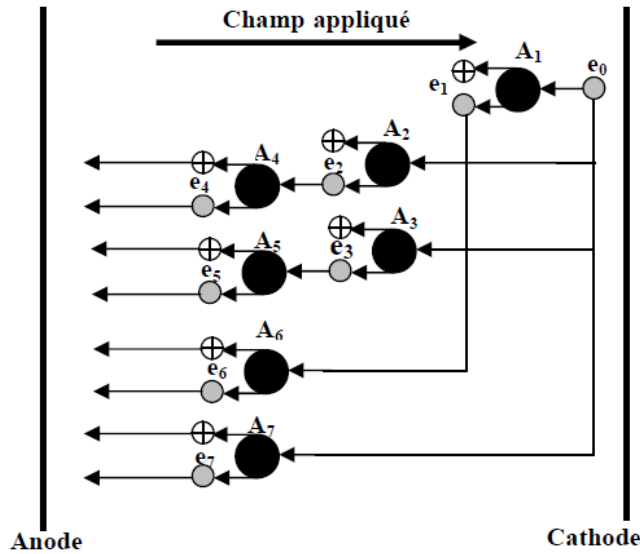


Figure I - 7. : Schéma de l'avalanche de townsend

Electron primaire : crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

Description de l'avalanche : L'électron primaire e_0 accéléré par le champ E entre en collision avec un atome A_1 et l'ionise, A_1 libère un électron et devient lui même un ion positif.

Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision deux atomes A_2 et A_3 qui libèrent deux électrons e_2 et e_3 . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent \Rightarrow avalanche électronique.

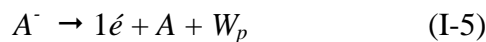
La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode.

Remarques :

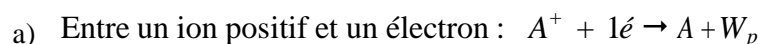
- L'avalanche prépare le chemin au claquage du gaz.
- Un atome ionisé fournit un électron et devient lui même un ion positif ; Il y a autant d'électrons dans l'avalanche que d'ions positifs. Chaque collision ionisante produit une paire électron-ion positif.
- L'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique (Cathode→Anode).

I.7 Détachement et recombinaison**1) Détachement d'électron**

Détachement : Quand l'ion négatif cède l'électron supplémentaire.

**2) Recombinaison**

Quand deux charges opposées se recombinent pour former une particule neutre (inverse de la photo-ionisation)

**I.8 Attachement**

Quand un électron s'attache à un atome pour former un ion négatif ; $A + 1e \rightarrow A^- + hv$
L'attachement se produit pour des champs assez faibles. Les particules neutres (atomes et molécules) favorisent l'attachement des électrons.

L'attachement correspond à une diminution d'électrons dans le gaz ; par analogie avec l'augmentation d'électrons par ionisation (), on écrit :

$$\frac{dn}{n} = -\eta dx \quad \text{soit} \quad n = n_0 e^{-\eta x} \quad (\text{I-6})$$

Avec coefficient d'attachement, n_0 nombre d'électrons initial et n nombre d'électrons attachés.

I.9 Gaz électronégatifs

La diminution d'électrons dans le gaz, grâce à l'attachement aux atomes, rend le claquage plus difficile, pour cette raison, les gaz électronégatifs sont les meilleurs isolants gazeux utilisés dans l'isolation haute tension. Pour ce type de gaz, les molécules se

combinent facilement avec les électrons libres et peuvent absorber une partie de l'énergie de l'électron incident.

Hexafluorure de soufre SF₆ :

Dans les dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour raison d'encombrement et de coût, a conduit à rechercher d'autres types de gaz, possédant de meilleures propriétés d'isolation que l'air, tels que le SF₆. Le SF₆ est un gaz inodore, incolore, non toxique, ininflammable et plus résistant au claquage. Il n'est pas toxique, chimiquement résistant et ne se décompose pas sous l'effet de la chaleur jusqu'à des températures de 800 °C.

$$\frac{U_c(SF_6)}{U_c(Air)} = 1,6 \div 2,62 ; \quad (I-7)$$

Le SF₆ est le meilleur isolant gazeux industriel qu'on connaît.

Remarques :

- Parallèlement, on a utilisé les bonnes caractéristiques du vide ($10^{-5} - 10^{-7}$ mm Hg) dans la technique de coupure (disjoncteurs, relais...) malgré des difficultés pratiques importantes.
- L'hydrogène et les gaz inertes (argon, néon, hélium,...) ont une rigidité diélectrique la plus faible que celle de l'air. Pour cette raison qu'ils sont employés dans les applications de la décharge électrique (lampe à décharge...).

I.10 Milieux de coupure des disjoncteurs

Un grand nombre de substances possèdent des qualités, plus ou moins acceptables, pour être des milieux de coupure. Trois de ces milieux ont gagné l'attention des fabricants de disjoncteurs du fait que leurs propriétés excellentes ont permis des réalisations économiques à hautes performances. Ce sont :

- L'air comprimé ;
- L'hexafluorure de soufre ou SF₆ ;
- L'huile minérale.

I.11 Processus cathodiques

Si on fournit à un métal une énergie suffisante, supérieure à l'énergie d'extraction, il libère un ou plusieurs électrons situés à sa surface. Pour cette raison la cathode joue un rôle important car les électrons extraits participent au claquage.

I.11.1 Emission par bombardement d'ions positifs

Les ions positifs se dirigent vers la cathode avec une énergie cinétique $W_c = \frac{1}{2}mv^2$ et la bombardent. Si $W_c > W_{ext}$, la cathode libère un ou plusieurs électrons. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

Remarques :

- Le surplus d'énergie $\Delta W = W_c - W_{ext}$ est cédé à l'électron émis sous forme d'énergie cinétique.
- Un électron parmi ceux émis sert à la neutralisation de l'ion incident : pour dégager un électron libre (secondaire) il faut que $W_c > 2W_{ext}$

I.11.2 Emission par photon

La cathode absorbe un photon d'énergie $W_p = h\nu$; Si $W_c > W_p$, il y a extraction d'un ou plusieurs électrons.

I.11.3 Emission thermique

Quand la température de la cathode devient très grande (entre 1500 et 2500 °K), l'énergie thermique de la cathode extrait un ou plusieurs électrons. En effet, les vibrations élevées des particules aboutissent à la libération d'un ou de plusieurs électrons situés à la surface du métal.

I.11.4 Emission par champ

Si le champ à la surface est très élevé (10^7 à 10^8 V/cm), un ou plusieurs électrons peuvent être extraits par la force électrique.

Remarque : de tels champs peuvent être atteints lorsque la cathode présente des irrégularités et des imperfections à la surface (micro-pointes) même avec une tension appliquée de 2 à 5 kV. C'est un processus d'ionisation très peu fréquent.

I.11.5 Emission par les métastables

Le bombardement de la cathode par les métastables permet aussi l'extraction d'électrons. C'est aussi un processus peu fréquent.

Chapitre II :

Mécanismes de claquage des isolants gazeux

Chapitre II : Mécanismes de claquage des isolants gazeux

II.1 Introduction

C'est dans le gaz que le mécanisme de claquage a été le mieux élucidé et des bases théoriques ont été élaborées. Le mécanisme de claquage dans les solides et les liquides n'est pas encore aussi bien établi.[2][3].

II.2 Influence de la pression

Durant l'avalanche électronique les électrons rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs moins rapides forment dans le gaz une charge d'espace. La taille de la charge d'espace dépend de la pression du gaz.

