

Électricité statique

Principes. Problèmes. Applications

par **Claude MENGUY**

Chef de service au Laboratoire Central des Industries Électriques (LCIE)

1. Rappels d'électrostatique	D 1 035 - 2
1.1 Grandeurs fondamentales	— 2
1.2 Caractéristiques des milieux.....	— 4
1.3 Lois de l'électrostatique	— 5
2. Mesures des grandeurs fondamentales	— 5
2.1 Mesures de tension (ou de différence de potentiel)	— 6
2.2 Mesures de champ électrique	— 7
2.3 Mesures de charges électriques.....	— 7
3. Électrisation des matériaux	— 9
3.1 Électrisation aux interfaces solide-solide	— 9
3.2 Électrisation aux interfaces solide-liquide.....	— 11
3.3 Quelques autres modes d'électrisation	— 11
4. Nuisances et dangers de l'électricité statique	— 12
4.1 Problèmes mécaniques liés aux forces électrostatiques	— 12
4.2 Problèmes liés aux décharges électrostatiques.....	— 13
4.3 Décharge électrostatique et composants électroniques	— 13
4.4 Décharge électrostatique et risques d'inflammation ou d'explosion	— 15
4.5 Exemples de problèmes électrostatiques dans l'industrie	— 16
5. Principes de lutte contre l'électricité statique	— 17
5.1 Présentation	— 17
5.2 Suppression ou réduction de la génération de charges électriques statiques	— 17
5.3 Écoulement des charges électriques statiques à la terre	— 17
5.4 Protection contre les décharges électrostatiques	— 18
6. Moyens de lutte contre l'électricité statique	— 19
6.1 Classification des matériaux du point de vue de l'électrostatique.....	— 19
6.2 Conditions d'emploi des matériaux selon leurs caractéristiques.....	— 20
6.3 Méthodes de mesure du temps de demi-décharge et de l'aptitude à la charge d'un matériau	— 21
6.4 Matériaux et produits de lutte contre l'électricité statique	— 21
6.5 Mise en pratique de la lutte contre l'électricité statique	— 23
7. Applications de l'électricité statique	— 23
7.1 Générateurs électrostatiques.....	— 23
7.2 Électrophotographie.....	— 24
7.3 Peinture et poudrage électrostatiques.....	— 25
7.4 Dépoussiéreurs électrostatiques.....	— 25
7.5 Applications diverses	— 25
Pour en savoir plus	Doc. D 1 036

Les phénomènes d'électricité statique sont, souvent, assez mal connus des ingénieurs, même quand ils sont électriciens ou électroniciens. En effet, en électrostatique il convient de raisonner sur des **quantités de charges constantes**, alors que l'on est généralement plus familiers des sources de tension (V) constante ou des sources de courant (I) constant. Par ailleurs, l'influence de grandeurs externes telles que l'**humidité** ou la présence de traces d'**impuretés** rend fréquemment ces phénomènes difficiles à interpréter et leur

donne un caractère un peu mystérieux. Les notions de **conducteurs** et d'**isolants** prennent également, en électrostatique, une signification différente que celle qu'elles ont dans les domaines classiques du génie électrique.

Pour aider à mieux appréhender ces phénomènes, après avoir rappelé les notions fondamentales d'électrostatique (§ 1), nous décrivons l'origine du phénomène appelé **électrisation** (§ 3). Puis, nous dresserons un inventaire des nuisances et des dangers de l'électricité statique (§ 4), qui touchent la quasi-totalité des industries. Nous indiquerons, ensuite, comment lutter contre cette électricité statique nuisible (§ 5 et 6). Pour terminer, nous montrerons que l'industrie peut également tirer parti de l'électrostatique grâce à ses applications (§ 7).

1. Rappels d'électrostatique

Nous n'avons pas l'ambition de faire ici un cours complet d'électrostatique (cf. en [Doc. D 1 036], les ouvrages généraux et [1]). Nous nous contentons de rappeler les grandeurs fondamentales, les caractéristiques importantes des milieux, ainsi que les lois de l'électrostatique qui nous seront indispensables.

1.1 Grandeurs fondamentales

On suppose, pour ce rappel, que l'on opère **dans le vide**.

Historique

La première description connue de phénomènes d'électricité statique est due à Thalès de Milet, le plus ancien et le plus connu des sept Sages de la Grèce. Surtout célèbre pour ses travaux en géométrie et pour la prévision d'une éclipse de Soleil en 585 avant J.-C., c'est vers 600 avant notre ère qu'il décrit l'attraction de corps légers par un morceau d'ambre jaune (ἤλεκτρον en grec, a donné le mot électricité) préalablement frotté. Plus tard Platon, Pline l'ancien et Plutarque évoquent le phénomène mais sans lui trouver d'application.

■ Pour que l'électricité statique devienne une science, il faut attendre la fin du XVI^e siècle et William Gilbert (1540-1603), médecin de la reine d'Angleterre. Il fabrique le **premier électroscope** permettant de détecter l'électricité statique et classe les **corps en électriques et non électriques** selon qu'ils se chargent ou pas (nous verrons que, en fait, cela est incorrect).

■ La première véritable application peut être attribuée à Otto von Guericke (1602-1686) avec sa machine à boule de soufre. Il s'agit du **premier générateur électrostatique** grâce auquel il va produire des étincelles et étudier les phénomènes lumineux de la décharge. Il étudie également l'électrisation de différents minéraux et découvre la répulsion. Christian Huygens (1629-1695) perfectionne la machine de von Guericke en remplaçant la boule de soufre par une sphère d'ambre. Stephen Gray (1666-1736) montre que certains corps peuvent transmettre la *vertu électrique* : il les appelle conducteurs. Sa **classification en conducteurs et non conducteurs** remplace celle de Gilbert. Il montre, en particulier, qu'un conducteur isolé peut donner des phénomènes de décharge et découvrir l'**électrisation par influence** (donc sans contact).

■ Charles-François de Cisternay du Fay (1698-1739) met en évidence deux formes d'électricité : l'**électricité vitreuse** obtenue en frottant des corps transparents et l'**électricité résineuse** obtenue avec les corps opaques comme l'ambre.

■ La bouteille de Leyde, inventée par von Kleist (1700-1748) et Musschenbrock (1692-1761), permet d'accumuler l'électricité ; c'est le **premier condensateur**.

■ L'abbé Jean-Antoine Nollet (1700-1770) tient une place à part dans l'électrostatique. Ce n'est pas un grand savant, mais il popularise ces phénomènes en en faisant une distraction de salon. Un correspondant académique de l'abbé Nollet, Georg Matthias Bose (1710-1761) met au point, vers 1740, un générateur constitué d'un globe de verre tournant et d'un conducteur isolé qui collecte les charges du globe grâce à des crins de cheval. Il s'agit du **premier vrai générateur de courant continu**. Il sera perfectionné par un facteur d'instruments de physique, Jesse Ramsden (1735-1800), qui remplace le globe par un disque de verre et lui donne son nom. Des générateurs de Ramsden existent encore dans de nombreuses écoles.

L'expérience de Benjamin Franklin (1706-1790) est célèbre. Elle lui permet de capter l'électricité atmosphérique grâce à des cerfs-volants et d'inventer le **paratonnerre**. François Dalibard (1703-1799) réalise des expériences similaires en France.

■ L'étape suivante est fondamentale : c'est celle de la **métrologie des phénomènes électrostatiques**. Deux savants dominent cette période : Augustin Coulomb (1736-1806) en France et Henry Cavendish (1731-1810) en Angleterre. Les deux hommes s'opposent sur les hypothèses qu'ils posent pour expliquer les phénomènes mais leurs travaux expérimentaux font progresser l'électrostatique de manière très importante.

En 1785, Coulomb réalise une balance de torsion (figure 1) qui va lui permettre de mesurer la force s'exerçant entre deux charges. Cavendish introduit les notions d'électricité positive et négative, de capacité et de potentiel.

■ On voit qu'il s'est écoulé environ deux siècles entre les expériences de Gilbert et celles de Coulomb et Cavendish. En cette fin de XVIII^e siècle les physiciens commencent à faire circuler des courants électriques et vont découvrir rapidement le nouveau domaine scientifique qui s'ouvre à eux ainsi que les applications.

De l'électrostatique on passe à l'électrodynamique puis à l'électromagnétisme. Les progrès de ces deux sciences vont permettre de comprendre de manière définitive les **lois de l'électrostatique**.

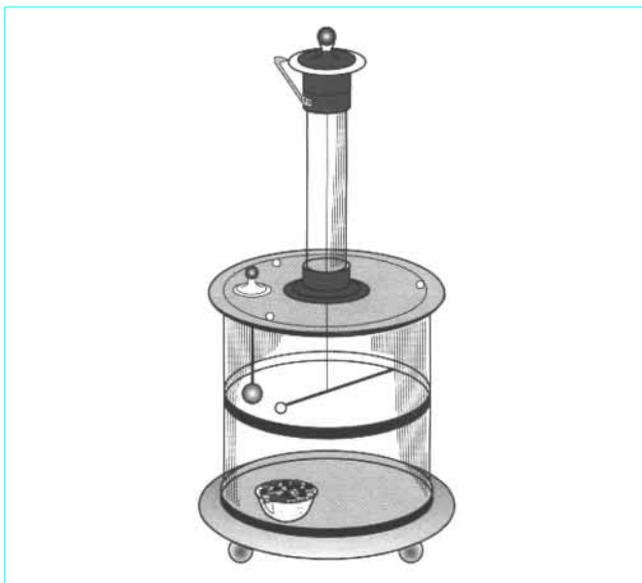


Figure 1 – Balance de torsion réalisée par Coulomb

1.1.1 Charge électrique

L'unité de quantité d'électricité ou charge électrique se définit à partir de la formule de Coulomb donnant la force F qui s'exerce entre deux charges ponctuelles q et q' séparées par une distance d , et dirigée selon la droite joignant les deux points ; cette **interaction**, qualifiée de **coulombienne**, est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance séparant les deux charges :

$$F = K \frac{qq'}{d^2} \quad (1)$$

Dans le système international, seul en vigueur aujourd'hui, les forces s'expriment en newtons, les distances en mètres et les charges électriques en coulombs ; cela conduit à :

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2)$$

avec ϵ_0 permittivité du vide :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (3)$$

Remarque : le coulomb, bien adapté à l'électrodynamique puisqu'un ampère correspond à l'écoulement d'un coulomb en une seconde, est moins bien adapté à l'électrostatique. Rappelons, à titre d'exemple, que la charge de l'électron est égale à $1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Nous sommes amenés, en **électricité statique**, à utiliser le microcoulomb (10^{-6} C), le nanocoulomb (10^{-9} C) et le picocoulomb (10^{-12} C).

1.1.2 Champ électrique

On peut définir le champ électrique à partir de l'interaction coulombienne. On considère que la force \vec{F} qu'exerce une charge q'

sur une charge q située à une distance d est due au champ électrique créé par q' au point où se situe q . C'est donc un vecteur \vec{E} tel que :

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (4)$$

D'après les formules (1) et (2), on trouve donc :

$$|\vec{E}| = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad (5)$$

1.1.3 Potentiel

L'unité de potentiel électrique est égale au travail effectué par une charge unitaire se déplaçant d'une distance unitaire dans un champ électrique unitaire. Pour une charge q se déplaçant d'une distance élémentaire dx dans un champ E on a donc une variation de potentiel :

$$dV = Fdx = -qEdx \quad (6)$$

Nota : le signe $-$ résulte des conventions choisies pour l'orientation du champ électrique.

Lorsque la charge unitaire passe d'un point A à un point B on a donc :

$$V_B - V_A = - \int_A^B E dx \quad (7)$$

■ Le champ électrique étant nul à l'infini, on considère généralement que le potentiel y est nul également. On peut alors définir le **potentiel en un point P**, comme étant le travail nécessaire pour amener une charge unitaire de l'infini (ou de tout autre point où le potentiel est nul) au point P :

$$V_P = - \int_{\infty}^P E dx \quad (8)$$

On en déduit $\vec{E} = -\text{grad } V$ (9)

Exemple : dans le **cas particulier d'un champ électrique uniforme** (indépendant de la position dans l'espace), on a :

$$E = \frac{V_A - V_B}{d} \quad (10)$$

d étant la distance entre les points A et B.

■ On peut également définir le **potentiel d'une surface conductrice**. En effet, à l'équilibre, deux points d'une surface conductrice sont nécessairement au même potentiel. Si ce n'était pas le cas, les charges, qui sont libres de se mouvoir sur ce type de surface, se déplaceraient dans un sens ou dans l'autre. Une telle surface est dite équipotentielle, et son potentiel est égal à celui de n'importe lequel de ses points.

Remarque : la notion de potentiel de surface n'a généralement aucun sens lorsque l'on s'intéresse à une surface ou à un objet non conducteur. C'est malheureusement une erreur que l'on rencontre très fréquemment.

■ Le potentiel (comme les différences de potentiel) s'exprime en volts et le champ électrique en volts par mètre. En **électricité statique**, on manipule fréquemment des champs électriques élevés que l'on exprime alors en kilovolts par millimètre (équivalent aux mégavolts par mètre).

1.1.4 Notion de capacité

Un conducteur isolé qui porte des charges électriques prend un potentiel. On appelle capacité C , de cet objet, le rapport de la charge Q qu'il porte, à son potentiel V :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (11)$$

Cette capacité C dépend des dimensions et des formes du conducteur ainsi que de sa position par rapport aux autres conducteurs (notamment par rapport à la terre). Elle traduit la facilité avec laquelle ce conducteur emmagasine les charges et s'exprime en farads. En **électricité statique**, on utilise surtout le picofarad et le nanofarad.

Remarque importante : en électrodynamique nous sommes habitués à raisonner avec des sources de tension constante (par exemple une pile). En électrostatique, ce sont très souvent les quantités de charges qui sont constantes, comme dans le cas du conducteur isolé.

La relation (11) montre alors que si la capacité C varie, le potentiel varie également. C'est le cas si un conducteur se déplace ou si l'on modifie le milieu autour du conducteur. Il est important dès à présent de se convaincre de cette réalité.

1.2 Caractéristiques des milieux

1.2.1 Résistivités et résistance d'isolement

À la fin du XVII^e siècle, Gray classait déjà les matériaux en deux catégories : les conducteurs et les non conducteurs. Une question vient alors à l'esprit : où se situe la limite entre les conducteurs et les isolants ? Et, de fait, cette question, est très fréquemment posée. Malheureusement la réponse n'est pas simple.

■ Si l'on applique une tension V aux extrémités d'un **fil métallique**, on constate qu'un courant I circule dans le fil. La loi d'Ohm nous apprend que V et I sont proportionnels :

$$V = RI \quad (12)$$

La résistance électrique R s'exprime en ohms ; elle dépend de la géométrie de l'éprouvette et, par exemple, pour un cylindre de longueur ℓ et de section s , on a :

$$R = \rho \frac{\ell}{s} \quad (13)$$

ρ s'appelle la **résistivité** du matériau, s'exprime en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$) et est une **propriété intrinsèque du matériau**.

■ **Qu'en est-il pour un matériau isolant ?** Mis à part le fait qu'un courant (généralement très faible) circule lorsqu'on applique une tension, les phénomènes sont très différents. Nous renvoyons le lecteur, en bibliographie [2] [3], mais nous citerons tout de même les principales différences entre conducteurs et isolants.

Comme on peut le voir par des mesures, dans un isolant :

— la **résistance** est une fonction croissante du temps depuis l'application de la tension ; sa mesure est donc généralement effectuée après un temps spécifié (par exemple une minute) ;

— la **loi d'Ohm** n'est pas vérifiée, ce qui revient à dire que la résistance dépend de la tension appliquée (ou du champ électrique) ; sa mesure est donc effectuée sous une tension spécifiée (par exemple 500 V) ;

— la **conduction** n'est généralement pas intrinsèque au matériau ; elle est gouvernée par de nombreux facteurs extérieurs au matériau lui-même dont principalement l'humidité ; sa mesure est donc effec-

tuée après un conditionnement spécifié des éprouvettes (par exemple 48 h à 23 °C avec 50 % d'humidité relative).

Ces trois faits majeurs doivent nous convaincre que la résistance électrique d'un échantillon d'isolant n'est pas une propriété intrinsèque du matériau, mais seulement une grandeur mesurée dans des conditions spécifiées et qui permet de comparer deux matériaux ou d'évaluer l'évolution d'un matériau dans le temps.

Un autre phénomène particulier aux isolants vient encore compliquer les mesures. En effet, le courant circulant dans la masse du matériau est si faible que les **phénomènes de surface** (adsorption d'eau atmosphérique sur la surface, migration de produits de la masse du matériau vers la surface) peuvent devenir prépondérants.

Si l'on n'y prend pas garde, le courant circulant en surface peut être de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui circulant dans le volume. Pour éviter cela, il convient d'employer des électrodes de garde judicieusement disposées. On peut ainsi mesurer séparément le courant circulant en volume et celui circulant en surface ; on détermine alors une résistance volumique (ou transversale), les électrodes de mesure étant placées sur deux faces opposées de l'éprouvette, et une résistance superficielle, les électrodes de mesure étant placées sur une même face de l'éprouvette.

Il reste une dernière étape à franchir : comment passer de la résistance (transversale ou superficielle) à une résistivité ? Cela n'est possible que si **la géométrie de l'éprouvette et des électrodes est parfaitement définie**.

Dans ce cas, on peut calculer la **résistivité transversale** ρ_t à partir de la résistance transversale R_t :

$$\rho_t = R_t \frac{\mathcal{S}}{a} \quad (14)$$

a étant l'épaisseur de l'éprouvette et \mathcal{S} la surface en regard des électrodes de mesure. La résistivité transversale s'exprime en ohm-mètre.

On peut également calculer la **résistivité superficielle** ρ_s à partir de la résistance superficielle R_s :

$$\rho_s = R_s \frac{\ell}{d} \quad (15)$$

ℓ étant la longueur des électrodes en regard et d la distance séparant ces électrodes. La résistivité superficielle s'exprime en ohms.

Pour les matériaux isolants, les normes NF C 26-215 et CEI 93 décrivent la méthode de mesure des résistivités.

Remarque : on exprime souvent la résistivité superficielle en ohms par carré (Ω/s), afin de marquer la différence avec une résistance qui s'exprime également en ohms. Cette habitude provient d'une méthode consistant à mesurer la résistance superficielle entre deux électrodes carrées dont deux côtés sont séparés d'une distance égale au côté du carré ($\ell = d$). Dans ce cas particulier, on a :

$$\rho_s = R_s \quad (16)$$

■ Dans tous les cas où **la géométrie de l'éprouvette et des électrodes n'est pas parfaitement définie**, on ne peut pas calculer la résistivité et l'on doit parler de **résistance d'isolement**, qui s'exprime en ohms.

1.2.2 Permittivité

Si l'on remplace le vide (§ 1.1) par un **milieu quelconque**, les atomes et molécules du milieu vont répondre au champ électrique

\vec{E} par une polarisation \vec{P} . On définit le vecteur déplacement (ou induction) électrique :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (17)$$

Dans le cas des **milieux isotropes** (\vec{P} est colinéaire à \vec{E}) et **linéaire** (\vec{P} est proportionnelle à \vec{E}), qui sont les plus usuels en électrotechnique, on écrit :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (18)$$

χ étant la susceptibilité électrique du milieu.

On obtient alors :

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (19)$$

en posant $(1 + \chi) = \epsilon_r$ (20)

ϵ_r est la permittivité relative du milieu (parfois appelée constante diélectrique).

On voit que plus le matériau est polarisable, plus sa permittivité relative est élevée.

Dans un milieu de permittivité relative ϵ_r , l'interaction coulombienne [relations (1) et (2)] est divisée par ϵ_r et s'exprime par :

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{qq'}{d^2} \quad (21)$$

Nous terminerons en donnant quelques ordres de grandeur de valeurs de permittivité relative de différents matériaux (cf. articles spécialisés, dans ce traité) :

- le **vide** a, par définition, une permittivité relative $\epsilon_r = 1$;
- les **gaz** ont des valeurs de permittivité très voisines de 1 ;
- un **conducteur parfait** peut être considéré comme ayant une permittivité infinie ;
- la plupart des **liquides** ou des **solides isolants** ont des permittivités comprises entre 2 et 12 ;
- certains **liquides polaires** ou **cristaux fortement polarisables** ont des permittivités beaucoup plus élevées.

1.3 Lois de l'électrostatique

1.3.1 Loi de Coulomb

La loi de Coulomb (§ 1.1.1) indique que la force s'exerçant entre deux charges électriques ponctuelles [relation (1)] est attractive si les deux charges sont de signes différents, répulsive dans le cas contraire.

Une autre propriété importante de l'interaction coulombienne est l'additivité. Cela résulte du principe de superposition qui établit que la force s'exerçant sur une charge est la somme vectorielle des forces produites par chacune des charges du système.

1.3.2 Théorème de Gauss

Le théorème de Gauss établit que le flux du vecteur déplacement électrique \vec{D} à travers une surface quelconque S est égal à la somme des charges situées à l'intérieur de cette surface. On a :

— pour des charges ponctuelles :

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{S} = \Sigma q \quad (22)$$

— pour une densité superficielle de charge σ_s :

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int \sigma_s dS \quad (23)$$

— pour une densité volumique de charge ρ_v :

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int \rho_v dV \quad (24)$$

Sous sa forme différentielle, le théorème de Gauss s'écrit :

$$\text{div } \vec{D} = \rho_v \quad \text{ou} \quad \text{div } \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (25)$$

Ce théorème permet en particulier de calculer le champ électrique créé par une distribution de charges donnée.

1.3.3 Calcul du champ et du potentiel

■ Le théorème de Gauss [relation (25)], appliqué à une sphère de rayon r centrée sur une charge ponctuelle q donne la valeur du champ électrique :

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{q}{r^2} \quad (26)$$

■ On en déduit, d'après la relation (9), le potentiel :

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{q}{r} \quad (27)$$

1.3.4 Équations de Poisson et de Laplace

■ En combinant le théorème de Gauss (25) et la relation (9), on obtient, en notant ∇^2 le laplacien, l'**équation de Poisson** :

$$\text{div} (\text{grad } V) = \nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (28)$$

■ Dans une région libre de toutes charges électriques, on a l'**équation de Laplace** :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (29)$$

■ Les équations de Poisson et de Laplace permettent de calculer directement le potentiel créé par une distribution de charges donnée [4].

2. Mesures des grandeurs fondamentales

Nous venons de voir que potentiel, champ et charge sont reliés par des équations. Par exemple, une mesure de potentiel aux bornes d'une capacité connue permet de calculer la charge électrique portée par l'électrode.

2.1 Mesures de tension (ou de différence de potentiel)

Nota : le lecteur pourra se reporter, en bibliographie, aux références [5] [6] [7].

2.1.1 Rappel sur les voltmètres électrostatiques

Les premiers voltmètres électrostatiques sont des condensateurs dont une armature est mobile en translation ou en rotation. Lorsque l'on applique à ce condensateur une différence de potentiel V , l'armature mobile est soumise à une force ou à un couple proportionnel à V^2 . La détermination de cet effort ou de la déformation produite sur un ressort de caractéristique connue permet de connaître V . Un dispositif à miroir réfléchissant un faisceau lumineux, comme dans un galvanomètre, est utilisé pour l'électromètre à quadrants de William Thomson. Dans l'électromètre absolu de Kelvin, on équilibre la force électrostatique par une force de gravitation, ce qui permet de relier directement la mesure de tension aux grandeurs longueur, masse et temps.

Ces appareils sont assez peu sensibles aux faibles tensions (inférieures à quelques kilovolts), mais peuvent mesurer des tensions de plusieurs dizaines de kilovolts. Leur capacité est assez faible (quelques picofarads), mais peut tout de même nécessiter une correction lorsque la capacité sur laquelle est réalisée la mesure n'est pas significativement supérieure. En effet, dans ce cas, la charge initialement présente sur l'objet à mesurer se répartit entre la capacité de cet objet et la capacité du voltmètre, entraînant une diminution du potentiel. Enfin, la résistance d'entrée de ces appareils est théoriquement infinie. En pratique, elle est limitée par la résistance des isolants servant à maintenir les électrodes.

2.1.2 Diviseurs résistifs et capacitifs

■ Le principe d'un **diviseur résistif** est représenté sur la figure 2. La tension à mesurer V est appliquée aux bornes de deux résistances R_1 et R_2 en série. La tension de sortie v est donnée par :

$$v = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Si $R_1 \gg R_2$, on a alors :

$$v \approx V \frac{R_2}{R_1} \text{ (d'où le nom de diviseur)}$$

L'appareil de mesure que l'on branche aux bornes de R_2 pour mesurer v doit avoir une résistance d'entrée r très grande devant R_2 .

Ce diviseur permet l'écoulement des charges à travers des résistances. La résistance R_1 doit donc être de très forte valeur pour réduire le courant. En pratique, ce type de diviseur n'est utilisé que pour mesurer la tension de sources pouvant accepter de débiter un courant.

■ Pour la mesure du potentiel d'un objet chargé, on lui préfère le **diviseur capacitif** représenté sur la figure 3.

La tension de sortie v est donnée par :

$$v = V \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Si $C_2 \gg C_1$, on a alors :

$$v \approx V \frac{C_1}{C_2}$$

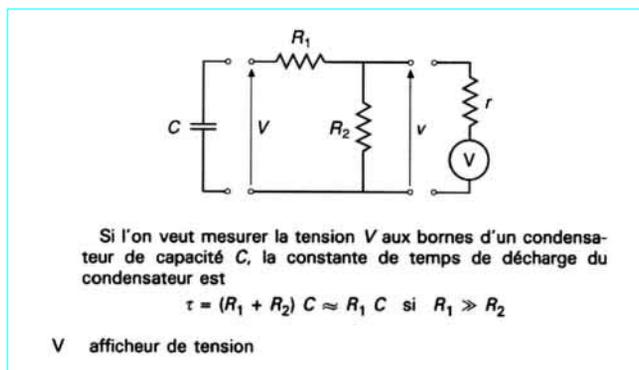


Figure 2 – Mesure d'une tension à l'aide d'un diviseur résistif

Le condensateur de capacité C_1 doit être un condensateur *haute tension* capable de supporter la tension V , et présentant un très faible courant de fuite. Par ailleurs, cette capacité doit être choisie petite devant celle de l'objet à mesurer pour les mêmes raisons que dans le cas du voltmètre électrostatique (§ 2.1.1).

2.1.3 Électromètres

■ Un électromètre est un **multimètre à courant continu** capable de mesurer :

- des tensions, en consommant un courant très faible grâce à une résistance d'entrée très grande ($> 10^{15} \Omega$) ;
- des courants très faibles ($< 10^{-9} \text{ A}$ et jusqu'à 10^{-17} A) ;
- des charges électriques jusqu'à 10^{-15} C ou moins.

Le circuit d'entrée d'un électromètre est, généralement, un **amplificateur opérationnel à transistors à effet de champ** (FET), qui présente, en plus de la résistance d'entrée très grande, un courant de fuite et une tension de décalage (*offset*) très faibles [8].

On citera également l'électromètre à **lame vibrante** dans lequel l'élément d'entrée est un condensateur de quelques picofarads dont une armature vibre à une fréquence de quelques centaines de hertz (figure 4). La tension continue à mesurer est ainsi convertie en tension alternative à la fréquence d'excitation. Une détection synchrone permet la mesure de cette tension alternative qui est proportionnelle à la charge collectée.

Nota : les multimètres actuels ne peuvent généralement pas mesurer des tensions supérieures à quelques dizaines ou quelques centaines de volts.

On est donc souvent conduit à les utiliser en association avec un diviseur capacitif. Leur très grande résistance d'entrée est alors un atout.

■ Une place à part peut être réservée au **voltmètre électrostatique sans contact** schématisé sur la figure 5. Le principe de cet appareil est basé sur une sonde placée en regard de la surface à mesurer. Le potentiel de la sonde est asservi de manière à annuler le champ électrique dans l'espace entre celle-ci et la surface à mesurer (suiveur de tension).

Nota : certains voltmètres électrostatiques de ce type peuvent mesurer des tensions jusqu'à 20 kV.

Leur principal avantage réside dans le fait qu'ils ne consomment aucun courant sur l'objet dont on veut mesurer le potentiel. On peut consulter les notices de certains constructeurs [9] [10].

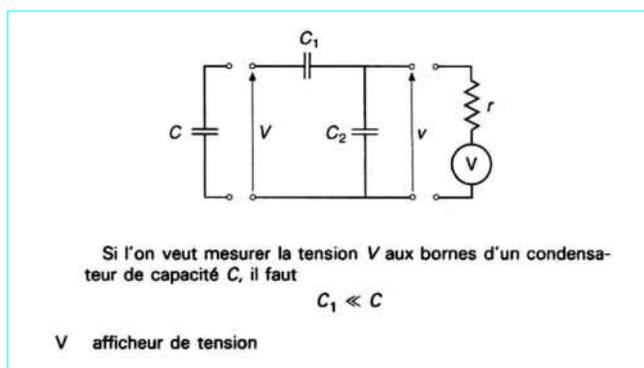


Figure 3 – Mesure d'une tension à l'aide d'un diviseur capacitif

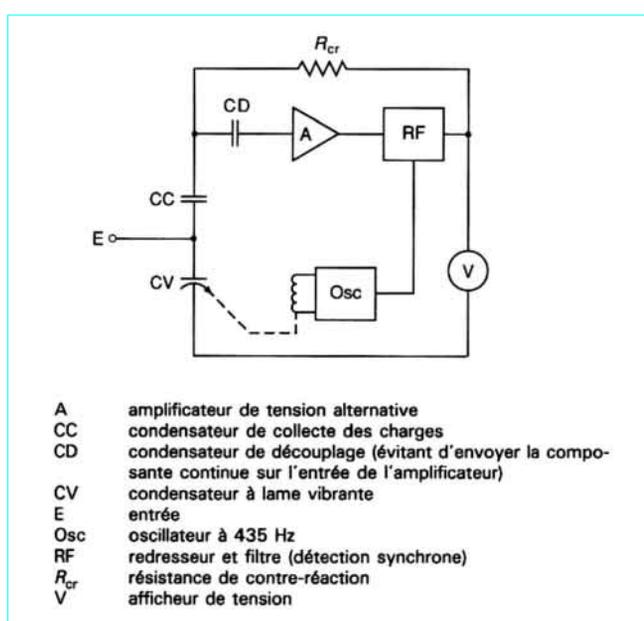


Figure 4 – Électromètre à lame vibrante : schéma de principe

2.2 Mesures de champ électrique

2.2.1 Mesures par induction

Lorsque l'on veut mesurer le champ électrique E au voisinage d'une paroi métallique, une solution consiste à placer, dans un orifice de cette paroi, une électrode isolée de surface S . En appliquant le théorème de Gauss (§ 1.3.2) relation (23) à la surface de cette électrode, on obtient, dans le vide (et en utilisant des axes orthogonaux), la densité superficielle de charge σ_s (qui s'exprime en coulombs par mètre carré) :

$$\sigma_s = \epsilon_0 E \quad (30)$$

La charge totale Q induite sur cette électrode par le champ E est donc :

$$Q = \sigma_s S = \epsilon_0 E S \quad (31)$$

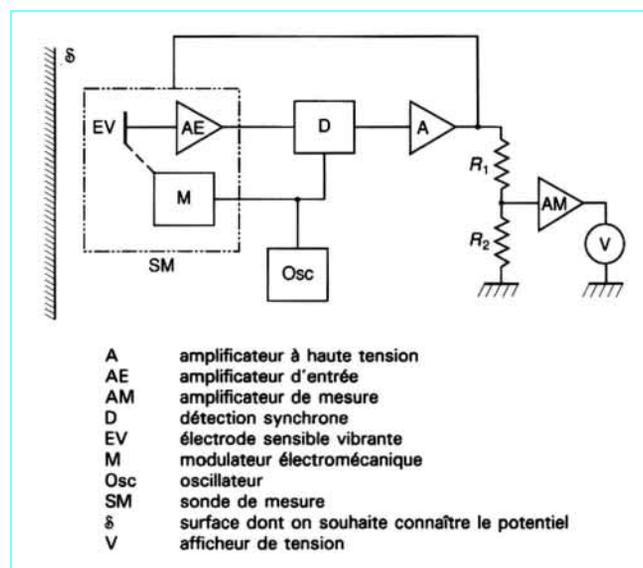


Figure 5 – Voltmètre électrostatique sans contact : schéma de principe

Si cette électrode est reliée à la terre à travers une capacité C on peut, d'après la relation (11), calculer la tension V :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{\epsilon_0 E S}{C} \quad (32)$$

On constate que cette tension V est proportionnelle au champ électrique E à mesurer. On remarquera que la mesure du champ électrique par induction est comparable à la mesure de potentiel par diviseur capacitif (§ 2.1.2) avec une capacité à haute tension (C_1 sur la figure 3) de valeur inconnue.

2.2.2 Moulin à champ

Dans ce type d'appareil, une électrode de mesure est exposée au champ à mesurer à travers un système de modulation constitué d'un obturateur tournant (d'où le nom de moulin à champ) ou vibrant [11]. Le signal alternatif, proportionnel au champ, ainsi généré peut être amplifié à l'aide d'un système de détection synchrone. Cela évite les perturbations dues aux champs alternatifs non harmoniques de la fréquence de l'obturateur et les dérives lentes inhérentes aux amplificateurs pour tensions continues.

L'étalonnage d'un moulin à champ est réalisé en plaçant son ouverture au centre de l'une des armatures d'un condensateur plan produisant un champ uniforme. Lorsque le moulin à champ n'est pas utilisé dans une zone où le potentiel est nul, il déforme les lignes de champ et un facteur de correction dépendant de la distance doit être appliqué. Pour réduire cette influence, certains moulins à champ sont dotés d'une plaque destinée à diminuer les effets de bords.