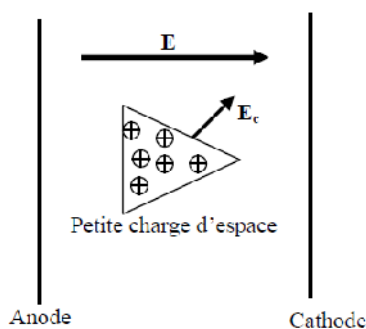


Figure II - 1. : Basse pression

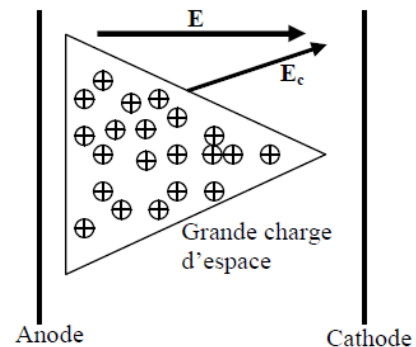


Figure II - 2. : Haute pression

a) Basse pression :

Comme la densité atomique est faible, la charge d'espace est telle qu'elle génère un champ électrique E_c faible et négligeable \Rightarrow MECANISME DE TOWNSEND.

b) Haute pression :

La densité atomique est grande, la charge d'espace est volumineuse ; Elle crée un champ E_c considérable qui joue un rôle important dans le claquage \Rightarrow MECANISME DE STREAMER.

II.3 Mécanisme de TOWNSEND (Basse Pression)

Pour les distances faibles (max. 1m), la théorie de Townsend est valable pour des pressions inférieures à 0,1 à 1 atmosphère tandis que la théorie de Streamer est valable pour les hautes pressions (≥ 1 atm).

Phase 1 : Un électron primaire situé près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire.

Phase 2 : Les électrons sont absorbés par l'anode tandis que les ions positifs bombardent la cathode avec leur énergie cinétique pour extraire des électrons secondaires.

Phase 3 : Les électrons (secondaires) émis de la cathode par bombardement créent de nouvelles avalanches secondaires et provoquent le claquage du gaz.[4].

II.3.1 Modélisation de la décharge de TOWNSEND

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 planent à une distance d l'une de l'autre contenant un gaz à la pression P avant le claquage.

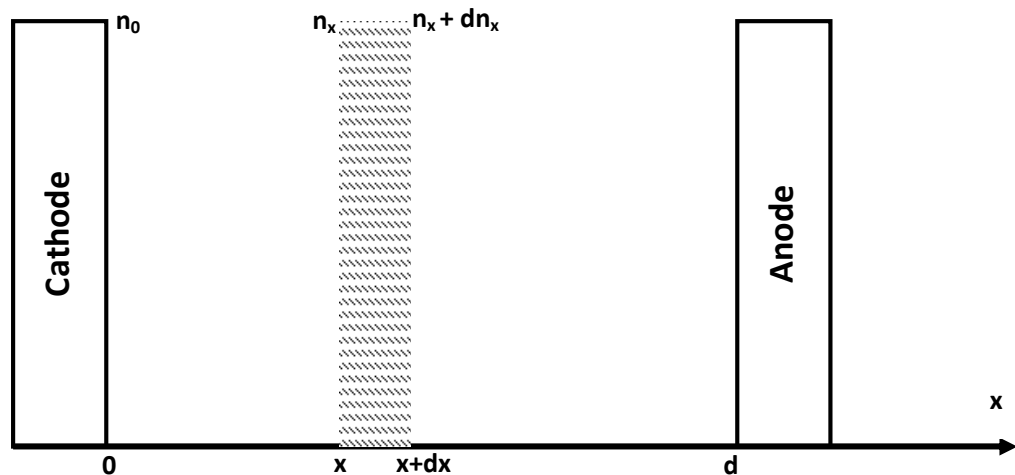


Figure II - 3. : Modélisation de la décharge de townsend

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 :

$$dn_x = \alpha n_x dx \quad (\text{II-1})$$

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

$$\frac{dn_x}{n_x} = \alpha dx \quad (\text{II-2})$$

L'intégration

$$\int \frac{dn_x}{n_x} = \int \alpha dx \Rightarrow \ln(n_x) = \alpha x \quad (\text{II-3})$$

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

$$n_x = A e^{\alpha x} \quad (\text{II-4})$$

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 se simplifiera pour s'écrire :

$$n_x = A e^{\alpha x} \quad (\text{II-5})$$

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 :

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (\text{II-6})$$

Le nombre d'électrons à la distance d est :

$$n_d = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{II-7})$$

Le courant mesuré est donné par

$$I_d = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{II-8})$$

Où :

I_0 : est le courant photoélectrique initial à la cathode

Par conséquent, en moyenne chaque électron laissant la cathode produite: nouveaux électrons (et ions correspondant) dans l'espace inter électrodes.

$$\frac{n_d - n_0}{n_0} \quad (\text{II-9})$$

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 :

$$n_x = n_0 e^{\int (-) dx} \quad (\text{II-10})$$

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 :

$$n_{+0} = n_d - n_0 = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{II-11})$$

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 :

$$n_{\text{arra}} = n_{+0} = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{II-12})$$

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.

$$n_{arra} \geq n_0 \Rightarrow (e^{\alpha \cdot d} - 1) \geq 1 \quad (\text{II-13})$$

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

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{II-14})$$

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

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 $e^{\alpha \cdot d}$ 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 $e^{\alpha \cdot d}$ électrons secondaires.

Si $e^{\alpha \cdot d} < 1$, 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 sources extérieure est interrompu.

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

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

II.3.2 Caractéristique de TOWNSEND

Les électrons primaires sont extraits artificiellement de la cathode grâce à des rayons UV. La cathode émet n_0/s électrons.

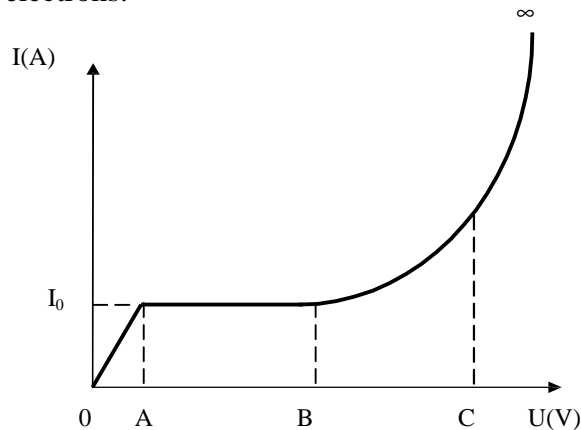


Figure II - 4. : Caractéristique de Townsend

Partie OA : $I=f(U)$ droite $\Rightarrow U=RI$ (Loi d'Ohm);

R : résistance du gaz.

Le courant est dû au déplacement des n_0 électrons primaires

Partie AB : $I= I_0$ courant de saturation.

Le courant de saturation est dû au déplacement des n_0 électrons primaires. Même si la tension augmente, la cathode ne peut fournir plus de n_0 électrons/s \Rightarrow saturation. Le courant de saturation dans l'air est atteint à de faibles valeurs de champ électrique. Quand l'intervalle entre les électrodes est de 10 mm, la saturation est obtenue à seulement 0,5 V/m.

Partie BC ($U>U_B$) : croissance exponentielle de I . Puisque le courant I augmente, il y a d'autres charges qui sont produites en plus des électrons primaires. Ces nouvelles charges sont créées car les électrons primaires ont l'énergie cinétique nécessaire pour provoquer des avalanches primaires.

Partie C- : I devient infini \Rightarrow Claquage.

Les ions positifs auront l'énergie nécessaire pour extraire de la cathode quelques électrons secondaires qui provoquent des avalanches secondaires, et produire le claquage. U_c : tension critique de claquage.[4]

II.4 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 $E = V/d$. [5].

En utilisant le phénomène de décharge de Townsend on a l'équation :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{II-15})$$

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

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \Leftrightarrow e^{\alpha d} = \frac{1}{\gamma} + 1 \Leftrightarrow \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (\text{II-16})$$

On peut déterminer de manière expérimentale pour obtenir :

$$\alpha = P \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-BP}{E}\right) \quad (\text{II-17})$$

Où :

P : est la pression du gaz,

A et B sont des constantes connues.

En remplaçant la valeur de α dans (II-16) on obtient :

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = PdA \exp\left(\frac{-B \cdot P}{E}\right) \Leftrightarrow \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(PdA) - \frac{BP}{E} \quad (\text{II-18})$$

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

Où

V est la tension appliquée.

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

En substituant pour E on obtient :

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(PdA) - \frac{BPd}{V} \quad (\text{II-19})$$

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

$$Vd = \frac{B.P.d}{\ln(P.d.A) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma_j} + 1\right)\right)} \quad (\text{II-20})$$

$$B = \frac{\sigma.V}{K.T}, \quad A = \frac{\ln 2.\sigma}{K.T} \quad (\text{II-21})$$

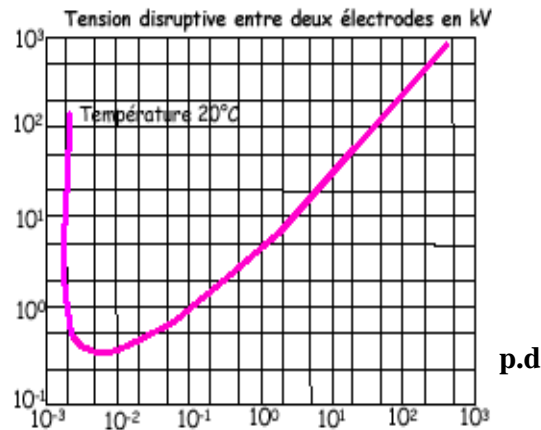


Figure II - 5. : Courbe de Paschen

Ces courbes montrent que VS 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.[5].

II.5 Décharge couronne

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, 30 kV/cm), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse.

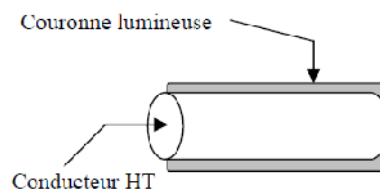


Figure II - 6. : Couronne lumineuse

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U = 400$ 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, ...).

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 $U = 750$ 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.[6].

II.5.1 Cas d'une pointe négative

Un électron voisin de la pointe crée une avalanche. Les ions positifs sont attirés dans le sens du champ et se précipitent sur la pointe (Figure. II-7). Des électrons sont extraits de la cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche qui s'en dégage. Ces avalanches ont une extension limitée. D'une part, le champ décroît rapidement dès qu'on s'éloigne de la pointe vers le plan collecteur. D'autre part, les avalanches qui se développent laissent derrière elles les ions positifs moins mobiles qui font écran entre les électrons et la pointe. Cette deuxième cause d'affaiblissement du champ vient renforcer la première.

Un nuage d'ions positifs est formé par les avalanches d'électrons. Quand le nuage positif est développé de manière suffisante, les avalanches arrêtent de se produire parce que le champ est très affaibli au-delà. Les ions positifs sont attirés par la pointe, donc ils sont neutralisés par la pointe si bien que la zone positive dont nous avons vu la formation disparaît. L'effet d'écran disparaît quand tous les ions positifs ont été captés par la pointe ; on a, à nouveau, le champ initial et le phénomène recommence. Il a donc une allure cyclique, la durée du cycle étant égale au temps mis par la couche positive pour être balayée par la pointe.

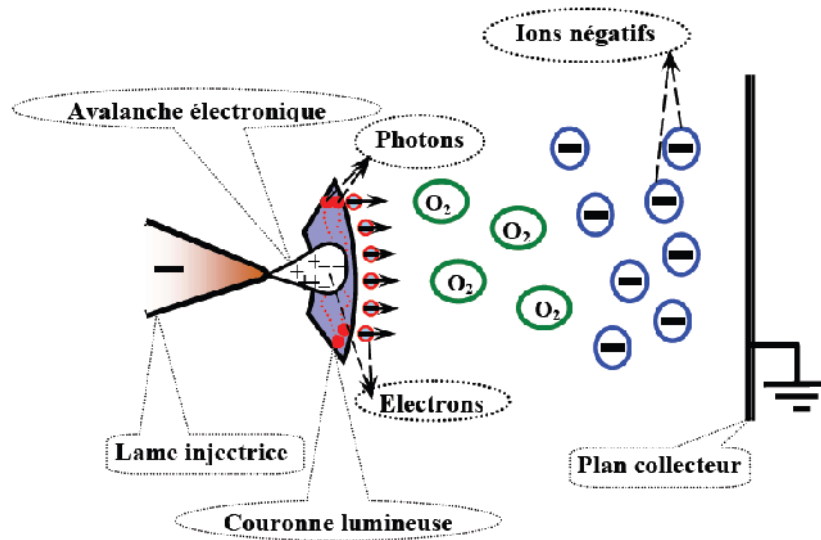


Figure II - 7. : Cas d'une pointe négative

a) Apparence lumineuse :

Un courant de particules négatives part de la pointe vers le plan, il atteint 1 à 100 μA . On obtient (avec une pointe) une zone lumineuse en forme de champignon qui a la couleur bleue violacée dans l'air. Cette couleur est due au spectre de l'azote et des composés oxygénés. Dans le cas d'un fil, celui-ci est bordé de petits champignons. Une gaine sera formée autour du fil quand on augmente la tension.

b) Influence de la nature du gaz :

Dans l'oxygène, les électrons une fois éloignés de la pointe s'attachent aux molécules neutres ; si les électrodes sont éloignées, on doit augmenter la tension appliquée car la mobilité des ions est limitée. Dans un gaz comme l'azote, la tension appliquée est beaucoup plus faible parce que les électrons restent libres par suite de leur grande mobilité. Pour une distance de 10cm entre la pointe et le plan, et un courant de 50 μA , il faut :

- Dans l'air à la pression atmosphérique : 50 kV.
- Dans l'azote très pur et à la même pression : 5 kV.

Cette propriété est utilisée pour apprécier la pureté de l'azote (ou du moins la proportion d'oxygène restant). Toutefois quelle que soit la nature du gaz et la distance des électrodes, une tension de 1 kV à 2 kV au moins est toujours nécessaire pour entretenir le phénomène.

c) Stabilité du phénomène :

Ce phénomène d'effluve négatif ne s'étend qu'à une faible distance de la pointe, donc pas question de formation d'un canal entre électrodes ; on peut réduire leur distance sans qu'il se produise d'étincelle. Parce que l'étincelle se produit quand elle part d'une pointe positive, l'effluve négatif ne tourne pas de lui-même à l'étincelle. C'est un phénomène stable qui se confine au voisinage de la pointe.