2.3 Mesures de charges électriques

2.3.1 Cylindre de Faraday

Lorsque l'on désire mesurer la charge totale Q portée par un objet, une masse de poudre ou un volume de liquide, on l'introduit à l'intérieur d'un cylindre de Faraday schématisé sur la figure 6. Le cylindre intérieur est relié à la terre à travers un condensateur CM

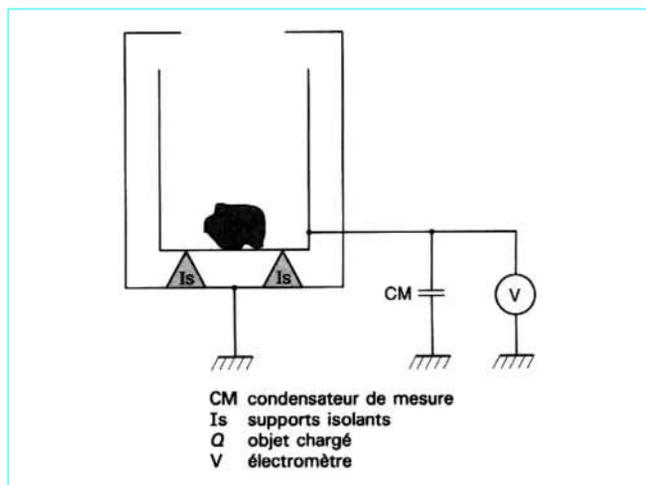


Figure 6 – Cylindre de Faraday

de capacité C à très faibles pertes, aux bornes duquel est connecté un électromètre V . La mesure du potentiel V atteint par le cylindre permet de calculer la charge portée par l'objet introduit [relation (11)] :

$$Q = CV$$

Il est à noter que, si l'objet est conducteur, sa charge va physiquement passer sur le cylindre intérieur. Mais la méthode est également valable pour des objets isolants car le cylindre et l'objet sont en influence totale.

2.3.2 Mesure de densité superficielle de charge

On a fréquemment besoin de connaître la densité superficielle de charge électrique σ_s présente à la surface d'un isolant solide. Pour effectuer ce type de mesure, on place, en regard de la surface chargée, une électrode circulaire de surface S connue et entourée d'un anneau de garde destiné à uniformiser le champ électrique ainsi créé.

■ La figure 7 schématise le dispositif de mesure. Si la plaque isolante porte une densité superficielle σ_s uniforme, cette surface est équipotentielle. Son potentiel V est [relation (11)] :

$$V = \frac{Q_A}{C_A} = \frac{Q_B}{C_B} = \frac{Q}{C_A + C_B} \quad (33)$$

Q_A , Q_B et Q étant respectivement les quantités de charges portées par les électrodes A, B et par la surface isolante Is ; C_A et C_B étant les valeurs des capacités constituées respectivement par la surface isolante Is et l'électrode A et par Is et l'électrode B.

On obtient ainsi :

$$\sigma_A = -\frac{\sigma_s}{1 + (a\varepsilon_r/b)}$$

$$\sigma_B = -\frac{\sigma_s}{1 + (b/a\varepsilon_r)}$$

avec ε_r permittivité relative du matériau isolant.

Ces relations permettent de constater que si $a \ll b/\varepsilon_r$, alors :

$$\sigma_A \approx -\sigma_s$$

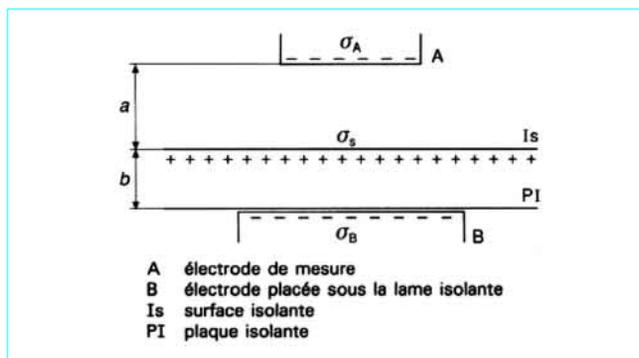


Figure 7 – Mesure d'une densité superficielle de charge par la méthode d'induction

On voit donc que la mesure de la charge Q_A portée par l'électrode de mesure donne la densité superficielle de charge [relation (31)] :

$$\sigma_s = -Q_A/S$$

Remarquons que, dans le cas contraire ($a \gg b/\varepsilon_r$) :

$$\sigma_A \approx 0$$

et, on a alors

$$\sigma_B \approx -\sigma_s$$

■ On en conclut que, pour mesurer la densité superficielle de charge (supposée uniforme) portée par une surface isolante, il suffit de mesurer la charge induite sur une électrode gardée, identique à celle de la figure 8, placée à une distance a de la surface isolante telle que :

$$a \ll \frac{b}{\varepsilon_r}$$

Pour assurer une bonne uniformité du champ électrique, il convient également que la distance d séparant l'électrode de mesure de son anneau de garde soit inférieure à a .

■ Si la densité superficielle de charge σ_s n'est pas uniforme, l'électrode mesure une valeur moyenne. Pour obtenir une bonne résolution spatiale sur des densités superficielles non uniformes, il est nécessaire de travailler avec des électrodes de très petit diamètre (de l'ordre de 1 mm) qui doivent alors être utilisées à très faible distance (inférieure à 1 mm, de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre) de la surface à mesurer.

Nota : on peut mesurer ainsi la densité superficielle de charge déposée sur un matériau, par frottement par exemple (§ 6.3.2).

2.3.3 Visualisation des charges par la méthode des poudres (ou de Lichtenberg)

Cette méthode très simple, qui n'est pas à proprement parler une méthode de mesure, car elle ne fournit que des résultats qualitatifs, permet de visualiser avec une très grande précision la carte de charge sur une surface isolante. Elle consiste à projeter sur la surface à étudier un mélange constitué de deux poudres de couleurs et de propriétés électriques différentes. Les grains de chaque poudre se chargent d'une polarité différente par frottement les uns sur les autres.

On peut, par exemple, utiliser du lycopode qui se charge négativement au contact du minium qui, lui, se charge positivement. Ainsi, le lycopode se fixe sur les zones chargées positivement qu'il colore en jaune, tandis que le minium se fixe sur les régions chargées négativement qu'il colore en rouge [12].

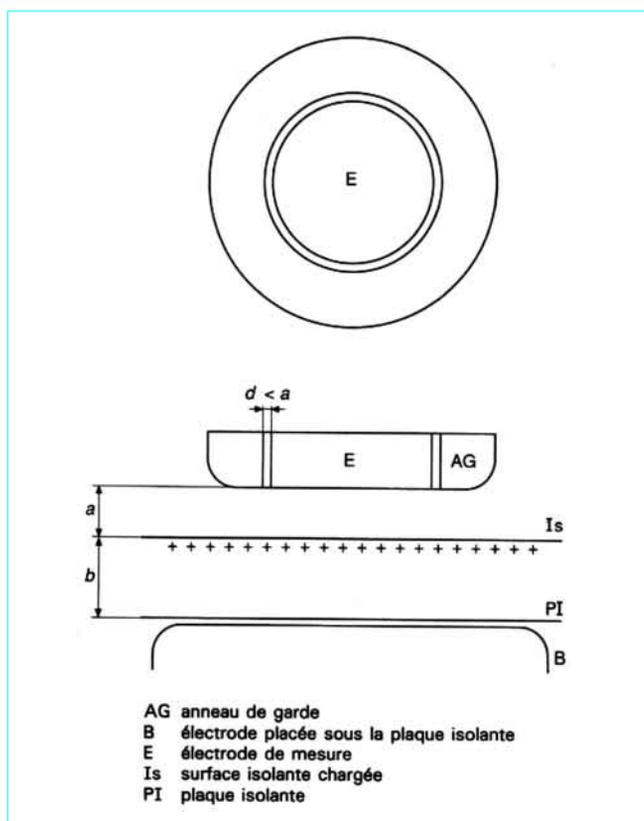


Figure 8 – Électrode plane pour la mesure de densité superficielle de charge

Les figures 9 et 10 montrent des exemples de visualisation de charge obtenue par cette méthode.

2.3.4 Mesure de densité volumique de charge

La mesure de la densité volumique de charge dans un isolant est plus complexe. La première méthode utilisée consistait à découper l'échantillon en tranches minces, puis à mesurer la charge de chaque tranche. Outre le fait que cette méthode est destructive et délicate à mettre en œuvre, on peut craindre que le découpage de l'échantillon modifie la charge de l'isolant par frottement avec l'outil de découpe.

Différentes méthodes non destructives ont été mises au point. La première, appelée **méthode de l'impulsion thermique**, consiste à appliquer une impulsion de chaleur sur une face de l'échantillon, créant ainsi un profil de dilatation [13].

Une autre, appelée **méthode de l'onde de pression**, consiste à laisser se propager, à la vitesse du son dans le matériau, une onde de pression appliquée à l'une des électrodes. Une telle onde peut être produite par des tubes à ondes de choc, par la décharge d'un condensateur dans un liquide, par un transducteur piézoélectrique ou par une impulsion laser. Sous l'effet de cette perturbation mécanique, les charges présentes dans le volume sont déplacées et la permittivité relative ϵ_r varie. Ces deux effets produisent une variation des charges induites sur les électrodes. Selon l'impédance de charge raccordée à ces électrodes, cette variation se traduit par une variation de potentiel ou de courant. L'évolution dans le temps de cette tension ou de ce courant permet de remonter à la distribution volumique des charges (§ 1.3.4), si l'on connaît la forme de l'onde de pression [14].

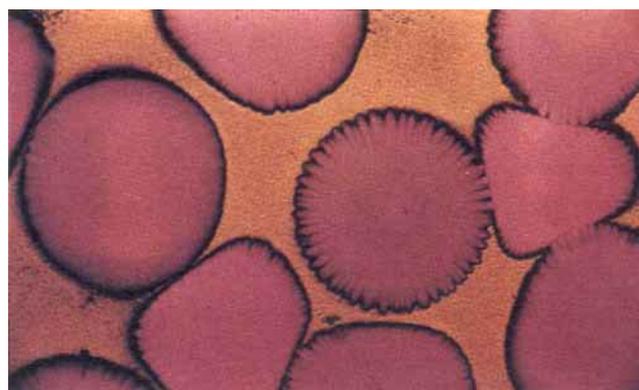


Figure 9 – Figure de poudre montrant un dépôt de charges négatives sur une surface isolante

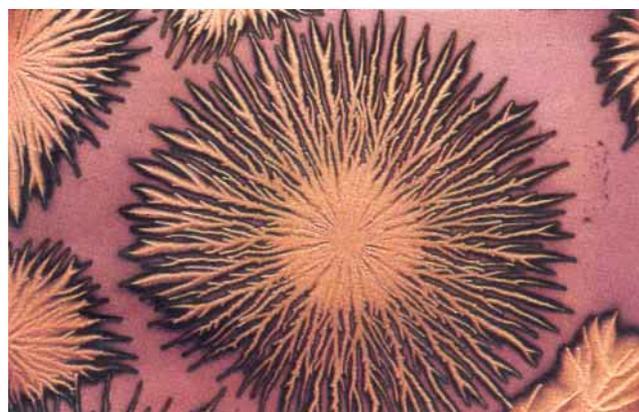


Figure 10 – Figure de poudre montrant un dépôt de charges positives sur une surface isolante

Nota : ces techniques ont trouvé des applications particulièrement intéressantes pour la connaissance de la répartition des charges dans l'isolant de câbles à courant continu [15].

3. Électrisation des matériaux

Le terme électrisation statique est utilisé pour désigner tous les procédés, parfois, fortuits, conduisant à la séparation des charges électriques positives et négatives. Il s'agit, généralement, d'actions mécaniques telles que le contact, le frottement ou le choc entre surfaces solides ou bien entre une surface solide et une surface liquide. Il peut également s'agir de la rupture ou de la division d'une surface solide ou liquide. Nous ne détaillerons principalement ici que les deux premiers phénomènes.

3.1 Électrisation aux interfaces solide-solide

Comme nous l'avons rappelé dans l'historique, l'électrisation par **frottement**, qui donne naissance à la triboélectricité, est connue depuis plusieurs millénaires. Le **contact** entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation. Le frottement n'est qu'une forme renforcée de contact conduisant à une augmentation de la surface réelle de contact, à un échauffement et même à des arrachements de particules solides.

Pour expliquer les phénomènes d'électrisation aux interfaces solide-solide, il convient de rappeler quelques notions relatives aux porteurs de charges et à la conduction dans les différentes familles de matériaux [2] [16].

3.1.1 Cas des métaux

Dans un métal, l'interaction entre les atomes est suffisamment forte pour que les électrons des couches externes constituent un nuage d'électrons libres. Ce sont ces électrons libres qui sont responsables de la conduction élevée. L'élévation de la température augmente les interactions entre les électrons de conduction et le réseau, entraînant un accroissement de la résistivité du métal.

Le niveau de Fermi (niveau d'énergie occupé le plus élevé) se situe pour les différents métaux au voisinage de -4 eV. Le niveau zéro est choisi par convention égal à celui d'un électron libre évoluant dans le vide. La valeur de l'énergie correspondant au niveau de Fermi est égale au travail d'extraction ; c'est l'énergie qu'il faut fournir au métal pour arracher un électron :

- si cette énergie est apportée par une élévation de température, on parle d'**émission thermoélectrique** ;
- dans le cas d'un apport d'énergie par rayonnement, il s'agit d'**émission photoélectrique**.

3.1.2 Cas des semiconducteurs

Dans le cas d'un semiconducteur, l'interaction entre atomes, moins forte que dans le cas d'un métal, conduit à une structure de bandes d'énergie. La dernière bande totalement remplie est la bande de valence. Elle est séparée de la bande de conduction totalement vide par une bande interdite. La largeur de cette bande interdite est de l'ordre de 1 eV. Le saut d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction est activé thermiquement, d'où une diminution de la résistivité lorsque la température augmente.

La théorie reste valable, mais la résistivité diminue fortement lorsque des impuretés (ou dopant) sont ajoutées dans le matériau, créant des niveaux d'énergie situés dans la bande interdite et proches de la bande de conduction.

3.1.3 Cas des isolants

Les isolants ont également une structure de bandes d'énergie, mais la largeur de la bande interdite est de l'ordre de 7 à 12 eV. L'activation thermique n'est alors plus en mesure d'assurer la conduction. Celle-ci ne peut être expliquée en champ faible que par des mécanismes de conduction ionique. Les ions responsables de la conduction peuvent être créés par dissociation d'impuretés dans le matériau (conduction électrolytique) ou par injection aux électrodes. Ces impuretés ionisées produisent des niveaux d'énergie localisés et situés dans la bande interdite.

Il faut noter que les défauts de surface et la dissociation d'impuretés dans une couche d'eau atmosphérique présente à la surface de l'isolant provoquent une conduction ionique en surface. On parle d'états d'énergie de surface.

3.1.4 Contact métal-métal

Lors de la mise en contact de deux métaux différents, des électrons vont migrer d'un métal vers l'autre afin d'équilibrer les niveaux de Fermi légèrement différents avant le contact. La conséquence de ce transfert de charge est un **potentiel de contact**.

Cependant, si les deux métaux sont alors séparés, les charges se recombinent à travers le dernier point de contact par suite de la grande mobilité des charges dans un métal.

Il n'est donc pas possible de mettre en évidence un phénomène d'électrisation par contact et séparation entre deux métaux.

3.1.5 Électrisation au contact métal-isolant

Lorsqu'un métal et un isolant sont mis en contact sans frottement et dans le vide (afin d'éviter un amorçage diélectrique dans l'air lors de la séparation), il y a transfert d'électrons du métal vers des états d'énergie de l'isolant, liés aux impuretés situées en surface ou dans le volume. De nombreux auteurs ont montré que la charge transférée pour un isolant donné est proportionnelle au travail d'extraction du métal. On peut donc définir un **travail d'extraction** pour un isolant.

Il peut y avoir également transfert d'ions positifs ou négatifs de l'isolant vers le métal.

Globalement, la densité superficielle de charge σ_s obtenue après contact et séparation peut s'exprimer par :

$$\sigma_s = e N_E (\Phi_m - \Phi_i) \quad (34)$$

- avec e charge de l'électron,
- N_E densité d'états d'énergie en surface de l'isolant,
- Φ_i travail d'extraction de l'isolant,
- Φ_m travail d'extraction du métal.

3.1.6 Électrisation au contact isolant-isolant

Dans le cas d'un contact entre deux isolants, les transferts de charges se font entre états d'énergie en surface. En généralisant la formule (34), certains auteurs proposent la formule suivante donnant la densité superficielle de charge :

$$\sigma_s = e \frac{N_{E1} N_{E2}}{N_{E1} + N_{E2}} (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (35)$$

- avec N_{E1} et N_{E2} densités d'états d'énergie en surface des isolants 1 et 2,
- Φ_1 et Φ_2 travaux d'extraction des isolants 1 et 2.

Les charges transférées vers les états superficiels peuvent ensuite migrer vers des états profonds situés dans le volume du matériau. On comprend aisément que tous ces résultats mettant en jeu les états superficiels ne s'appliquent qu'à des *surfaces parfaitement propres*.

L'**humidité** et la **contamination des surfaces** peuvent modifier fortement les résultats. En particulier, l'humidité superficielle augmente la densité superficielle d'états en permettant le transfert de charges ioniques. Mais elle augmente simultanément la conduction de surface qui permet la recombinaison des charges. Certains auteurs ont montré que la teneur en eau d'un polymère pouvait donner des variations de la charge en fonction du temps, voire des changements de polarité [17].