II.5.2 Cas d'une pointe positive

Le phénomène est plus complexe dans ce cas parce que la zone du champ électrique intense n'est pas juxtaposée à la source des électrons. Les électrons qui sont au voisinage de la pointe produisent des avalanches, mais quand les électrons arrivent sur la pointe, ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène. La cathode ne joue pas le rôle de pourvoyeuse des électrons car cette cathode est située très loin de la zone où le champ électrique est intense. Si le champ est assez fort, les électrons germes produits sous l'action du rayonnement ultraviolet émis par une avalanche créent des nouvelles avalanches. Le champ est renforcé par l'avalanche, mais la formation d'une chaîne entre électrodes est peu probable, le champ devenant trop faible au voisinage de la cathode.

a) Apparence lumineuse :

Les avalanches se propagent soit radialement sous la forme de canal comme dans les étincelles ordinaire, soit latéralement si la décroissance du champ est très rapide pour que le canal se forme ; donc deux apparences sont tout à fait différentes. Dans le premier cas on voit des canaux qui partent de la pointe positive, ces canaux se ramifient, ils forment un pont entre les électrodes. Chaque rameau est une chaîne d'avalanches qui se propagent comme celles de l'étincelle mais par effet photoélectrique uniquement. Le phénomène s'accompagne d'un grésillement de fréquence audible. C'est l'effluve positif.

Dans le deuxième cas, l'anode est recouverte d'une couche luminescente homogène. Pour une forte distance entre électrodes, le champ est très faible; les chaînes d'avalanches atteignent la cathode et on n'observe pratiquement que des étincelles. Quand les canaux n'atteignent pas la cathode, le courant est encore transporté par des particules d'un seul signe, les ions positifs.

b) Stabilité du phénomène :

Une succession d'avalanches se forment dans une certaine zone de tension. Mais il est quand même difficile d'obtenir un phénomène stable.

II.5.3 Loi de PEEK- champ critique

Pendant longtemps La loi de Peek à été utilisée pour la détermination du champ critique au niveau des lignes aériennes de transport d'énergie, on peut déduire que E_{cc} dépend outre de la nature du gaz de remplissage, des caractéristiques des électrodes et des conditions atmosphériques.

a) Conducteur lisse

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

$$E_{cc} = E_s \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (kv/cm) \quad (II-22)$$

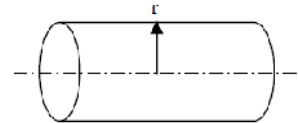


Figure II - 8. : Conducteur aérien

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

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

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

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

Où

$E_s = 30$ kV/cm ;

r (cm) : rayon du conducteur ;

P (cm Hg) : pression en mm de mercure ;

t ($^\circ\text{C}$) : température ;

$k = 0,308$.

b) 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 $E_0 = m E_{cc}$

avec $0 < m < 1$: coefficient de surface.

Tableau II-1 Facteur de surface selon la géométrie des conducteurs

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...).

II.5.4 Pertes couronne dans les réseaux

a) Nature des pertes

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- **Polarité positive** : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions positifs.
- **Polarité négative** : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives. tout se passe comme si le conducteur émet des ions négatifs.

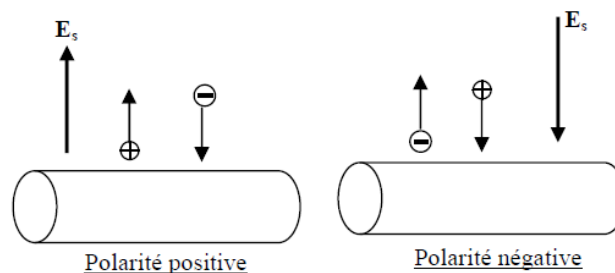


Figure II - 9. : Polarité positive et polarité négative

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 $\Delta P \cong 100 \text{ kW/km}$.

b) 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.

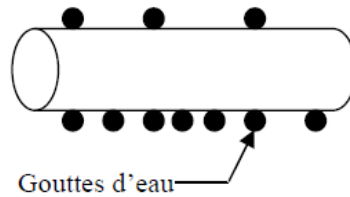


Figure II - 10. : Influence de la pluie

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.

II.5.5 Perturbation électromagnétique

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.

II.5.6 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 le paramètre principal à prendre en considération lors de la réalisation de réseaux THT ($U > 1000 \text{ kV}$).

II.5.7 Dégagement 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.

II.5.8 Solutions contre l'effet de couronne

Le champ électrique superficiel E_s produit à la surface d'un conducteur cylindrique peut être calculé par le théorème de Gauss : $E_s = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r}$

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 (cher)
- soit un conducteur en faisceaux (il permet en plus de faire transiter une plus grande puissance).[6].

Conducteur en faisceaux :

$$R_{\text{equ}} = R^n \sqrt{\frac{nr}{R}} \text{ avec } D = 2R \sin \frac{\pi}{n} \tag{II-23}$$

Avec n nombre de conducteurs ;

R_{equ} rayon équivalent qu'aurait un conducteur central dans cette cellule.

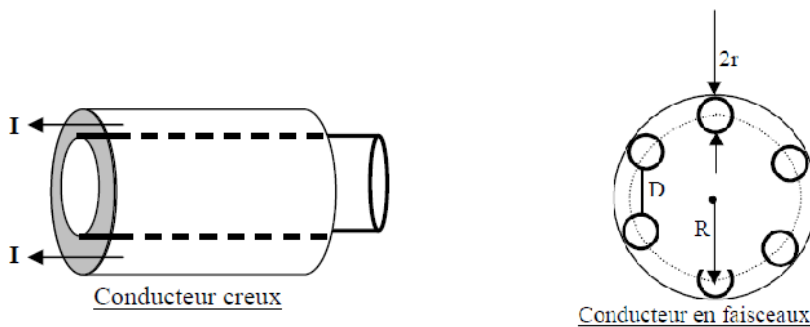


Figure II - 11. : Conducteur creux et conducteur en faisceaux

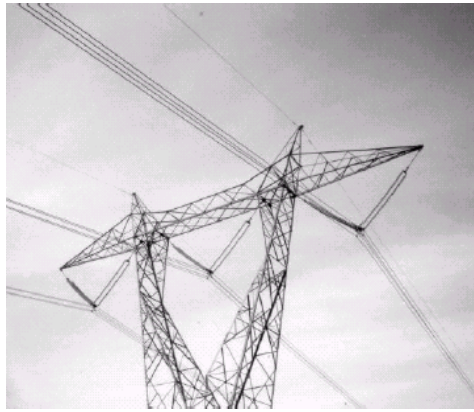


Figure II - 12. : Conducteurs en faisceaux

- Pour diminuer l'effet de couronne, on remplace le conducteur de phase par un groupe de conducteurs maintenus à une certaine distance (par des entretoises). Cette technique permet d'augmenter artificiellement le rayon r_{eq} équivalent pour le calcul de l'effet de couronne. Le principal but de cette disposition est de réduire le champ électrique à la surface des conducteurs en dessous de la limite d'ionisation, et d'éviter ainsi l'effet de couronne. En effet, si le rayon équivalent r augmente alors E diminue ($E = q/2r$ où q est la charge superficielle par unité de longueur, en C/m).

- Utilisation d'anneaux d'équilibrage de potentiel (Figure. II-14).

- Des espaceurs (Figure. II-15) sont utilisés entre conducteurs de phase afin d'éviter la réduction de la distance entre elles en cas de vents violents. [7].