L'introduction de la notion de **travail d'extraction** pour un isolant a permis de constater que le signe de la charge prise par un isolant mis en contact avec un autre isolant dépend des valeurs respectives des travaux d'extraction de ces deux matériaux. On peut ainsi classer les isolants selon leurs travaux d'extraction. Le tableau 1 donne quelques valeurs tirées de la référence [18].

Différents auteurs ont tenté d'en déduire une **série triboélectrique** : il s'agit d'une table dans laquelle les matériaux sont classés dans un ordre tel que tout élément de la série devrait se charger positivement par rapport à tout élément classé au-dessus de lui dans la série et négativement par rapport à tout élément classé au-dessous. En fait, les différents auteurs ne sont pas d'accord sur le classement des matériaux et il n'existe pas de série triboélectrique universellement reconnue. On trouvera différents exemples en bibliographie [19] [20].

Tableau 1 – Valeurs du travail d'extraction de quelques polymères

Matériau	Travail d'extraction (eV)
– PVC (polychlorure de vinyle)	4,85
– Polyimide.....	4,36
– Polycarbonate	4,26
– PTFE (polytétrafluoroéthylène).....	4,26
– PETP (polyéthylène téréphtalate)	4,25
▼ Polystyrène.....	4,22
+ Polyamide.....	4,08

Un élément quelconque de la série se charge positivement lorsqu'il est mis en contact avec un matériau situé au-dessus de lui et négativement au contact d'un matériau situé plus bas dans la série. Mais le travail d'extraction d'un isolant dépend d'un grand nombre de paramètres.

Dans le **cas du frottement**, la charge acquise par chaque matériau dépend surtout de la pression exercée, de la vitesse de glissement et de l'échauffement provoqué. Dans certains cas, des particules peuvent être arrachées.

3.2 Électrisation aux interfaces solide-liquide

Ce type de phénomène, qui se produit lorsque le liquide est en mouvement à l'interface [21] [22] [23], a pour origine les ions, présents dans le liquide par suite de la dissociation d'impuretés ou injectés aux électrodes par des réactions d'oxydo-réduction [24]. En effet, il est impossible d'obtenir un liquide parfaitement pur. Les ions positifs et négatifs ainsi présents dans le liquide vont se lier à l'interface liquide-solide par différents mécanismes [2] [3] : force électrostatique pour les parois métalliques, adsorption chimique, injection par effet électrolytique, dissociation de groupements polaires, réaction entre le liquide et le solide dans le cas d'une paroi isolante.

Lorsque les ions proviennent de la dissociation d'impuretés (créant des charges positives et négatives en quantités égales), le phénomène d'électrisation ne se produit que parce qu'une espèce d'ions va être plus fortement liée à la paroi. Il s'établit alors une couche compacte appelée **couche de Helmholtz**, du nom du physicien qui l'étudia en 1879. Gouy, un autre physicien, montra en 1910 que les ions de l'autre polarité s'organisent en une couche diffuse. L'épaisseur de la couche diffuse ou **couche de Gouy** dépend de la résistivité du liquide : elle est très faible pour un liquide conducteur et croît avec la résistivité de ce dernier.

Lorsque le liquide est mis en mouvement [25], cette double couche va être séparée, la couche de Helmholtz restant liée à l'interface et la couche de Gouy étant entraînée avec le liquide. Le potentiel au plan de glissement est appelé **potentiel zéta**. Le courant qui résulte de ce mouvement du liquide est le **courant d'écoulement**.

L'accumulation des charges dans le liquide est gouvernée par la diffusion des ions vers l'interface et par la résistivité ρ du liquide. En effet, l'écoulement des charges présente une constante de temps :

$$\tau = \varepsilon_r \varepsilon_0 \rho$$

On comprend donc, intuitivement, qu'un liquide très isolant ne se chargera pas, car très peu d'ions sont présents, tandis qu'un liquide conducteur ne se chargera pas non plus, par suite de la recombinaison très rapide des ions.

En pratique, le courant d'écoulement est maximal pour des résistivités comprises entre 10^9 et $10^{11} \Omega \cdot m$. On ne trouve aucun phénomène d'électrisation pour $\rho < 10^7 \Omega \cdot m$, ni pour $\rho > 10^{13} \Omega \cdot m$. Il faut noter que, dans le cas où le liquide circule sur une paroi isolante, celle-ci voit également chargée avec une densité superficielle qui n'est limitée que par la recombinaison des ions à l'interface, la conduction à travers le solide et, éventuellement, les amorçages en surface ou transverses à l'isolant.

On constate, également, que l'électrisation est plus importante en écoulement turbulent qu'en écoulement laminaire et lorsque la surface est rugueuse [26]. De nombreux auteurs ont étudié le courant d'écoulement produit par l'écoulement laminaire ou turbulent de liquides dans des tubes de différents diamètres et de longueur infinie ou finie [27] [28].

3.3 Quelques autres modes d'électrisation

3.3.1 Charge par effet couronne

■ Lorsqu'une tension élevée (quelques kilovolts) est appliquée à une électrode présentant un faible rayon de courbure (par exemple une pointe ou un fil de faible diamètre), le champ électrique prend une valeur très grande au voisinage de cette électrode puis décroît très rapidement lorsque l'on s'en éloigne. Il se produit alors une décharge limitée à la région où le champ électrique est supérieur à la rigidité diélectrique du gaz environnant. Ce phénomène est baptisé **effet couronne** par suite des manifestations lumineuses qu'il émet. Lorsqu'un électron est accéléré par le champ élevé au voisinage de la pointe, il acquiert de l'énergie, puis dissipe cette énergie au cours de chocs avec les molécules du gaz qu'il ionise :

- si la pointe est positive, les ions positifs ainsi créés dérivent sous l'effet du champ en s'éloignant de la pointe ;
- dans le cas contraire, les électrons créés par l'avalanche perdent de l'énergie en s'éloignant de la pointe, puis sont attachés à des molécules du gaz formant ainsi des ions négatifs qui continuent à dériver sous l'effet du champ.

Ces ions (positifs ou négatifs selon la polarité de la pointe) peuvent se déposer sur une **surface isolante** placée à proximité. Il en résulte une densité superficielle de charge sur cette surface. Cette méthode de charge d'une surface est plus facile à contrôler et plus uniforme que le frottement décrit au paragraphe 3.1.

■ Remarques

- Il n'est pas possible de charger une surface plane isolante au-delà d'une **valeur limite** donnée par la rigidité diélectrique E_c du gaz environnant.

Exemple : dans l'air, E_c est de 3 MV/m environ. La **densité superficielle de charge maximale** [relation (30)] est :

$$\sigma_{s, \max} = \varepsilon_0 E_c = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2 = 2 \text{ 660 pC/cm}^2 \quad (36)$$

Pour dépasser cette limite, on peut augmenter la rigidité diélectrique du milieu environnant (par exemple, en faisant le vide) ou métalliser la deuxième face du film isolant, ce qui a pour effet de reporter le champ électrique dans l'isolant solide en réduisant le champ dans le gaz.

- De la même manière, lorsque l'on charge, par effet couronne, des **particules**, supposées **sphériques**, de rayon a et de permitti-

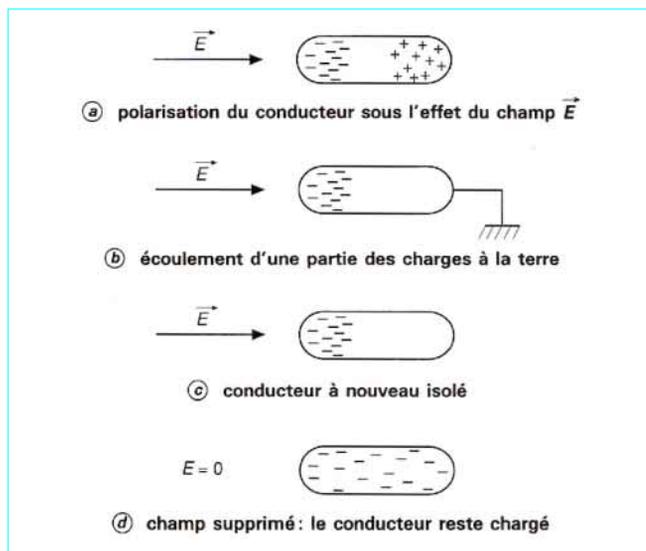


Figure 11 – Mécanisme de charge d'un conducteur par induction

tivité relative ϵ_r , on montre qu'il existe une valeur maximale de charge q_{\max} , appelée **limite de Pauthenier**, que chaque particule peut acquérir :

$$q_{\max} = 4 \pi \epsilon_0 \rho E_c a^2 \quad (37)$$

avec

$$\rho = \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}$$

3.3.2 Charge par induction

Ce phénomène se produit lorsqu'un conducteur est plongé dans un champ électrique \vec{E} , puis provisoirement relié à la terre (figure 11). En effet, sous l'action du champ, le corps se polarise, c'est-à-dire que les centres de gravité des charges positives et négatives se séparent.

Si le corps est temporairement relié à la terre en un point, les charges situées au voisinage de ce point vont s'écouler. Lorsque le corps est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle.

Ce mécanisme explique, par exemple, qu'une particule conductrice placée entre deux électrodes, dans un champ uniforme effectue des oscillations entre les deux électrodes, se déchargeant, puis se rechargeant à chaque choc.

4. Nuisances et dangers de l'électricité statique

Les nuisances liées à l'accumulation de l'électricité statique peuvent aller du simple désagrément ressenti en approchant la main d'une poignée de porte ou de tout autre objet jusqu'à de très graves risques d'explosion. En effet, quel point commun relie des incidents tels que l'explosion d'un ballon dirigeable en 1937, l'incendie d'une cabine Apollo à terre qui coûta la vie à trois hommes en 1970, la perte de la fusée Europa en 1971 ou un accident peu connu qui affecta un missile Pershing à Heilbronn (RFA) en 1985 [29] ? Il s'agit de l'électricité statique.

D'une manière générale, toute nuisance électrostatique a pour origine soit un phénomène d'attraction ou de répulsion lié à des forces électrostatiques (§ 4.1), soit une décharge d'électricité statique (§ 4.2, 4.3 et 4.4) causée par le dépassement du champ électrique disruptif dans le milieu considéré (gaz, liquide ou solide).

4.1 Problèmes mécaniques liés aux forces électrostatiques

- Ces problèmes peuvent avoir pour **origine** :
 - l'attraction entre corps chargés de signes opposés ;
 - la répulsion entre corps chargés de même signe ;
 - l'attraction entre un corps chargé et un corps conducteur à cause de la charge induite ;
 - l'attraction due à l'échange de charges entre deux surfaces initialement neutres.

Ils affectent, en général, des corps légers tels que feuilles, films, particules, poussières... Les conséquences ne sont généralement pas dramatiques, mais peuvent ralentir, perturber, voire bloquer, un processus de fabrication ou affecter la présentation des produits (empoussièrement).

Les problèmes d'adhésion de particules ou de films ont fait l'objet de nombreuses études, mais ne sont pas encore entièrement compris.

- Toutes les **forces d'adhésion et de cohésion** sont, par nature, électrostatiques, soit au niveau macroscopique, soit au niveau microscopique (force de Van der Waals).

La force de Coulomb **entre deux corps chargés** est donnée [d'après les relations (4), (19) et (22)] par la formule :

$$F = \frac{1}{2} \int \epsilon_0 \epsilon_r E^2 dS \quad (38)$$

Pour la déterminer, il convient donc de calculer le champ E entre les deux corps et d'intégrer E^2 sur l'une des surfaces.

Dans le **cas général**, il faut résoudre l'équation de Laplace [relation (29)]. Pour deux surfaces planes plongées dans un milieu de permittivité ϵ_r , on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 S \quad (39)$$

- Le **cas des poudres** est particulièrement important [30] [31]. La charge totale portée par une particule est proportionnelle à sa surface et, par conséquent, la charge massique q/m d'un échantillon de poudre augmente lorsque la granulométrie de la poudre diminue. On constate expérimentalement que la charge produite au cours des processus industriels est essentiellement liée à la taille des particules et au type de traitement effectué. Quelques ordres de grandeur de charges massiques sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2 – Charges massiques relatives à différentes opérations industrielles	
Opération	Charge massique q/m (C/kg)
Tamissage	10^{-8} à 10^{-11}
Remplissage ou vidange de silo.....	10^{-7} à 10^{-9}
Transport par vis sans fin.....	10^{-6} à 10^{-8}
Broyage.....	10^{-6} à 10^{-7}
Micronisation	10^{-4} à 10^{-7}
Convoyage pneumatique.....	10^{-4} à 10^{-6}

Les problèmes mécaniques qui en résultent sont les suivants : colmatage des tamis ou des orifices de vidange des silos, variation de densité de la poudre, réduction de débit pour les convoyeurs pneumatiques, impossibilité de séparer les particules submicroscopiques (fines).

4.2 Problèmes liés aux décharges électrostatiques

4.2.1 Généralités

Lorsque le champ électrique créé par une densité superficielle ou volumique de charge dépasse la rigidité diélectrique du milieu environnant, une décharge se produit dans ce milieu. Dans l'air, la rigidité diélectrique est donnée par la courbe de Paschen en fonction du produit de la pression par la distance interélectrodes [32] [33]. Une décharge disruptive peut présenter trois formes principales :

a) l'**étincelle** ou **arc**, qui se produit entre deux électrodes métalliques ;

b) la **décharge partielle**, ou décharge en buisson ou en aigrette (de l'anglais *brush discharge*), qui se produit entre une électrode métallique et un matériau isolant (voire entre deux matériaux isolants) ; elle est qualifiée de *partielle*, car son trajet conducteur ne court-circuite pas totalement deux électrodes métalliques ; ce trajet est généralement multiple, en forme de *buisson* ;

c) la **décharge couronne** (ou corona), qui prend naissance dans la zone à fort champ électrique située au voisinage d'une électrode à très faible rayon de courbure, d'où la dénomination *effet de pointe* parfois employée.

4.2.2 Décharge à partir d'un conducteur

Un conducteur isolé présente une capacité C par rapport à la terre.

■ Si le **conducteur est isolé** et porte une **charge Q** , son potentiel est donné par la relation (11) $V = Q/C$ et l'énergie stockée est :

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (40)$$

Un exemple de conducteur isolé, fréquemment rencontré dans la **pratique**, est celui d'une personne portant des chaussures isolantes. En effet, le corps humain peut être considéré, du point de vue de l'électrostatique, comme un conducteur. Sa capacité par rapport à la terre est généralement voisine de 150 pF et son potentiel peut atteindre, dans certains cas 30 kV. La conséquence la plus connue d'une décharge électrostatique sur le corps humain est le désagrément physiologique qu'elle provoque lorsque la main approche d'une poignée de porte ou de tout autre objet métallique. Le désagrément est ressenti à partir d'un potentiel, variable d'une personne à l'autre, mais voisin en moyenne de 2 kV, ce qui correspond à une énergie de 0,3 mJ. Les conséquences peuvent en être des mouvements incontrôlés pouvant entraîner dans certains cas des blessures par outils, voire des chutes.

■ Si le **conducteur est chargé par un courant constant I_c** et présente une résistance de fuite à la terre R_f , le potentiel évolue en fonction du temps t , selon la loi :

$$V = R_f I_c [1 - \exp(-t/R_f C)] \quad (41)$$

Pour des temps longs ($t \gg R_f C$), on a alors :

$$V = R_f I_c$$

et l'énergie stockée est :

$$W = \frac{1}{2} C R_f^2 I_c^2 \quad (42)$$

■ Lorsque le champ électrique dans l'air dépasse la rigidité diélectrique, un arc électrique se produit. Les charges pouvant se déplacer

très rapidement sur un conducteur, la totalité des charges portées initialement par le conducteur s'écoule à travers le canal de décharge. La totalité de l'énergie stockée est dissipée (en première approximation) dans l'étincelle.

4.2.3 Décharge à partir d'une surface isolante chargée

Lorsque l'on approche une électrode reliée à la terre d'une surface isolante chargée, le champ électrique se trouve modifié et des charges sont induites sur l'électrode. Plus les surfaces s'approchent et plus le champ augmente, conduisant ainsi à l'amorçage d'une décharge partielle. Les charges n'étant pas mobiles sur une surface isolante, seule une faible partie de cette surface est concernée par la décharge. L'énergie mise en jeu par ce type de décharge est donc, en général, faible comparée à celle d'un arc.

Expérimentalement, on constate que la charge et l'énergie transférées augmentent en même temps que le diamètre de l'électrode métallique jusque vers 20 mm environ.

La quantité de charge et l'énergie transférée dépendent du signe de la charge initialement présente sur l'isolant. Une décharge partielle à partir d'une surface chargée positivement est moins énergétique qu'une décharge à partir d'une surface chargée négativement. Il est impossible de déterminer, *a priori*, l'énergie transférée dans une décharge à partir d'une surface isolante comme dans le cas d'une surface conductrice. En effet, la surface isolante n'étant pas équipotentielle, on ne peut pas définir la capacité mise en jeu.

4.2.4 Décharge rampante

Nous avons vu au paragraphe 3.3.1 que la densité superficielle de charge sur une surface isolante ne pouvait dépasser, dans l'air, une valeur limite égale à 2 660 pC/cm².

Si l'on considère une **plaque isolante** (ou un film) d'épaisseur a reposant sur une électrode métallique (ou dont l'une des faces est métallisée), il est facile de montrer que, lorsque des charges sont déposées sur la face non métallisée, le champ électrique est reporté dans le matériau isolant par la charge induite qui se déplace sur l'électrode et qu'en conséquence le champ électrique dans l'air est très faible (inférieur à ce qu'il serait en l'absence de métallisation). Dans ce cas, la rigidité diélectrique de l'air ne limite plus l'accumulation des charges sur la surface isolante. On peut ainsi atteindre des valeurs très élevées (> 2 660 pC/cm²) de densité superficielle de charge. Cette accumulation de charges a également pour conséquence une augmentation de la conductivité superficielle de l'isolant.

Lorsqu'une électrode est approchée de la surface isolante, il se produit une décharge qui intéresse une grande partie de la surface chargée rendue conductrice : cette décharge, d'énergie importante, puisque la surface concernée est grande, est appelée **décharge rampante** (ou *glissante*). Dans le cas des films, le champ dans l'air est très faible et l'électrode doit s'approcher très près de la surface (c'est-à-dire à une distance inférieure à l'épaisseur du film).

Une décharge rampante peut également se produire lorsque l'on sépare l'isolant chargé de la sous-couche métallique. Le champ électrique dans l'air croît alors brutalement et la totalité de la surface isolante se décharge pour rétablir l'équilibre.

4.3 Décharge électrostatique et composants électroniques

4.3.1 Nuisances d'origine électrostatique

La première conséquence de la présence de charges électriques sur un objet isolé est la création d'un champ électrique. En règle générale, ce champ électrique n'est pas en mesure de détruire

directement un composant électronique. Il convient toutefois de ne pas perdre de vue le risque de charge par induction d'un objet conducteur plongé dans ce champ électrique (§ 3.3.2)

Un autre effet du champ électrique peut être l'attraction de poussières ou de particules. Ce phénomène peut poser des problèmes dans la fabrication des circuits intégrés ou même des circuits imprimés [34].

Cependant, les principales nuisances d'origine électrostatique dans les industries électroniques sont liées au phénomène de décharge électrostatique (DES) [35]. L'énergie transportée par la DES ou le champ électromagnétique qu'elle rayonne peut entraîner la destruction de composants électroniques ou le dysfonctionnement de matériels électroniques ou informatiques.

4.3.2 Forme d'onde d'une DES

Une DES se traduit par une impulsion de courant très brève (front de montée de quelques nanosecondes), mais d'amplitude pouvant atteindre plusieurs ampères.

■ La **forme d'onde** d'une décharge électrostatique peut être décrite par la valeur de crête \hat{I} du courant i , le temps de montée τ_1 mesuré entre 10 et 90 % de cette valeur de crête et la largeur de l'impulsion à mi-amplitude ($\tau_{(50\%)}$). Selon les cas, l'impulsion de courant peut être oscillante ou non.

■ Dans le cas d'une DES produite **par une personne** (figure 12), les paramètres qui jouent un rôle important dans la forme de l'onde de courant sont :

- la capacité C du corps humain par rapport à la terre ; cette capacité a une valeur généralement voisine de 150 pF et peut varier de 50 à 300 pF ;
- la résistance R du circuit de décharge, dominée par la résistance du corps humain généralement comprise entre 1 et 30 k Ω ;
- l'inductance L du circuit de décharge, de valeur comprise entre 0,3 et 1,5 μ H.

L'ordre de grandeur du temps de montée de l'impulsion est donné par la constante de temps L/R , qui peut varier de quelques dizaines de picosecondes à quelques nanosecondes. La largeur de l'impulsion dépend de la constante de temps RC . Elle est comprise entre quelques dizaines de nanosecondes et quelques microsecondes.

■ Une décharge produite par un **objet conducteur** (figure 13), tel qu'un chariot par exemple, est caractérisée par une valeur très différente de la résistance R du circuit de décharge, de l'ordre de quelques ohms. La composante inductive du circuit de décharge devient prépondérante. Le temps de montée est de l'ordre de la dizaine de nanosecondes et l'impulsion est du type oscillante amortie.

4.3.3 Effets d'une DES sur un composant électronique

Dans les technologies actuelles de composants MOS, les épaisseurs d'oxyde (SiO_2) d'isolation de la gâchette peuvent descendre jusqu'à 20 nm. Même avec une rigidité diélectrique de l'ordre de 800 kV/mm, on voit que des tensions aussi faibles que 16 V sont suffisantes pour claquer la couche d'oxyde.

Par ailleurs, les valeurs très élevées (plusieurs ampères, voire dizaines d'ampères) de courant transporté par une DES produisent un échauffement des conducteurs internes au composant. L'impulsion étant extrêmement brève, il est possible de considérer le processus comme adiabatique. Le courant de la DES permet d'évaporer une piste interne de section atteignant 5 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, ou une résistance en silicium polycristallin. Il peut également se produire une microdiffusion sous l'effet de la température atteinte par le cristal. Une DES peut également provoquer le claquage en inverse d'une jonction P-N. Le risque de claquage de l'oxyde de la gâchette rend la technologie MOS plus sensible aux DES, mais les

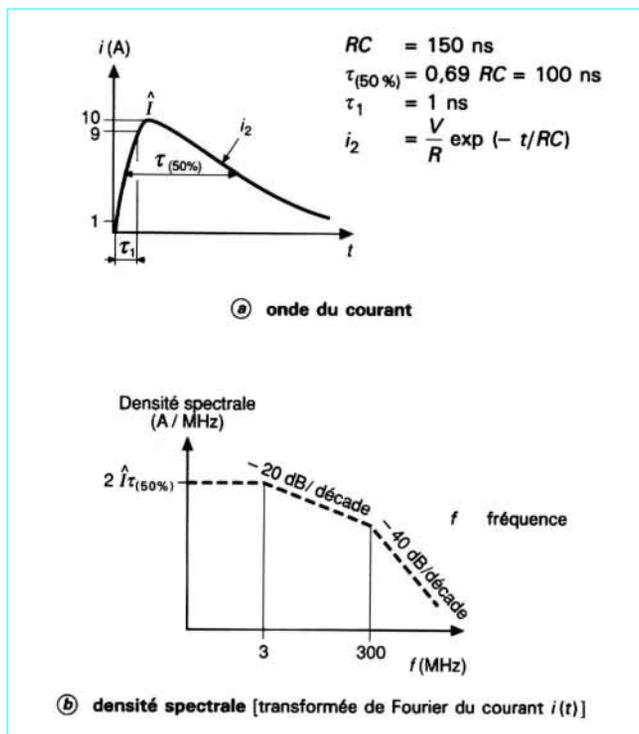


Figure 12 – Décharge d'un opérateur de capacité 150 pF avec $R = 1\,000 \Omega$ et $V = 10 \text{ kV}$ [21]

autres modes de dégradation que l'on vient de citer peuvent affecter toutes les technologies, y compris les composants bipolaires. Le tableau 3 indique les ordres de grandeur de la tension de susceptibilité aux DES de différentes technologies [36].

Il est important de noter que, dans certains cas, même si l'énergie de la DES n'est pas suffisante pour détruire le composant, celui-ci peut être fragilisé par la décharge. Il est souvent impossible de détecter un tel défaut latent par les essais de routine [37].

4.3.4 Action d'une DES sur un matériel électronique

■ Un opérateur (ou un objet) chargé peut provoquer une DES en s'approchant et en touchant une partie métallique d'un matériel électronique ou informatique (bouton, clé, interrupteur, poignée, boîtier...).

■ Le risque est encore plus important pour l'équipement si la décharge se produit sur un connecteur d'entrées/sorties. Dans ce cas, le courant de décharge peut atteindre directement les composants d'entrée ou de sortie et l'on est ramené pratiquement au paragraphe 4.3.3.

■ Le troisième cas de perturbation d'un matériel par une DES est celui de la décharge indirecte sur une masse métallique placée à proximité du matériel. C'est alors le champ électromagnétique rayonné par le courant de décharge qui perturbe le fonctionnement du matériel. Les matériels placés dans des boîtiers en matière plastique, et donc non blindés, sont particulièrement sensibles à ce type de décharge.

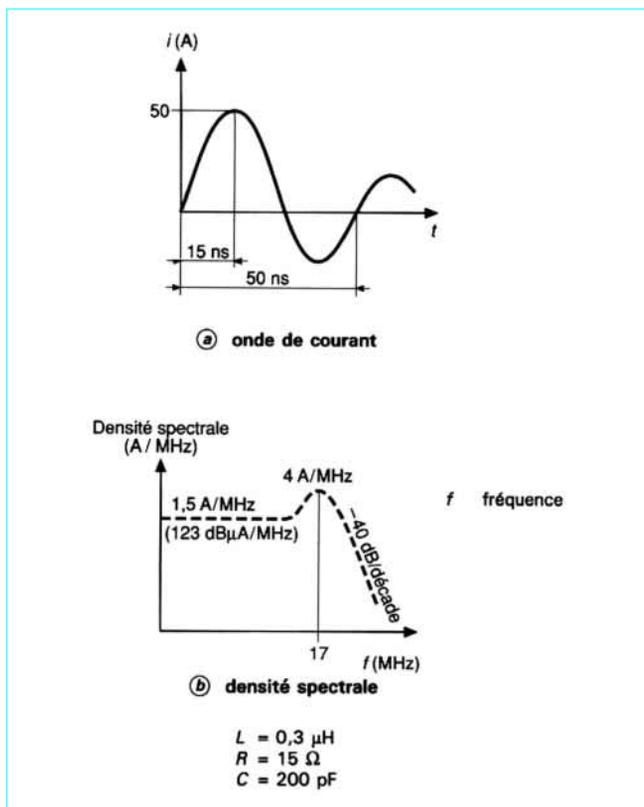


Figure 13 – Décharge d'un chariot porté au potentiel de 2 kV [21]

Tableau 3 – Tensions de susceptibilité de composants électroniques : ordre de grandeurs

Composant électronique	Tension de susceptibilité (V)
VMOS (<i>Vertical Metal Oxide Semiconductor</i>)...	30
MOSFET	100
GaAsFET (FET à base d'arséniure de gallium)...	100
EPROM (<i>Electrically Programmable Read Only Memory</i>)	100
JFET (<i>Junction Field Effect Transistor</i>)	140
SAW (<i>Surface Acoustic Wave</i>)	150
OP-AMP (<i>Operational Amplifier</i>)	190
CMOS (<i>Complementary MOS</i>)	250
Diodes Schottky	300
Film Resistors (épais, mince)	300
Transistors bipolaires	380
ECL (<i>Emitter Coupled Logic</i>)	500
SCR (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>)	680
TTL (<i>Transistor Transistor Logic</i>) Schottky	1 000

4.3.5 Modélisation d'une DES

Afin de tester la susceptibilité des composants et des matériels électroniques aux décharges électrostatiques (§ 4.2 et 4.3.4), il convient de disposer de modèles permettant de simuler les différents

types de décharges. Les normes proposent de tels modèles, ayant pour origine un opérateur humain.

4.3.5.1 Cas des composants

Il est traité dans deux normes américaines.

■ La norme MIL-STD 883 C décrit tous leurs essais de **fiabilité** (électriques, mécaniques...). La simulation des DES est décrite par la méthode 3015.2 de cette norme qui préconise :

- un temps de montée inférieur à 15 ns ;
- une application de 5 impulsions positives et de 5 impulsions négatives sur chaque broche du composant ;
- un classement du composant en fonction de sa tension de susceptibilité, inférieure ou supérieure à 2 000 V.

■ La norme MIL-STD 1686 traite uniquement de leur **susceptibilité** aux DES. Elle ne définit pas la forme d'onde ni le nombre d'impulsions à appliquer. L'analyse du résultat se fait par examen au microscope électronique à balayage et relevé de la caractéristique du composant. Les composants dont la tension de susceptibilité U_S est inférieure ou égale à 4 000 V sont classés en deux catégories :

- classe 1 : $U_S \leq 1\,000\text{ V}$;
- classe 2 : $1\,000\text{ V} < U_S \leq 4\,000\text{ V}$.

4.3.5.2 Cas des matériels électroniques

Pour la simulation d'une DES humaine sur ces matériels, il existe une norme internationale (CEI 801-2) qui définit le générateur : condensateur de 150 pF et résistance de décharge de 330 Ω. La décharge est appliquée sur le matériel en essai par l'intermédiaire d'un relais, généralement sous vide, qui permet de s'affranchir de l'influence de la vitesse d'approche et donc d'améliorer la reproductibilité.

Les résultats de l'essai sont évalués de la façon suivante :

- fonctionnement normal après l'essai dans les limites de la spécification ;
- dégradation temporaire ou perte de fonction autorécupérable ;
- dégradation temporaire ou perte de fonction nécessitant l'intervention d'un opérateur ou une remise à zéro du système ;
- dégradation ou perte de fonction non récupérable, du fait d'une avarie du matériel, du logiciel ou de pertes de données.

4.4 Décharge électrostatique et risques d'inflammation ou d'explosion

Une réaction d'oxydation exothermique violente peut se produire dans une atmosphère explosive à laquelle de l'énergie est apportée, par exemple par l'intermédiaire :

- d'une flamme nue ;
- d'une étincelle électrique (interruption d'un courant fort) ;
- d'une étincelle radiofréquence (près d'une source radio de forte puissance) ;
- d'une étincelle produite par un choc entre métal et béton par exemple ;
- d'une décharge électrostatique.

Nous ne nous intéresserons ici qu'à cette dernière cause. On trouve, dans la littérature, des tableaux donnant, pour différents liquides, le point d'éclair (température à laquelle les vapeurs du liquide s'enflamment au contact d'une flamme nue) et la température d'auto-inflammation des vapeurs [38]. Dans le cas des risques liés aux décharges électrostatiques, l'**énergie minimale d'inflamma-**

tion (EMI) d'un gaz, d'une vapeur ou d'un nuage de produit pulvérent permet d'évaluer le danger.

L'EMI peut varier de plusieurs joules pour certaines poudres, quelques millijoules pour des poudres de soufre ou d'aluminium très fines, environ 200 microjoules pour les vapeurs des liquides organiques ou des hydrocarbures dans l'air, 20 microjoules pour l'hydrogène ou l'acétylène, jusqu'à 1 microjoule pour les explosifs.

■ Un **mélange d'air et de gaz ou vapeur inflammable** ne peut exploser que pour des **concentrations** comprises entre deux valeurs minimale et maximale (généralement de l'ordre de 2 à 10 % de gaz dans l'air). Entre ces deux limites, l'énergie d'une DES nécessaire pour enflammer le mélange dépend beaucoup de la concentration. Il existe donc une concentration donnant l'énergie minimale d'inflammation (EMI). Tous les chercheurs qui ont travaillé sur la détermination de l'EMI ont montré que la valeur obtenue dépend de la vitesse à laquelle l'énergie est libérée dans le milieu, donc de la durée de la décharge.

L'EMI dépend également du **rayon des électrodes**. En effet :

- pour des électrodes de petit diamètre (quelques millimètres), on obtient une décharge couronne plutôt qu'une étincelle ;
- pour des électrodes de grand diamètre (quelques centimètres), la masse métallique des électrodes refroidit l'étincelle.

En général, la plus petite valeur d'EMI est obtenue pour le diamètre d'électrodes le plus petit permettant de ne pas avoir de décharge couronne.

L'EMI dépend également de la **distance interélectrode**. L'EMI est minimale pour la **distance de pincement** qui est celle pour laquelle l'énergie produite dans la zone de réaction dépasse les pertes thermiques par les électrodes.

On montre, expérimentalement, qu'une explosion ne peut pas se produire si la distance entre les électrodes entre lesquelles se produit l'étincelle est inférieure à une valeur appelée **distance maximale de sécurité**. Elle est de l'ordre de 1 mm pour les hydrocarbures.

■ Pour les **poudres**, il existe également une **concentration** conduisant à la plus forte probabilité d'explosion (généralement de l'ordre de 200 à 500 g/m³). L'EMI est, dans ce cas, une fonction de la **taille des particules**. Plus la poudre est fine, plus elle peut exploser facilement [39].

■ Aussi bien pour les gaz que pour les nuages de particules, l'EMI décroît avec l'élévation de la **température**.

4.5 Exemples de problèmes électrostatiques dans l'industrie

4.5.1 Industries électroniques

■ Nous avons vu, au paragraphe 4.3.3 que les **composants électroniques** sont vulnérables aux DES [40]. On peut identifier deux situations pratiques dans lesquelles un composant risque d'être soumis à une DES :

- un opérateur ou un objet chargé s'approche du composant ; la figure 14 montre le cas d'une décharge entre le doigt d'un opérateur chargé et le composant ;
- le composant, qui s'est lui-même chargé en frottant par exemple sur une réglette d'emballage, se décharge brutalement en tombant sur un plan conducteur (figure 15).

■ Le cas de la perturbation des **équipements électroniques** par une DES a été traité au paragraphe 4.3.4 [41].