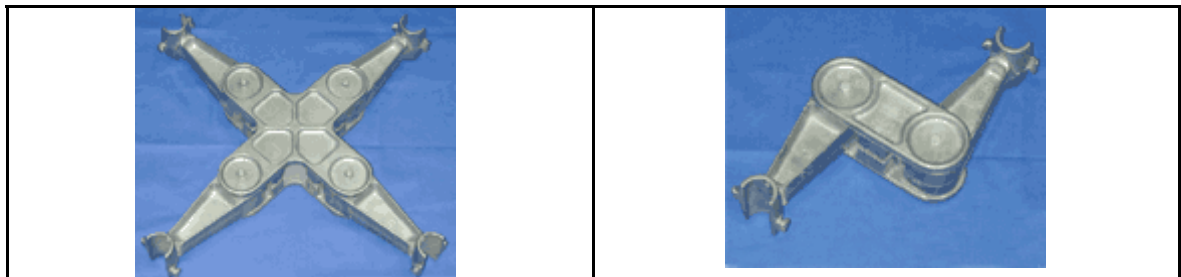


Figure II - 13. : Entretoises utilisées par Hydro-Quebec



Figure II - 14. : Utilisation des anneaux de gardes.



Figure II - 15. : Essais des nouveaux espaceurs sur la ligne expérimentale d'essais mécaniques de l'IREQ et installation en réseau en novembre 2000.

II.5.9 Avantage de la décharge couronne dans le réseau

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.

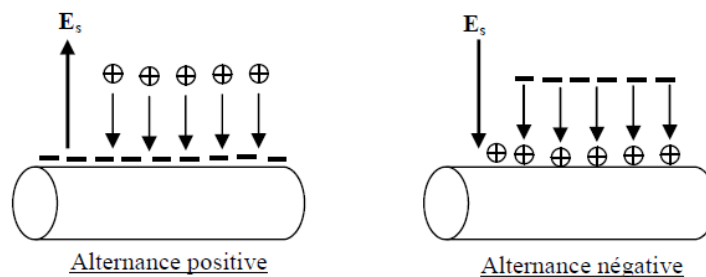


Figure II - 16. : L'effet de couronne et régulation de tension

II.5.10 Applications utilisant la décharge couronne

a) 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 (Figure II-17).

b) 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.

c) *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 (Figure II-18).

d) *Séparateur électrostatique*

Un mélange de particules granuleuses acquiert 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 (Figure II-19).

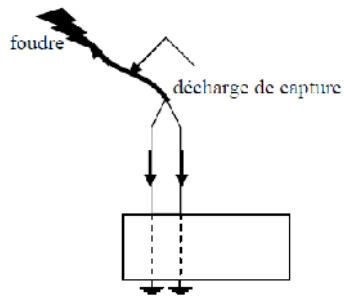


Figure II - 17. : Parafoudre

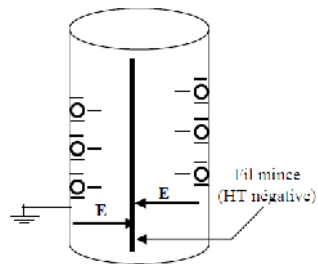


Figure II - 18. : Neutralisation

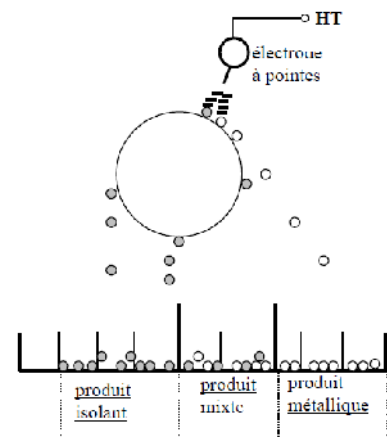


Figure II - 19. : Séparateur électrostatique

Chapitre III :

Les dépoussiéreurs électrostatiques

Chapitre III : Les dépoussiéreurs électrostatiques

III.1 Filtrage électrostatique

Le principe de fonctionnement des précipitateurs électrostatiques est basé sur l'action du champ électrique sur les charges ou les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir ; donc ces forces sont des forces séparatrices. Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également dépoussiéreurs électrostatiques). Les électrofiltres traitent des fumées de charbon, l'air pollué, des brouillards d'huile, des fumées de soudage, des gaz évacués par les moteurs diesels, etc...[8][9].

III.2 Les dépoussiéreurs électriques

Les dépoussiéreurs électriques extraient les particules fines présentes dans l'air en communiquant une charge électrique aux particules. Les particules sont donc attirées vers une plaque portant une charge contraire. Les dépoussiéreurs électriques sont très efficaces pour prélever les particules fines, mais ils ne peuvent être utilisés pour les opérations très poussiéreuses car ils se bouchent facilement.

Ils peuvent extraire efficacement les odeurs et les particules fines, mais pas les gaz ni les vapeurs présents dans l'air. Les dépoussiéreurs électriques ne doivent pas être utilisés près de produits chimiques inflammables parce qu'ils peuvent causer une explosion s'ils produisent la moindre étincelle. Ils sont couramment employés dans les opérations de combustion du charbon et d'extrusion du plastique, ainsi que dans l'exploitation de mines de métaux.

Les dépoussiéreurs électrostatiques sont de plusieurs types :

- Electrofiltres à un seul étage qui sont les plus utilisés dans les applications industrielles à cause de leur construction simple et de leur robustesse.
- Electrofiltres à deux étages qui ont une construction plus compliquée et des dimensions réduites. Ils sont utilisés principalement pour la filtration de l'air ambiant dans certains bâtiments et halles de production. Ces séparateurs sont aussi utilisés dans le cas des fumées faiblement chargées. Les configurations les plus utilisées des électrofiltres à un seul étage sont: fil injecteur sur l'axe d'un cylindre, nappe de fils entre deux plaques parallèles ou ensembles d'électrodes ionisantes du type représenté dans la (**Figure III-1**).[10].

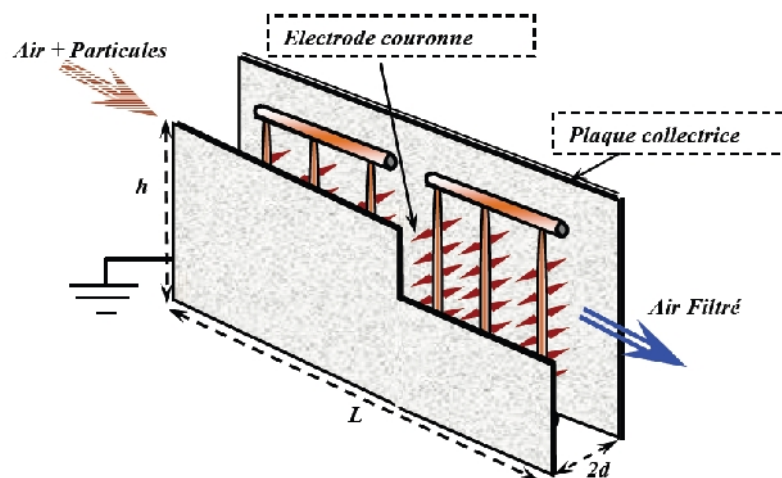


Figure III - 1. : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes

Le dépoussiéreur électrostatique montré sur (figure III-1) se compose d'un ensemble de cylindres conducteurs sur lesquels il y a des électrodes pointues ; ces électrodes, au potentiel V_{appl} , sont situées à mi-distance des deux électrodes planes parallèles qui sont au potentiel 0. Des décharges couronne se forment au voisinage de l'extrémité des pointes et les ions qui ont la même polarité que la pointe sont repoussés vers le plan. Cela conduit à la formation d'une charge d'espace ionique ayant une densité très forte à proximité des pointes et qui décroît vers le plan collecteur.

Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz. Ainsi, les particules dans le gaz ou l'air seront chargées en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale. Ces particules sont soumises à la force électrique et se dirigent vers le plan où elles s'accumulent en formant une couche qui adhère à la paroi. Ces couches sont détachées par le frappage de l'électrode plane ou emportées par lavage. L'air ou le gaz filtré sort de l'autre côté de l'électrofiltre.

En dehors de cette technique d'élimination ou de la récupération des poussières nuisibles, on peut utiliser la charge d'espace ionique pour charger et projeter sur un objet des particules ou gouttelettes de peinture ou des fibres textiles. Les vastes applications des filtres électrostatiques dans le domaine industriel ou dans le domaine de la pollution de l'air, posent des questions sur l'efficacité de collecte et sur le rendement industriel et économique de la précipitation électrostatique. Donc il faut bien comprendre le fonctionnement de ces appareils et les phénomènes physiques qui gouvernent cette application parce que la précipitation

électrostatique met en jeu des phénomènes électriques, aérauliques et mécaniques des suspensions qui sont étroitement liés.

Afin de connaître le comportement dans le temps des particules chargées, il est nécessaire de déterminer leurs trajectoires en fonctions des données électriques et mécaniques. Le fonctionnement d'un électrofiltre est efficace seulement si les particules ont une résistivité électrique suffisamment élevée ; les électrofiltres ne peuvent pas collecter les poussières métalliques ou les particules en présence de vapeur d'eau, cas dans lesquels la conductivité électrique des particules est trop importante. Plusieurs paramètres jouent des rôles importants sur l'efficacité du précipitateur électrostatique : la géométrie du dispositif, la nature des gaz utilisés, la forme des électrodes injectrices et collectrices, etc....

III.3 Les filtres à air ou un dépoussiéreur

Dans un système de ventilation, un filtre à air ou un dépoussiéreur extrait ou capte les contaminants présents dans l'air. Le type de filtre à air ou de dépoussiéreur qu'il convient d'utiliser dépend :

- du type de contaminants à extraire;
- de la concentration de contaminants dans l'air;
- de la quantité de contaminants à extraire pour satisfaire aux règlements et aux normes; des contraintes liées à la sécurité incendie et à la prévention des explosions;
- des règlements en vigueur sur la lutte contre la pollution de l'air.

III.4 Les filtres à air et les dépoussiéreurs à l'extraction des particules

Les filtres à air et les dépoussiéreurs adaptés à l'extraction des particules (suspension dans l'air de fines particules solides ou liquides telles que poussières, brouillards, émanations, brume, fumées ou pulvérisations) comprennent :

- les dépoussiéreurs à couche filtrante;
- les dépoussiéreurs centrifuges;
- les dépoussiéreurs électriques ou filtres électrostatiques;
- les collecteurs de poudre humide et dépoussiéreurs par voie humide.

III.5 Le choix d'un filtre à air ou d'un dépoussiéreur

Voici quelques conseils pour choisir un filtre à air ou un dépoussiéreur dans un lieu de travail. Se rappeler qu'un professionnel qualifié doit prendre les décisions finales en ce qui concerne la pertinence d'un filtre à air ou d'un dépoussiéreur précis.

- Avant de choisir le filtre à air ou le dépoussiéreur, il est très important d'en connaître les exigences de maintenance et d'accès qui s'y rattachent, les dimensions de l'équipement visé, la façon dont il sera installé dans l'usine ainsi que les méthodes d'extraction des contaminants prélevés.
- Le filtre à air ou le dépoussiéreur doit être fiable. Beaucoup d'installations exigent une surveillance ou une vérification continue des opérations assurée par la mesure des paramètres de fonctionnement du système.
- Les coûts de maintenance et d'exploitation doivent être considérés. Le filtre à air ou le dépoussiéreur doit être en mesure de fonctionner dans des conditions stables et dans des conditions variables, comme le démarrage et l'arrêt de l'usine. On doit également déterminer si le système choisi doit être accessible pour la maintenance ou s'il doit continuer de fonctionner pendant que s'effectuent la maintenance ou les réparations requises.
- Le filtre à air ou le dépoussiéreur doit satisfaire aux règlements locaux et nationaux (au démarrage et pendant l'utilisation).

III.6 Filtres électrostatiques Série 60 et 120

Les séries 60 et 120 sont des filtres à air industriels spécifiquement conçus pour éliminer les agents polluants dans l'air, tels que la fumée de tabac, la poussière, le pollen et Les bactéries dans les pièces et les lieux où les gens travaillent ou se détendent. Ils sont prévus pour se monter sur un plafond plein, semi-encastrés dans un plafond suspendu ou au mur (le 60 uniquement). Lorsque nécessaires, ils peuvent aussi introduire de l'air frais supplémentaire.

Leurs caractéristiques les rendent parfaits pour l'installation dans des lieux tels que les bureaux, les salles de conférence, les restaurants, les zones pour fumeurs, les établissements et d'attentes ou tout autre endroit où se réunissent de nombreuses personnes.

III.6.1 Le fonctionnement

Les séries 60 et 120 utilisent le principe de la précipitation électrostatique. L'air est aspiré par l'ouverture d'admission, passe à travers un pré-filtre en métal qui retient les grosses particules de poussière et les fibres. Les particules restantes, certaines ne faisant que 0,01 micron*, passent à travers un fort champ électrique (section ionisante) où elles reçoivent une charge électrique. Les particules chargées passent sur une série de plaques parallèles espacées également (section du collecteur). Chaque plaque alternée est chargée de la même polarité que les particules, qui sont repoussées, tandis que les plaques intercalaires sont mises à la terre et donc attirent et recueillent les particules.

* Le diamètre d'un cheveu humain est d'environ 100 microns.

III.6.2 Le système du filtre

L'appareil est composé de deux filtres:

Le PRE-FILTRE: C'est le filtre mécanique qui se trouve derrière la grille d'entrée. Il est conçu pour enlever les grosses particules et peut être nettoyé de nombreuses fois avant d'être remplacé.

Le FILTRE ELECTROSTATIQUE: C'est l'ensemble profond en aluminium, situé juste derrière le pré-filtre, c'est le noyau de l'appareil. Il utilise une charge électrostatique pour enlever des particules si petites qu'il en faudrait plusieurs millions pour recouvrir une tête d'épingle. Lorsqu'il est sale, il se lave et peut être réutilisé indéfiniment.

III.6.3 Choix de l'emplacement

Lors du positionnement, il ne faut jamais oublier qu'il est toujours beaucoup plus facile de souffler de l'air que de l'aspirer. Ainsi, il faut placer l'appareil de façon à ce qu'il rejette l'air propre dans l'endroit sale, ce qui fera recirculer l'air sale vers l'appareil. Au cas où il y ait plusieurs appareils, il faut les placer de façon à ce qu'ils s'entraident à faire circuler l'air dans la pièce et qu'ils n'agissent pas en opposition les uns aux autres. Il s'avère cependant que souvent l'emplacement est déterminé par la place disponible, les commentaires ci-dessus sont donc donnés à titre indicatif uniquement. En cas de doute, consulter le fournisseur.

III.6.4 Spécification

Tableau III – 1 Spécification

	Aire série 60	Aire série 120
Circulation de l'air	Sortie multiple	Sortie multiple
Poids de l'appareil	19 Kg	36 Kg
Dimensions	Profondeur 242 mm Largeur 572 mm Longueur 572 mm	Profondeur 242 mm Largeur 572 mm Longueur 1144 mm
Consommation électrique	0,9 Ampère 130 Watts	1.6 Ampère 240 Watts
Alimentation	230 Volts 50 Hz monophasé	230 Volts 50 Hz monophasé
Commande	Commande à distance Par fil à 3 vitesses avec dispositif de séchage forcé par air Voyant lumineux d'alimentation de la cellule	Commande à distance Par fil à 3 vitesses avec dispositif de séchage forcé par air Voyant lumineux d'alimentation de la cellule
Caractéristique de sécurité	Interverrouillage de la porte d'accès à la cellule	Interverrouillage de la porte d'accès à la cellule
Caractéristiques	Circuit anti-arc Entrée d'air frais Séchage forcé par air	Circuit anti-arc Entrée d'air frais Séchage forcé par air
Option	Commande à distance infrarouge Système à registre variable pour l'air frais	Commande à distance infrarouge Système à registre variable pour l'air frais

III.6.5 Entretien et maintenance

A part un nettoyage occasionnel avec un chiffon humide, les appareils ont besoin de très peu d'entretien.

Ils sont cependant conçus pour recueillir la poussière de l'air et de temps à autres, il faudra enlever l'accumulation de saleté.

L'intervalle entre les entretiens varie selon les applications mais en règle générale, il faudra les effectuer toutes les six semaines dans un bar très fréquenté ou l'on pourra attendre plusieurs mois dans un bureau tranquille.

Lors de son fonctionnement normal, il se pourra que l'appareil émette parfois un bruit de claquage. Ceci est provoqué par l'accumulation de grosses poussières sur le filtre électronique et ne présente aucun danger. Les Séries 60 et 120 ont des circuits anti-arc afin d'éliminer le problème des décharges continues. Si les décharges se produisent toutes les minutes ou deux, c'est que l'appareil a besoin d'être nettoyé.

Lorsqu'il faut effectuer l'entretien, procéder comme suit:

- a. Enlever le pré-filtre et le nettoyer à l'aspirateur ou le laver ainsi que décrit ci-après.
- b. Pour nettoyer le filtre électronique, le faire tremper dans une forte solution chaude (non bouillante) de détergent pas de nettoyant caustique.
- c. Un lave-vaisselle peut être aussi une excellente solution. Après avoir trempé pendant plusieurs heures, enlever le filtre et le rincer à l'eau propre. Ne pas essayer de frotter physiquement la saleté car cela risquerait d'endommager le filtre.
- d. Bien laisser sécher le filtre - de préférence toute la nuit - et le remettre en place dans l'appareil ou bien le faire sécher dans l'appareil en utilisant la fonction de séchage.

III.6.6 Vues éclatées

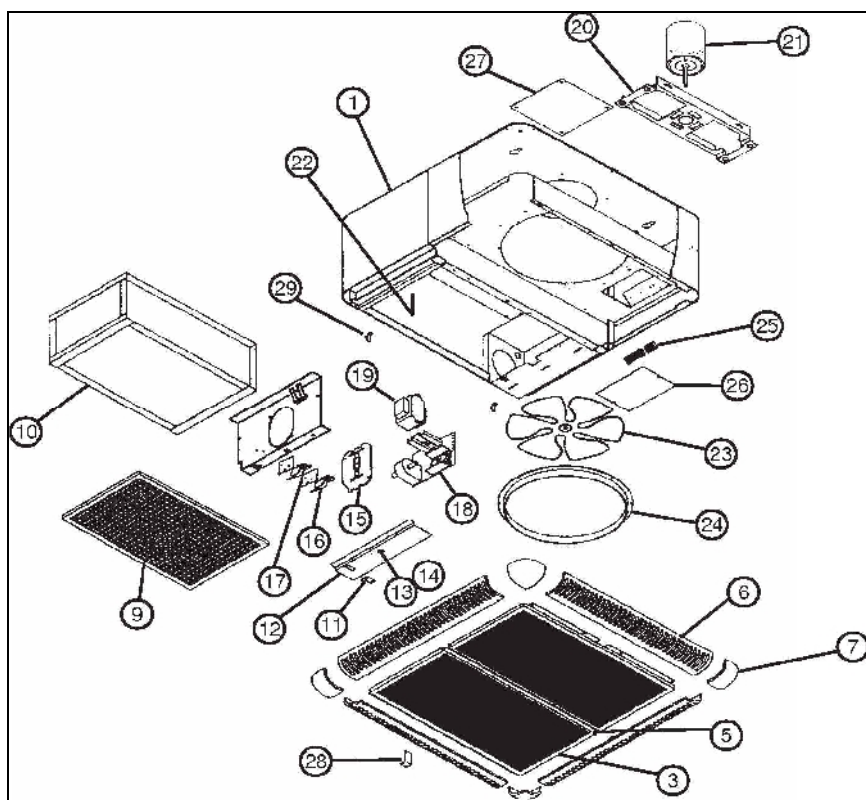


Figure III - 2. : Vue éclatée de Air série 60

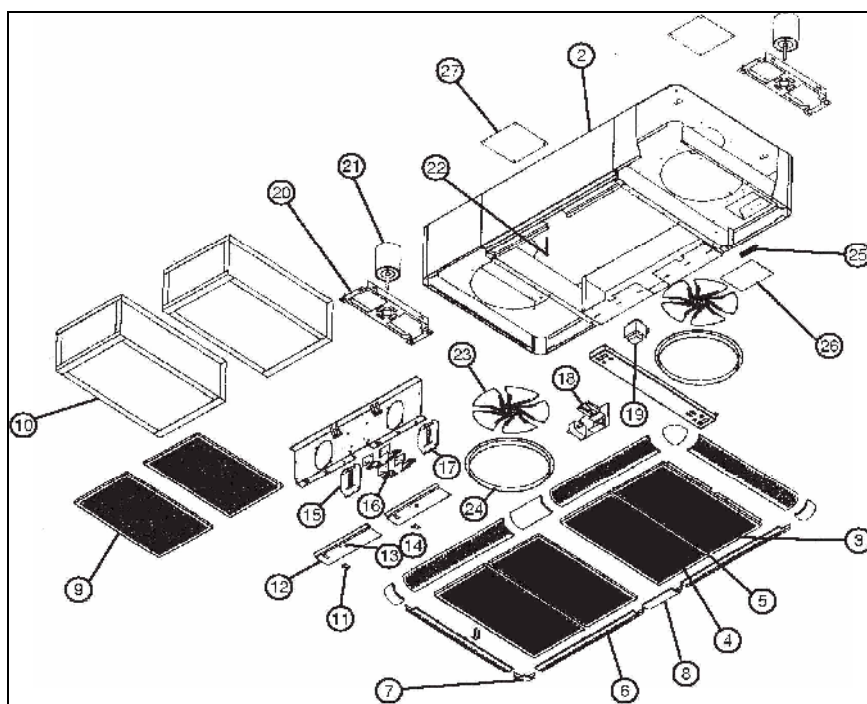


Figure III - 3. : Vue éclatée de Air série 120

Tableau III – 2 Listes de pièces

Numéro	Description
1	Ensemble de l'armoire 60
2	Ensemble de l'armoire 120
3	Couvercle d'accès à la cellule
4	Couvercle d'accès à la cellule
5	Tige de charnière
6	Grille
7	Coin
8	Filtre de grille
9	Pré-filtre
10	Ensemble cellule collecteur
11	Clips de retenue de cellule
12	Verrouillage de cellule
13	Vis à mollette
14	Retenue de boulon
15	Ensemble de contact de cellule