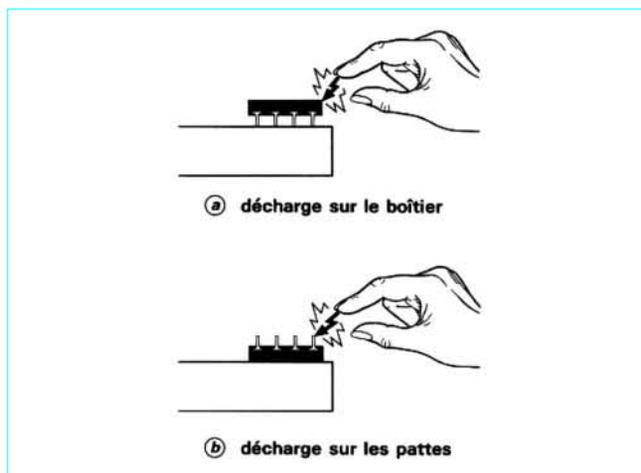


Figure 14 – Exemples d'un opérateur se déchargeant sur un composant (modèle du corps humain)

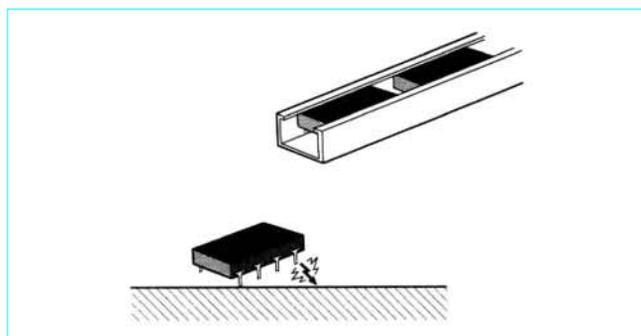


Figure 15 – Exemple d'un composant chargé se déchargeant sur une surface conductrice (modèle du composant chargé)

4.5.2 Industries chimiques et pharmaceutiques

De nombreux processus utilisés dans ces industries sont générateurs de charges ; c'est par exemple, le cas lors :

- du déversement d'une poudre à partir d'un sac ou de son transport par une tuyauterie ;
- d'une opération de tamisage ;
- de l'écoulement d'un liquide dans une tuyauterie ;
- de l'agitation d'un liquide, surtout en présence d'une ou plusieurs autres phases (particules solides en suspension, gouttelettes d'un liquide non miscible...) ;
- de la dispersion d'un liquide en jet ou en brouillard.

Les conséquences peuvent être, comme on l'a dit au début du paragraphe 4, des problèmes mécaniques, des risques de décharge électrique pour les opérateurs, voire l'explosion lorsque des produits contenant des solvants ou des vapeurs inflammables sont utilisés [42].

Des problèmes sont également rencontrés dans les lits fluidisés utilisés, par exemple, pour le séchage de pulvérents.

4.5.3 Industries pétrolières

Les hydrocarbures liquides manipulés dans ces industries présentent deux caractéristiques qui les rendent particulièrement sensibles aux problèmes causés par l'électricité statique [43] :

- leur résistivité élevée leur permet d'accumuler des quantités importantes de charges ;
- leurs vapeurs sont généralement inflammables, ce qui entraîne que toute décharge d'énergie suffisante risque de provoquer un incendie ou une explosion.

Les charges peuvent être générées lors de l'écoulement dans une tuyauterie, une pompe ou une vanne. Le passage à travers des filtres fins, tels que ceux utilisés lors du remplissage des réservoirs d'avions, peut engendrer des charges volumiques de plusieurs centaines de microcoulombs par mètre cube.

Le remplissage d'un réservoir par écoulement est également générateur de charges par suite de la création d'un brouillard ou d'une mousse chargée ou lorsque des particules peuvent sédimenter.

Entre 1953 et 1971, l'électricité statique a été rendue responsable de 35 incendies ou explosions survenues lors du remplissage des réservoirs de kérosène ou après le remplissage [44]. Le nombre d'accidents survenus lors du remplissage de camions citernes est bien plus élevé. Les causes les plus souvent identifiées sont la présence de filtres ou le remplissage provoquant un éclaboussement (mousse, brouillard...).

Des accidents ont également été enregistrés à bord de pétroliers, notamment lors des opérations de nettoyage des cuves [45].

5. Principes de lutte contre l'électricité statique

5.1 Présentation

Nous avons vu au paragraphe 4 que tous les problèmes d'électricité statique résultent :

- a) de la génération de charges électriques ;
- b) de l'accumulation de ces charges sur les isolants ou sur les conducteurs isolés ;
- c) du champ électrique produit par ces charges, l'effet correspondant étant soit une force, soit une décharge disruptive.

La lutte contre l'électricité statique peut donc intervenir à chacun de ces niveaux. On peut, tout d'abord, chercher à éviter la génération des charges électriques. On recherchera ensuite tous les moyens permettant l'écoulement, vers la terre, des charges générées. Enfin, dans le cas où les nuisances résultent de la décharge, on pourra essayer de protéger l'élément sensible (ou dangereux) contre les effets de cette décharge.

5.2 Suppression ou réduction de la génération de charges électriques statiques

C'est la première action à envisager lorsque l'on cherche à se protéger contre un problème d'électricité statique, car c'est la seule qui permet d'agir à la source. Cependant, nous avons vu, au paragraphe 3, que la génération de charges se produit dès qu'un contact entre deux matériaux différents (dont un au moins est *isolant*) est établi, puis rompu. Dans la pratique, la génération de charges peut même se produire lors du contact et de la séparation d'un matériau sur lui-même.

En effet, ce sont les couches superficielles du matériau qui interviennent dans le mécanisme de génération. Dès lors, la moindre différence dans l'humidité superficielle ou dans la contamination des surfaces a pour conséquence une génération de charges statiques. Par conséquent, il est impossible d'éviter, dans tous les cas, la génération de charges.

Toutefois, les actions suivantes peuvent permettre de **réduire la quantité de charges** produites :

- **éviter le contact entre deux matériaux trop éloignés dans la « série triboélectrique »** (§ 3.1.6) ; c'est-à-dire dont les travaux d'extraction sont trop différents ; on évitera, par exemple, les contacts entre le verre et le *Téflon* (PTFE) ou entre le PVC et le polyamide (*Nylon*) ;
- **réduire la vitesse de frottement** entre pièces solides (par exemple, réduction de vitesse de défilement de films plastiques ou de transports de pulvérulents) ou d'écoulement d'un liquide dans une canalisation.

Les **limites de sécurité** concernant la vitesse d'écoulement ne sont pas établies de façon définitive. La norme britannique BS 5958-Part 2 recommande que le produit de la vitesse (en m/s) par le diamètre de la conduite (en m) soit inférieur à 0,38 pour les liquides dont la conductivité est inférieure à 5 pS/m et à 0,5 pour les liquides dont la conductivité est supérieure à 5 pS/m. Ce critère n'est valable que pour des vitesses ne dépassant pas 7 m/s pour des liquides monophasiques.

Il est à noter que la réduction des vitesses de frottement ou d'écoulement qui réduit la génération de charges est également favorable à la dissipation de celles-ci en permettant des temps de séjour plus longs dans les *volumes de relaxation*, c'est-à-dire les zones dans lesquelles la vitesse est volontairement réduite (par augmentation du diamètre par exemple) pour permettre aux charges de s'écouler à la terre.

Nota : en pratique, dans l'industrie, si la réduction des vitesses est parfois inévitable pour des raisons de sécurité, elle est toujours synonyme de diminution de productivité des installations et on recherchera donc souvent d'autres solutions aux problèmes d'électricité statique.

5.3 Écoulement des charges électriques statiques à la terre

La première règle de base à respecter lorsque l'on veut éviter des problèmes d'électricité statique consiste à rendre équipotentielles toutes les pièces conductrices de l'installation, c'est-à-dire à les relier électriquement entre elles et à la terre.

En effet (§ 3), les conducteurs **isolés** peuvent accumuler les charges ; de plus, ils peuvent se charger par un processus qui leur est propre : la charge par induction (§ 3.3.2). Enfin, la décharge à partir d'un conducteur est une étincelle de forte énergie (§ 4.2.2), donc dangereuse.

On remarque que cette règle coïncide avec celle de sécurité contre les chocs électriques qui impose également que toute partie métallique accessible d'un matériel électrique soit raccordée à la terre de sécurité (NF C 15-100 et, dans ce traité, articles. *Installations électriques* [D 5 030] [D 5 032] [D 5 034] [D 5 036] [D 5 038]). Dans le cas de la **sécurité électrostatique**, qui nous préoccupe ici, il convient toutefois de la généraliser à **toutes les parties conductrices** quelles qu'elles soient. Citons, à titre d'exemples, le bâti métallique d'une table, les poignées de porte, les composants électroniques, les fûts utilisés dans l'industrie chimique ou la carrosserie d'un véhicule de transport d'hydrocarbures.

■ On peut essayer d'imaginer un instant l'**environnement idéal du point de vue de l'électricité statique**. Ce serait un monde dans lequel TOUT serait CONDUCTEUR et relié en permanence À LA TERRE.

En effet, dans ce cas, l'équipotentialité serait réalisée en permanence et, par conséquent, le champ électrique serait nul, tout comme le risque de décharge. Cependant, cette situation idéale n'est pratiquement jamais réalisable pour les raisons suivantes :

- de nombreux produits à manipuler ne sont pas conducteurs et ne peuvent pas être modifiés par un additif (produits agroalimentaires ou pharmaceutiques, liquides de haute pureté...);

- on a souvent besoin de matériaux possédant des propriétés difficilement compatibles avec la conductivité électrique : transparence optique ou faible conductivité thermique...;

- dans le cas d'objets devant se déplacer, il est impossible de les raccorder électriquement en permanence à la terre : chariot métallique, appareil électronique sans fil, véhicule ou même opérateur humain.

■ Ce dernier exemple va nous obliger à revenir sur la **définition** du mot **conducteur**. Au paragraphe 1.2.1 nous avons défini les mots conducteurs et isolants à partir des propriétés physiques des matériaux. En électrotechnique ou en électronique, les courants que l'on transporte dans les **conducteurs** sont de quelques ampères par millimètre carré, c'est-à-dire quelques coulombs par millimètre carré-seconde et l'ordre de grandeur de la résistance de ces conducteurs est le milliohm.

Lorsqu'il s'agit d'électricité statique, les quantités de charges à transporter dans les **conducteurs électrostatiques** s'expriment en picocoulombs, en nanocoulombs ou, au plus, en microcoulombs. On conçoit donc bien que ces conducteurs peuvent avoir une résistivité bien plus élevée que celle des métaux. Il paraît intéressant de définir des ordres de grandeur à partir de la constante de temps de décharge d'un condensateur :

$$\tau = RC$$

On peut arbitrairement convenir que l'on considère comme conducteur un élément qui permet la décharge en 1 μ s pour des valeurs de capacité rencontrées en pratique (10 à 1 000 pF). Les valeurs de résistance correspondantes sont donc comprises entre 1 et 100 k Ω .

On pourrait également définir la notion de conducteur à partir du risque de choc électrique pour les opérateurs. Sachant que le courant que peut supporter le corps humain sans trop de risques est de l'ordre de quelques milliampères, on voit que, pour une tension de contact de 220 V, la résistance correspondante est de 50 à 100 k Ω . L'ordre de grandeur est donc le même que précédemment.

En **résumé**, il convient de retenir que si les conducteurs utilisés en électrotechnique ou en électronique ont des résistances de l'ordre du milliohm, en électrostatique, on parlera de conducteurs pour des valeurs de résistance de l'ordre du kilohm ou même du mégohm. Le corps humain, ayant une résistance de l'ordre de quelques kilohms, entre donc bien dans la catégorie des conducteurs électrostatiques.

■ Lorsqu'un objet chargé (isolant ou conducteur isolé) se décharge brutalement, la valeur de crête du courant est d'autant plus élevée que la résistance du circuit de décharge est plus faible. On comprend ainsi intuitivement que, pour limiter le courant de décharge (donc les effets thermiques de la décharge), il convient d'augmenter la résistance du circuit de décharge. On voit ainsi apparaître la nécessité de matériaux à résistivité intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants pour dissiper les charges statiques (§ 6.1).

5.4 Protection contre les décharges électrostatiques

Rappelons que ce paragraphe ne traite que des moyens de protéger les éléments sensibles aux DES contre les décharges que l'on n'aura pas pu éviter, en mettant en œuvre les mesures de réduction de la génération de charges (§ 5.2) et d'élimination des charges (§ 5.3). La protection des éléments sensibles ne dispense généralement pas du contrôle de l'électricité statique.

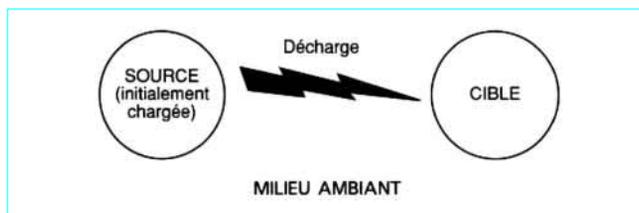


Figure 16 – Problème de décharge électrostatique : schéma

Tout problème de décharge électrostatique peut être représenté par le schéma de la figure 16. Il comporte un élément **source** de la DES qui est l'objet chargé initialement, un élément **cible** qui va être frappé par la décharge et le milieu ambiant qui va être traversé par la décharge (claquage diélectrique). Il est important de noter que l'**élément sensible** à la DES peut être, selon le cas, la source, la cible ou le milieu ambiant. Quelques exemples sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4 – Exemples d'éléments sensibles aux DES

Élément sensible	Exemples
Source	Un opérateur touchant une poignée de porte ou une carrosserie de voiture. Un composant électronique chargé entrant en contact avec une masse.
Cible	Un composant ou un matériel électronique touché par un opérateur chargé.
Milieu ambiant	Un mélange explosif mis à feu par une DES.

5.4.1 Protection des personnes

L'effet physiologique d'une DES sur l'homme peut aller du simple *picotement* désagréable à des réactions réflexes violentes (§ 4.2.2). Cet effet est produit par le courant transporté par la décharge et surtout par la densité de courant au niveau de la peau.

Lorsqu'une personne craint de s'être chargée (par exemple en descendant d'un véhicule par temps sec ou en marchant avec certaines chaussures), elle peut se protéger contre les effets de la décharge :

- soit en réduisant la densité de courant au niveau de la peau en se déchargeant sur un objet conducteur relié à la terre, en touchant cet objet avec une pièce de métal tenue à la main (clé, outil...);
- soit en réduisant la valeur de crête du courant en se déchargeant à travers un objet dissipateur s'il en existe à proximité (revêtement de table, bracelet avec résistance série...).

5.4.2 Protection des composants électroniques

La projection des composants électroniques contre les DES sort du cadre de cet article [46]. Nous ne donnerons que les grands principes.

Depuis plusieurs années, les fabricants de composants micro-électroniques ont réussi à *durcir* ceux-ci vis-à-vis des effets des DES. Deux grands types de moyens de protection sont utilisés :

- précautions au niveau de l'implantation des jonctions à l'intérieur du composant ;
- protection des entrées et des sorties par des réseaux (diodes, résistances) intégrés.

Il faut savoir que toute protection d'un composant est limitée à une tension maximale et à un temps de montée minimal de la décharge. Au-delà, le composant lui-même ou les réseaux de protection peuvent être endommagés. Si le composant n'est pas détruit,

ses caractéristiques (vitesse, courant de fuite...) peuvent être dégradées. Enfin, la détérioration des réseaux de protection peut rendre le composant plus sensible aux décharges suivantes.

La sensibilité du même type de composant, la conception et l'efficacité des protections varient d'un fabricant à l'autre [47]. Dans certains cas, on peut trouver des composants supportant des DES de 2 à 4 kV au sens de la norme MIL-STD-883 C.

5.4.3 Protection des matériels électroniques

En complément de l'utilisation de composants protégés (§ 5.4.2), il est souvent nécessaire de protéger les matériels électroniques en agissant aux niveaux suivants :

- protection externe des composants ;
- conception des cartes imprimées ;
- conception des blindages ;
- câblage externe.

La **protection externe des composants** est réalisée par des supresseurs de transitoires, des résistances en série avec les entrées à haute impédance et/ou des condensateurs de découplage en céramique (quelques nanofarads) sur les alimentations. Toutes ces protections doivent être placées au plus près du composant à protéger.

La règle pour la protection au niveau des **cartes imprimées** est de réduire la surface des boucles formées par la piste de signal et la piste de masse et par la piste d'alimentation et la piste de masse. On doit, par exemple, utiliser des plans de masse les plus étendus possible (double face ou multicouches). On peut, également, utiliser des blindages proches des cartes et reliés au châssis. Les connecteurs devraient être découplés par des condensateurs céramiques et/ou des ferrites.

La conception des **blindages** de matériels électroniques pour éviter les problèmes de DES est la même que pour tous les problèmes de susceptibilité aux interférences électromagnétiques (IEM). Il convient toutefois de tenir compte du fait que le spectre d'une DES s'étend jusqu'à 300 MHz et au-delà pour concevoir un blindage efficace [48].

Pour le **câblage externe**, on utilisera de préférence des câbles blindés.

5.4.4 Protection en atmosphères explosibles

Dans les atmosphères explosibles, l'élément sensible aux DES est le milieu ambiant, qui peut être enflammé par l'énergie libérée par

la décharge. Le moyen de se protéger contre ce risque consiste à remplacer l'air par un mélange gazeux dont la teneur en oxygène soit inférieure à la limite inférieure d'explosibilité, en utilisant un gaz inerte tel que l'azote. Ce procédé d'inertage est utilisé pour les silos et pour les réacteurs employés dans les industries chimiques et pharmaceutiques.

6. Moyens de lutte contre l'électricité statique

6.1 Classification des matériaux du point de vue de l'électrostatique

Il n'existe pas d'accord international sur la classification des matériaux vis-à-vis de leurs propriétés électrostatiques, ni même sur la définition des termes conducteur, isolant, dissipateur ou anti-statique. Différentes normes proposent des classifications généralement toutes basées sur les résistivités. Le tableau 5 rassemble quelques-unes de ces propositions.

Il nous paraît nécessaire d'aller plus loin dans la définition des catégories de matériaux. La proposition que nous faisons ci-après est à l'étude dans le cadre du Sous-Comité 15D de la CEI mais ne fait pas encore l'objet d'une norme internationale. Le diagramme de la figure 17 résume cette proposition de classification.

1) On doit, tout d'abord, vérifier le caractère isolant d'un matériau en mesurant ses résistivités transversale ρ_t et superficielle ρ_s (§ 1.2.1) selon les normes NF C 26-215 et CEI 93. On considère qu'un matériau est **isolant** si :

$$\rho_t > 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \text{ ET } \rho_s > 10^{12} \Omega/\square$$

2) Si un matériau n'est pas isolant au sens de cette définition, on doit vérifier son caractère conducteur en mesurant sa résistivité ρ (pour un conducteur, la notion de résistivité superficielle n'a plus de sens) selon la norme NF T 51-080 (ou ISO 3915). On considère qu'un matériau est **conducteur électrostatique** si :

$$\rho < 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$$

3) Un matériau qui n'est ni isolant ni conducteur (au sens des définitions 1 et 2) est qualifié de **partiellement conducteur**.

Tableau 5 – Classement des matériaux suivant différentes normes

Référence	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	ρ
ANSI/EIA 541	conducteur					dissipateur					isolant					ρ_s (Ω/\square)	
	conducteur					dissipateur					isolant					ρ_t ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
DOD HDBK 263	conducteur					dissipateur					antistatique			isolant		ρ_s (Ω/\square)	
Mardiguian [49]	conducteur					à risque			non générateur de charges							ρ_s (Ω/\square)	
ASTM D 4470	conducteur								partiellement conducteur			isolant					ρ_t ($\Omega \cdot \text{cm}$) ρ_s (Ω/\square)
	de blindage		conducteur		dissipateur								isolant			ρ_s (Ω/\square)	
CECC 00 015	de blindage		conducteur		dissipateur								isolant			ρ_t ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	

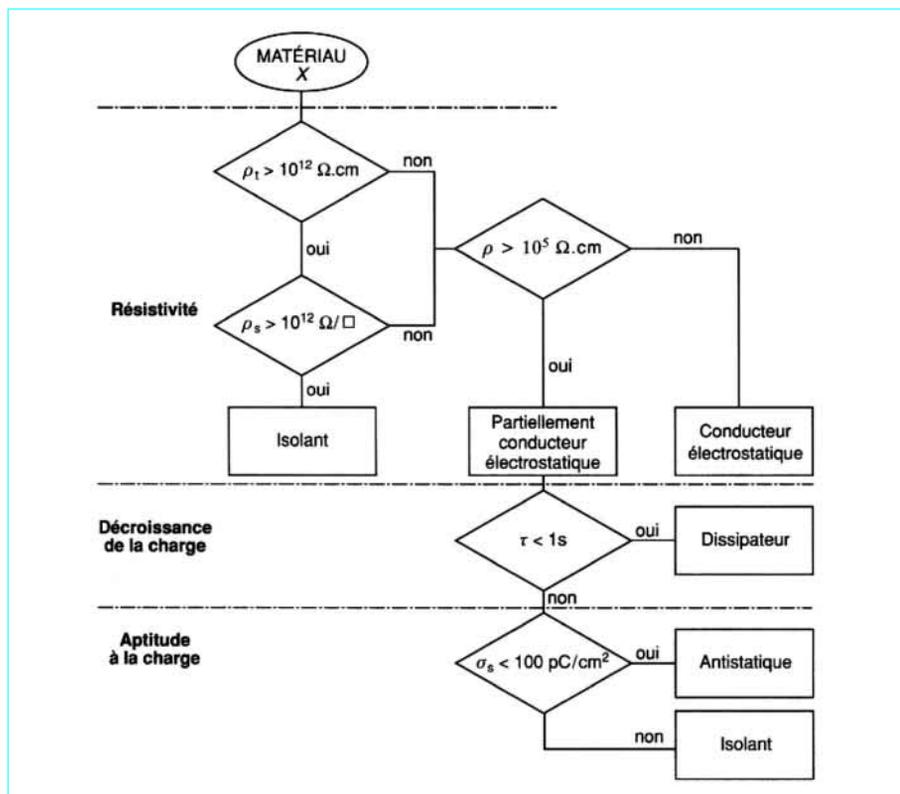


Figure 17 – Mesures à réaliser pour déterminer les propriétés électrostatiques d'un matériau

4) Les matériaux isolants ou partiellement conducteurs ne suivent généralement pas la loi d'Ohm, ce qui signifie que la résistance R d'un échantillon dépend de la tension V appliquée (en général, R augmente lorsque V diminue). Pour cette raison, il n'est généralement pas possible de définir le caractère dissipateur d'un matériau par une mesure de résistance effectuée sous une tension conventionnelle fixée. Pour s'affranchir de cette difficulté, il est nécessaire de mesurer un temps de dissipation des charges, également appelé **temps de demi-décharge**. Un matériau qui n'est pas conducteur (au sens de la définition 2) mais dont le temps de demi-décharge τ est inférieur à 1 seconde est qualifié de **dissipateur**. Ce vocable signifie que le temps de relaxation des charges est suffisamment faible pour que leur accumulation n'atteigne généralement pas un niveau dangereux. Ce temps est néanmoins suffisamment long pour limiter la *pointe* de courant de la décharge provoquée par un objet chargé venant se décharger sur le matériau dissipateur.

Le paragraphe 6.3.1 décrit quelques méthodes de mesure du temps de demi-décharge.

5) Enfin, lorsqu'un matériau isolant ou partiellement conducteur n'est pas dissipateur, ce qui signifie que, même relié à la terre, il n'écoulera les charges que très lentement, il est souvent intéressant de caractériser son aptitude à la charge. La méthode consiste généralement à mesurer les quantités de charges produites sur le matériau par frottement dans des conditions spécifiées (§ 2.3). Un matériau produisant, dans ces conditions, une densité superficielle de charges σ_s inférieure à 100 pC/cm² est qualifié d'**antistatique**. Ce mot, souvent employé sans raison, prend ici tout son sens : *qui ne génère pas (ou peu) de charges statiques*.

Quelques méthodes de mesure de l'aptitude à la charge d'un matériau sont décrites au paragraphe 6.3.2.

6.2 Conditions d'emploi des matériaux selon leurs caractéristiques

Une fois connues les caractéristiques électrostatiques d'un matériau, il est possible de déterminer ses conditions d'emploi ainsi que le risque éventuellement encouru.

6.2.1 Matériaux conducteurs

Nous avons vu (§ 5.3) que, pour éviter des décharges de très forte énergie, tout objet conducteur doit être relié électriquement à la terre. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que tout corps chargé s'approchant de l'objet conducteur subit une décharge brutale (il en serait d'ailleurs pratiquement de même si l'objet conducteur n'était pas relié à la terre).

6.2.2 Matériaux dissipateurs

Tout objet réalisé en matériau dissipateur doit être relié à la terre pour pouvoir écouler progressivement les charges. Dans ce cas, la décharge éventuelle d'un objet chargé se fait par une impulsion de courant plus faible (et donc moins destructive) que dans le cas d'un matériau conducteur. C'est donc le cas idéal pour éviter les nuisances ou les dangers de l'électricité statique.

6.2.3 Matériaux antistatiques

D'après la définition (§ 6.1), il est clair qu'un matériau antistatique a une résistivité et un temps de demi-décharge élevés. Il est donc très peu efficace de relier un tel objet à la terre. Dans la pratique,

une telle liaison ne présente pas d'inconvénient et peut même permettre une dissipation très lente des charges.

6.2.4 Matériaux isolants

Chaque fois que les conséquences de l'électricité statique sont redoutées, l'utilisation de matériaux isolants est à proscrire. Toutefois, lorsqu'on est contraint d'utiliser un matériau isolant (matériau transparent, isolant électrique), seule l'ionisation de l'air peut permettre de neutraliser les charges générées et/ou accumulées sur cet objet (§ 6.4.4).

6.3 Méthodes de mesure du temps de demi-décharge et de l'aptitude à la charge d'un matériau

6.3.1 Mesure du temps de demi-décharge

Le principe général de toute méthode de mesure du temps de demi-décharge consiste à déposer des charges sur la surface du matériau ou sur une électrode placée au contact de celle-ci, puis, au travers d'une mesure caractéristique de ces charges (champ, potentiel de surface, densité superficielle de charge...), d'enregistrer leur décroissance à partir de l'instant où un point du matériau est relié à la terre. Le temps nécessaire pour que la charge initiale soit réduite de moitié est appelé **temps de demi-décharge**. La courbe de décroissance de la charge enregistrée en pratique étant souvent différente d'une exponentielle, par suite de la variation de la résistivité du matériau en fonction du champ, il est souvent préconisé de déterminer le temps nécessaire pour diviser la charge initiale par 10 ou par 100. On parle alors de **temps de décroissance de la charge**. Différentes méthodes ont été développées pour mesurer cette caractéristique.

6.3.1.1 FTMS 101 C. Méthode 4046

L'appareillage nécessaire à la mise en œuvre de cette méthode (FTMS : *Federal Test Method Standard*) est représenté sur la figure 18. Il comporte deux électrodes et un système de mesure du champ produit par les charges présentes à la surface de l'échantillon. La méthodologie de l'essai consiste à raccorder, dans un premier temps, l'une des électrodes à une source de haute tension continue, puis à l'isoler. Dans un deuxième temps, l'autre électrode est raccordée brutalement à la terre. Le système de mesure enregistre alors la décroissance du champ qui correspond à l'élimination de la charge.

6.3.1.2 Projet CEI 15D (Secrétariat) 3

Ce projet décrit deux méthodes de mesure de la dissipation des charges :

- **autodissipation**, où les charges sont déposées sur la surface du matériau lui-même ; cette méthode permet d'évaluer la tendance d'un matériau à retenir des charges, notamment en cas d'inhomogénéités de surface ;

- **dissipation par contact**, où les charges sont déposées sur une électrode posée à la surface du matériau ; cette méthode caractérise l'aptitude d'un matériau à éliminer les charges d'un objet conducteur placé en contact avec lui ; elle s'applique particulièrement aux revêtements de sol.

Pour la méthode d'autodissipation, il est recommandé de charger la surface par effet couronne en prenant des précautions pour ne pas la modifier sous l'effet des décharges. Dans le cas de la dissipation par contact, l'électrode est chargée en la raccordant brutalement à une source de haute tension.

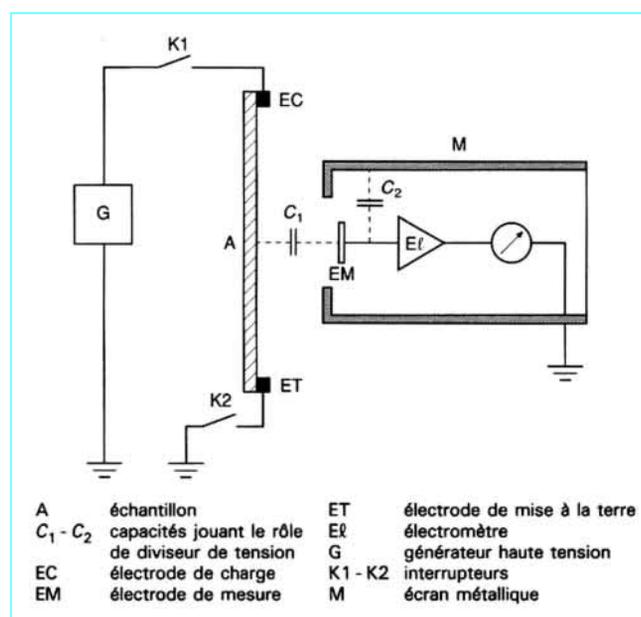


Figure 18 – FTMS 101 C. Méthode 4046 : schéma de principe de l'appareillage

6.3.2 Mesure de l'aptitude à la charge

Nous avons vu (§ 6.1) que, pour qualifier d'antistatique un matériau, il est nécessaire de disposer d'une méthode de mesure de l'aptitude à la charge. La difficulté de ce type de mesure réside dans la répétabilité souvent médiocre des essais.

Le rapport technique CEI 1087 décrit un dispositif de charges par frottement à l'aide de tissus de coton, polyamide 11 et polyacrylate.

Une méthode d'évaluation du comportement électrostatique par frottement est à l'étude par la CEI et fait l'objet du document 15D (Secrétariat) 4.

6.4 Matériaux et produits de lutte contre l'électricité statique

6.4.1 Généralités

Pour éviter les nuisances dues à l'électricité statique (§ 4), il convient de disposer de matériaux dissipateurs et antistatiques.

Remarquons, tout d'abord, que certains matériaux naturels comme le **bois** et le **papier** sont généralement dissipateurs dans des humidités relatives normales. Toutefois, en cas d'utilisation en humidité relative faible (< 30 %), ils peuvent accumuler de l'électricité statique. Le **béton**, qui constitue de nombreux sols industriels, est également dissipateur.

À l'inverse, les **matériaux synthétiques** de plus en plus largement utilisés (matières plastiques, par exemple) sont presque toujours isolants. Ils doivent donc être modifiés pour les rendre dissipateurs ou antistatiques. Nous présenterons succinctement ici quelques moyens utilisés pour modifier les propriétés des matériaux. On donnera quelques indications sur les éliminateurs d'électricité statique et sur quelques autres produits. Le lecteur se reportera, pour plus de détails, à la liste des fournisseurs de ce type de produits donnée dans la bibliographie [50].

6.4.2 Matériaux dissipateurs

Pour rendre un matériau dissipateur, il convient d'augmenter légèrement sa conductivité en vérifiant que son temps de dissipation des charges est suffisamment faible (§ 6.1).

■ Les **polymères intrinsèquement conducteurs** ne sont pas encore utilisés pour ce type d'application pour des raisons de coût et de stabilité des performances dans le temps.

■ On utilise donc, en général, des **matériaux chargés avec des poudres** (noir de carbone, poudres métalliques...) **ou des fibres** (de carbone, métalliques, de verre métallisées...).

Dans le cas des **poudres**, les propriétés du matériau obtenu dépendent de la conductivité de la poudre utilisée (il existe des noirs de carbone de résistivités très différentes [51], de sa granulométrie et du taux de charge. Le phénomène de percolation entraîne une transition assez brutale de la conductivité du matériau lorsque l'on augmente la teneur en charge. Ces matériaux ont en général des propriétés quasi homogènes. Certains produits sont obtenus en enrobant les granulés de polymère avec la poudre de carbone, puis en comprimant l'ensemble pour obtenir des plaques. Le matériau présente alors un aspect marbré avec un réseau de *filaments* conducteurs. L'inconvénient majeur des matériaux chargés en carbone est souvent leur couleur noire. Lorsque des produits décoratifs sont recherchés, on réalise des stratifiés dans lesquels la couche dissipatrice noire est *enterrée* sous une couche décorative qui doit par ailleurs procurer les autres propriétés (résistance à l'abrasion, à la chaleur...).

Avec les **fibres**, la résistivité dépend également de la longueur des fibres et de leur masse volumique. Des produits quasi homogènes sont obtenus en utilisant un fort taux de fibres longues ou courtes. Par contre, certains produits (notamment textiles) sont réalisés avec un maillage (quelques millimètres à plusieurs centimètres entre les fibres) de fibres longues.

Nota : d'une manière générale, les matériaux inhomogènes (stratifiés, textiles maillés...) posent des problèmes de mesure et on doit tenir compte de leur structure pour interpréter les résultats.

6.4.3 Matériaux antistatiques

Un matériau antistatique est un matériau qui génère peu de charges par contact et frottement (§ 6.1). Dans la pratique, la quasi-totalité des agents antistatiques sont des additifs qui modifient à la fois l'aptitude à la charge et le temps de demi-décharge des matières plastiques ou des textiles auxquels on les incorpore. La plupart des agents antistatiques sont des composés hygroscopiques. Ils agissent en formant une couche superficielle d'une solution aqueuse riche en ions qui abaisse la résistivité superficielle sans que la résistivité volumique soit affectée.

L'efficacité d'un agent antistatique dépend de son degré hygroscopique, qui lui permet de fixer l'humidité de l'air ambiant, et de sa capacité à fournir des ions à cette couche aqueuse.