16	Interrupteur d'interverrouillage
17	Isolateur
18	Bloc d'alimentation
19	Transformateur réducteur
20	Support de montage de moteur
21	Moteur, 230/50Hz
22	Contact de terre
23	Ventilateur
24	Anneau d'entrée
25	Bloc de terminaux
26	Couvercle de bloc de terminaux
27	Plaque de couvercle de conduite
28	Activateur d'interrupteur d'interverrouillage
29	Fermeture de couvercle d'accès

III.6.7 Schéma de câblage

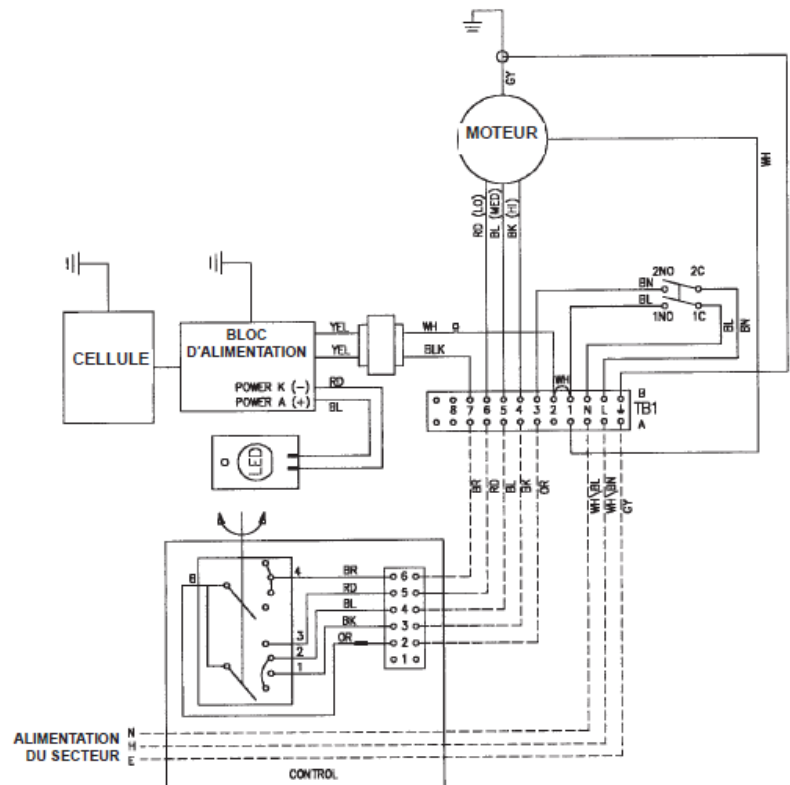


Figure III - 4. : Schéma de Air série 60

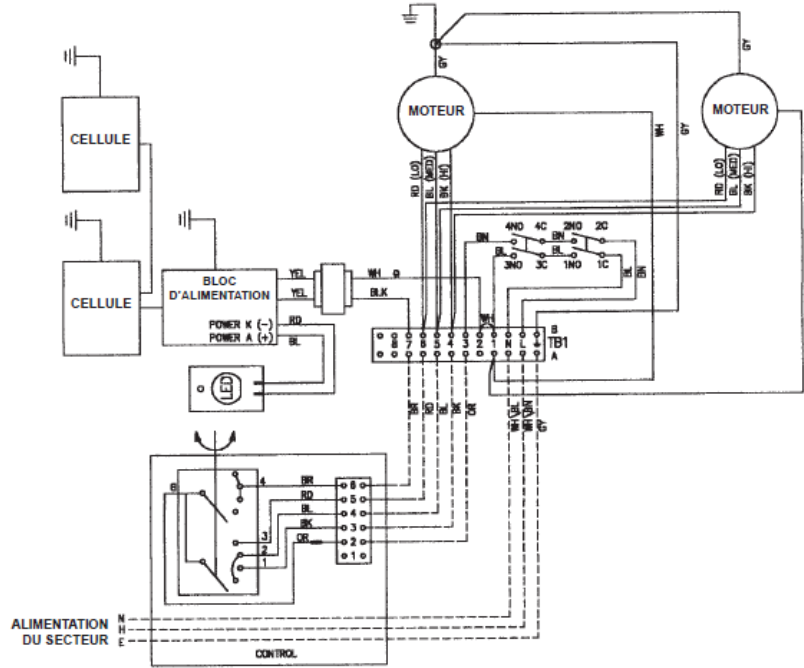


Figure III - 5. : Schéma de Air série 120

III.6.8 Vues du montage



Figure III - 6. : Fermeture d'accès à la cellule

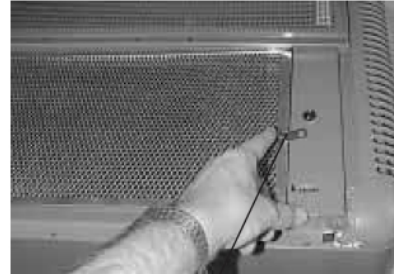


Figure III - 9. : Clips de pré-filtre



Figure III - 7. : Vis de retenue de filtre



Figure III - 10. : Plaque de retenue de filtre



Figure III - 8. : Entrée du câble



Figure III - 11. : Bloc de terminaux

Conclusion générale

Conclusion générale

Les rejets industriels à traiter que nous considérons ici, consistent principalement en des particules solides ou des gouttelettes en suspension dans l'atmosphère. Une excellente épuration des polluants est obligatoire pour limiter la pollution atmosphérique. Il est plus que jamais nécessaire d'améliorer les techniques de filtration existantes et de trouver des alternatives aux procédés classiques de traitement des rejets industriels.

Malgré leur excellente efficacité en termes de masse de matière collectée, les électrofiltres ont des performances insuffisantes pour les particules de diamètre inférieur au micron ; ces fines particules sont les plus dangereuses pour la santé humaine car elles pénètrent très profondément dans les poumons. Puisque les lois sur l'environnement deviennent de plus en plus exigeantes en matière de rejets industriels, il faut donc améliorer ces précipitateurs. Pour ce faire, il convient de bien comprendre les phénomènes physiques mis en jeu, phénomènes qui recouvrent de nombreux champs : électrostatique, décharges dans les gaz, dynamique des fluides et électro-hydrodynamique (EHD), etc.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton** ; « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Ed Eyrolles, 1984, Paris. pp : 92-251.
- [2] **N. Felici**, "Diélectriques", Institut Polytechnique, Grenoble, 1966.
- [3] **N. Felici**, "*Recent advances in the analysis of dc ionized electric fields* ", Direct Current, Vol. 8, No 9 et 10(1963).
- [4] **T.W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, H. Winkelkemper**, "Breakdown of gases in uniform fields. Paschen curves for nitrogen, air and hexafluoride", Electro 32, pp. 70-74, 1974.
- [5] **Dupuy J.**, "Effet de couronne et champs ionisés", Revue Générale d'Electricité, 67, 2, pp. 85-104, 1958.
- [6] **E. Kuffel, W. S. Zaengl**; « High voltage engineering », Pergamon Press, G.B; 1^{ère} Ed; 1984. pp: 463-488.
- [7] **Parker K. R.**, "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, pp. 1-24, 1997.
- [8] **Oglesby S. & Nichols G. B.**, "Electrostatic precipitation", Marcel Dekker Inc., 1978.
- [9] **L. M. Dumitran**, "Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique", Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2001.
- [10] **D. Kind**, « An introduction to high voltage experimental technique », text book for Electrical Engineers, Friedr Vieweg & Sohn, 1978.