Citons quelques agents antistatiques connus en renvoyant le lecteur à la bibliographie pour plus de détails [52] [53] :

- sels alcalins (chlorure de lithium) ;
- sels d'ammonium quaternaire ;
- esters d'acides gras (butylstéarate) ;
- glycérol ;
- amines, amides...

L'efficacité de ces agents antistatiques peut décroître dans le temps par suite de l'évaporation, de la migration vers la masse du matériau ou du passage en solution (lavages répétés). Pour être durable, un agent antistatique doit former un réseau réticulé à la surface du matériau traité. Plusieurs produits sont disponibles commercialement. Ce sont souvent des polyamines réticulées contenant des segments polyéthoxyde.

6.4.4 Éliminateurs d'électricité statique

Nous avons vu (§ 6.2) que la seule solution pour éliminer les charges statiques accumulées sur un isolant consiste à utiliser l'ionisation de l'air. Les charges accumulées sur l'isolant attirent les ions de polarité opposée présents dans l'air et sont ainsi neutralisées. On distingue deux grandes familles d'éliminateurs selon le mécanisme employé pour ioniser l'air :

- les éliminateurs à induction et à haute tension utilisant l'effet couronne ;
- les éliminateurs radioactifs utilisant le rayonnement.

6.4.4.1 Éliminateurs à induction

Un éliminateur à induction est constitué d'une ou plusieurs pointes reliées à la terre. Sous l'effet de la charge statique à éliminer, une charge de signe contraire est induite au niveau des pointes, provoquant ainsi l'ionisation de l'air ambiant par effet couronne. Ce type d'éliminateur ne libère donc des ions qu'en présence d'une charge à éliminer et il doit être placé très près de la surface à neutraliser. Pour éviter le remplacement d'une charge d'une polarité par celle de polarité opposée (par effet de surcompensation), on peut disposer au moins deux éliminateurs inductifs voisins l'un de l'autre.

6.4.4.2 Éliminateurs à haute tension

Ce type d'éliminateurs est constitué d'une série de pointes ou d'un fil fin connecté à une source de haute tension alternative de l'ordre de 10 kV (valeur efficace) ou à des sources de haute tension continue. Cette électrode va donc libérer alternativement des *bouffées* d'ions négatifs et d'ions positifs qui vont neutraliser les charges statiques environnantes. Pour améliorer le rayon d'action de ce type de neutraliseurs en diminuant la recombinaison des ions, on peut propulser l'air par un ventilateur ou utiliser de l'air comprimé.

Une amélioration de ce système consiste à alimenter l'éliminateur par de l'air comprimé légèrement humide qui passe à travers une tuyère supersonique (figure 19). Le refroidissement provoqué par la détente condense préférentiellement la vapeur d'eau sur les ions. Cet artifice permet, en diminuant fortement la mobilité des ions, de réduire la recombinaison [54].

Une difficulté liée aux éliminateurs à haute tension est l'équilibre des flux d'ions positifs et négatifs afin d'éviter qu'une surface initialement neutre ne se charge progressivement sous l'effet du courant d'air ionisé.

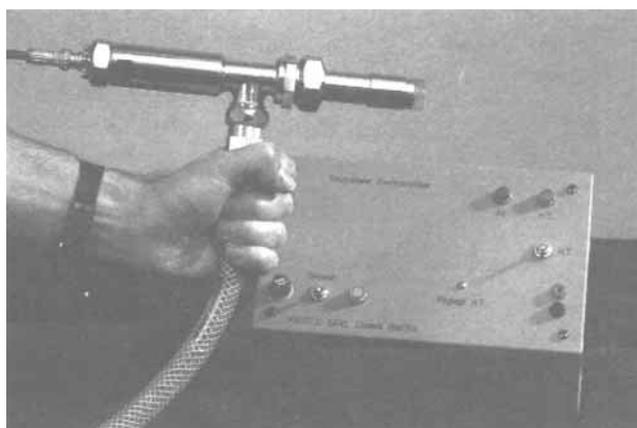


Figure 19 – Éliminateur d'électricité statique type ECS1 (licence ONERA) (doc. VALITEC)

6.4.4.3 Éliminateurs radioactifs

Les éliminateurs radioactifs comportent le plus souvent une source de polonium 210 qui émet des particules α . Ces particules ionisent l'air ambiant. L'intérêt principal de ces éliminateurs est qu'ils n'ont pas besoin d'être alimentés en énergie. Leur inconvénient majeur réside dans les contraintes liées à l'emploi de sources radioactives, bien que les sources utilisées ici ne constituent pas un danger d'irradiation. Par ailleurs, ils ont une durée de vie limitée (environ 1 an) et doivent donc être remplacés périodiquement.

Ces éliminateurs ayant des débits ioniques plus faibles (environ 10 fois) que ceux des éliminateurs à haute tension sont moins efficaces que ces derniers lorsque la densité de charges à éliminer est élevée ($> 1\,000\text{ pC/cm}^2$). Par contre, ils donnent une neutralisation plus complète lorsque le niveau de charge est faible. Une solution très efficace consiste donc à les utiliser en complément d'un éliminateur à induction.

6.4.5 Autres produits de lutte contre l'électricité statique

Une catégorie importante est constituée par tous les produits destinés à assurer la liaison équipotentielle des opérateurs à la terre.

■ Le plus connu est le **bracelet** utilisé aux postes fixes de travail. Il est constitué d'une bande de tissu élastique généralement rendu conducteur (par exemple par des fibres métalliques) et/ou d'une pièce métallique directement en contact avec la peau. Ce bracelet est muni d'un cordon permettant de le connecter électriquement à un point de terre. Une résistance est insérée en série entre le bracelet et le cordon afin :

- d'une part, d'assurer la sécurité électrique de l'opérateur, en cas de contact avec une pièce sous tension ;
- d'autre part, de réduire la valeur de crête de l'impulsion de courant, en cas de décharge d'un objet chargé sur l'opérateur.

La valeur de cette résistance est habituellement de $1\text{ M}\Omega$. Pour être efficace, le bracelet doit être porté sur la peau et correctement entretenu. Sa résistance doit être vérifiée périodiquement.

■ Il existe d'autres produits destinés à écarter les charges des opérateurs qui ne travaillent pas à poste fixe : ce sont les **chaussures dissipatrices** et les **talonnets**. Les premières comportent une liaison électrique entre la semelle intérieure en contact avec le pied et la semelle extérieure en contact avec le sol. Les secondes se placent dans la chaussure de l'opérateur et recouvrent le talon pour assurer la même fonction. Ces produits écoulent les charges par l'intermédiaire du revêtement de sol. Ils ne sont donc efficaces que sur des sols dissipateurs ou conducteurs. On doit surveiller leur encrassement qui peut réduire gravement leur efficacité.

■ Tous les **matériaux et produits d'emballage** jouent également un rôle très important, car ils sont en contact direct avec les éléments sensibles à l'électricité statique. Il est impossible de détailler ici tous les produits antistatiques ou dissipateurs utilisés pour l'emballage. On citera seulement le cas des sacs pour composants ou cartes électroniques. En effet, à côté des sacs antistatiques en polyéthylène rose ou noir, on trouve des produits multifonctions généralement obtenus par un empilage de couches :

- polymère transparent assurant les propriétés mécaniques ;
- couche interne antistatique pour éviter la génération de charges par frottement sur les composants ;
- couche très conductrice faisant blindage contre les champs électromagnétiques ; pour garder la transparence cette couche est obtenue par un dépôt métallique très mince ;
- d'autres couches peuvent être ajoutées pour protéger la précédente...

On peut citer, comme autres exemples, les réglottes pour composants électroniques, les boîtes...

6.5 Mise en pratique de la lutte contre l'électricité statique

Pour mettre en pratique les principes de la lutte contre les nuisances dues à l'électricité statique, on adoptera la méthodologie suivante :

- a)** rechercher les endroits où les charges s'accumulent par des mesures de potentiel, de champ ou de densité de charge ;
- b)** en déduire les endroits où les charges sont générées ;
- c)** étudier les possibilités :
 - de réduire la génération de charges,
 - d'éviter l'accumulation de charges,
 - de protéger les éléments sensibles ;
- d)** choisir les solutions à retenir selon les critères techniques, économiques... ;
- e)** sélectionner les matériaux (conducteurs, dissipateurs, anti-statiques, blindages...) et les produits (éliminateurs, dispositifs de mise à la terre...) à utiliser et les qualifier par des essais en laboratoire ;
- f)** définir les conditions d'emploi de ces matériaux selon leurs caractéristiques ;
- g)** vérifier *après pose* que les caractéristiques recherchées sont bien obtenues par des mesures sur site ;
- h)** rechercher des éléments relatifs à la durée de vie des matériaux et produits utilisés ;
- i)** contrôler périodiquement par des mesures sur site que les caractéristiques restent acceptables ;
- j)** former le personnel afin que, comprenant le risque électrostatique, il applique les mesures de sécurité.

Différents documents peuvent être consultés pour aider à cette mise en pratique [Doc. D 1 036].

7. Applications de l'électricité statique

Historiquement, la première application de l'électricité statique a été la réalisation de générateurs. Bien que limités à des cas très particuliers, on utilise toujours, en 1993, des générateurs électrostatiques. Toutes les autres applications exploitent les forces électrostatiques pour déplacer des particules solides ou des gouttelettes liquides dans un gaz ou dans un autre liquide.

7.1 Générateurs électrostatiques

D'une manière générale, ces générateurs permettent de convertir une énergie mécanique en énergie électrique. Ce sont des sources de haute tension généralement limitées à des valeurs faibles de courant (quelques milliampères).

■ Le **générateur** le plus connu est celui de **Van de Graaf** [55]. Des charges sont créées, à la partie inférieure de la machine (figure 20), par effet couronne et déposées sur une courroie qui les entraîne à la partie supérieure où elles sont collectées sur une électrode à haute tension à nouveau par effet couronne.

La principale application de ces machines, qui peuvent générer des tensions de plusieurs mégavolts et des courants de quelques microampères, est la réalisation d'accélérateurs de particules pour la physique nucléaire. La plus grosse machine de ce type a été réalisée à Strasbourg (*Vivitron* 35 MV) [56].

■ Pour réaliser des **générateurs** plus compacts, on a remplacé la courroie par un **cylindre isolant tournant** dans l'hydrogène comprimé (figure 21). Des générateurs de ce type, proposés par le Professeur Félici, ont été construits à Grenoble, par la Société

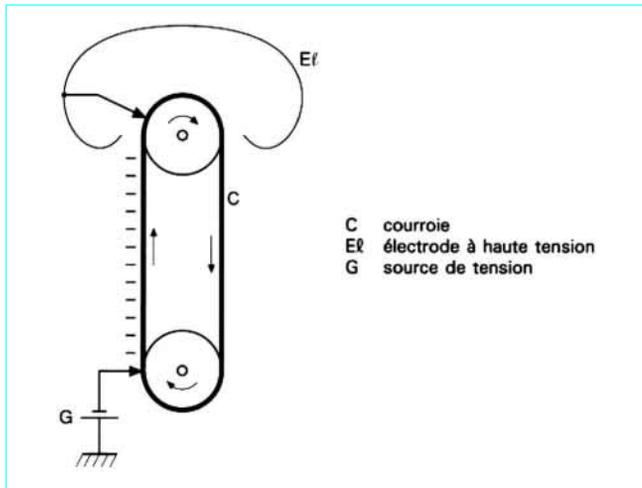


Figure 20 – Générateur haute tension de type Van de Graaf : schéma de principe

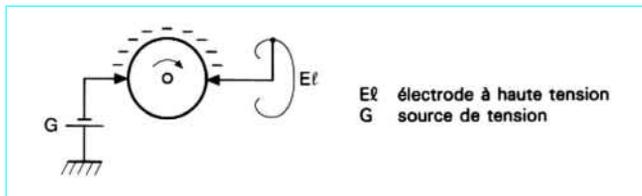


Figure 21 – Générateur haute tension à cylindre tournant (Félici) : schéma de principe

Sames (pour la physique, les essais en haute tension continue, la peinture et le poudrage électrostatiques) jusqu'à des niveaux de tension de plusieurs centaines de kilovolts et quelques dizaines de milliampères. Leur caractéristique essentielle est une remarquable stabilité en tension.

■ Ils sont aujourd'hui remplacés par des **générateurs statiques électroniques** présentant toujours une ondulation résiduelle gênante dans certaines applications.

7.2 Électrophotographie

Procédé de reproduction d'images par une méthode électrostatique, l'électrophotographie a été inventée, en 1938, par Chester Carlson. Elle a connu depuis un développement considérable avec, d'abord, la photocopie, puis, plus récemment, l'impression dite *laser*.

Le procédé comporte sept étapes essentielles (figure 22). Nous allons décrire succinctement chacune de ces étapes en insistant davantage sur celles qui font appel à l'électricité statique [57].

La charge du photoconducteur (figure 22a) est obtenue par effet couronne grâce à une électrode (généralement un fil fin) portée à une haute tension continue positive (quelques kilovolts). Dans certains cas, cette électrode, appelée *corotron*, est munie d'une grille polarisée qui permet de contrôler le potentiel de la surface du photoconducteur.

Un photoconducteur est un matériau isolant dans l'obscurité qui devient conducteur dès qu'il est éclairé. Le plus connu de ces matériaux est le sélénium. La deuxième étape consiste donc à éclairer le photoconducteur préalablement chargé de manière à faire disparaître les charges par conduction aux endroits éclairés (figure 22b) :

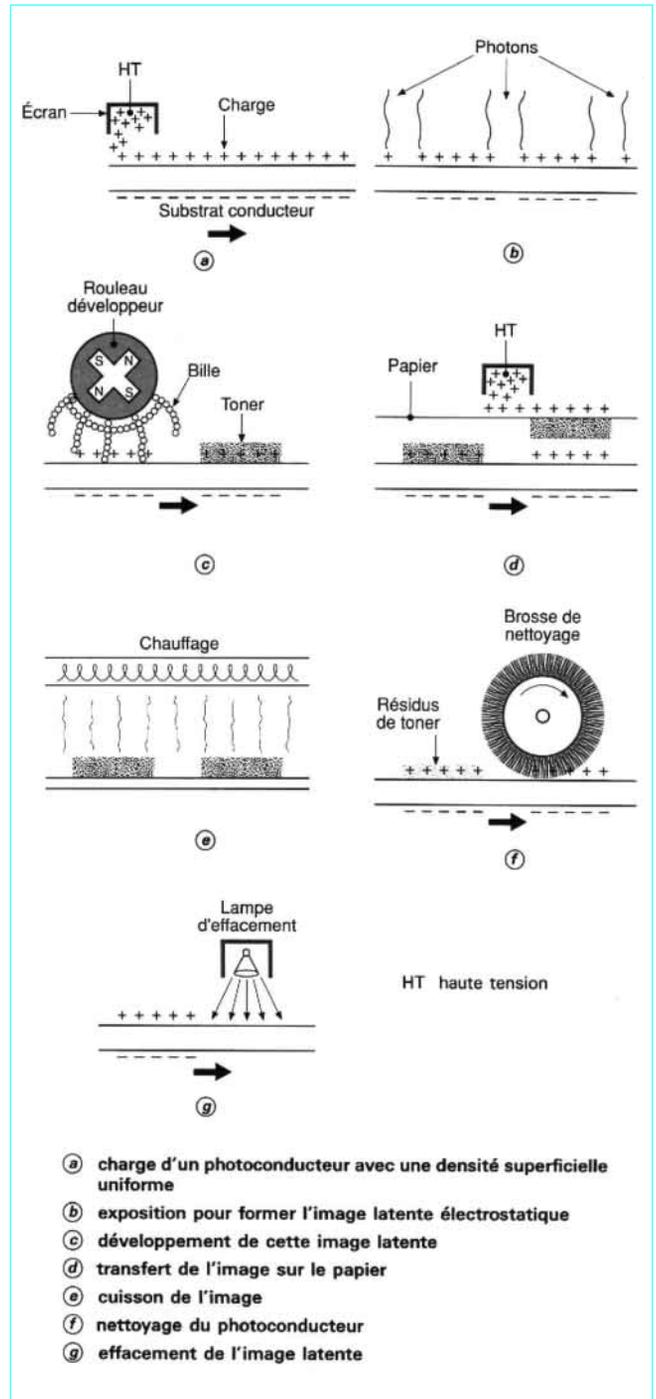


Figure 22 – Processus xérophotographiques : les sept étapes

— dans un photocopieur, on projette sur le photoconducteur l'image réelle à reproduire ;
— dans une imprimante, le laser reproduit les points d'une image numérisée.

Le développement de cette image latente électrostatique est obtenu en déposant sur le photoconducteur une poudre colorée et chargée, appelée *toner*, qui peut être mono- ou bicomposants (figure 22c). Le transfert de l'image latente révélée est réalisé en

déposant, par effet couronne, des charges de polarité adéquate sur la face du papier opposée à l'image (figure 22d). L'image transférée est ensuite fixée par chauffage (figure 22e). La neutralisation du papier est également réalisée par effet couronne.

7.3 Peinture et poudrage électrostatiques

■ Les **peintures liquides** sont utilisées dans de nombreuses applications industrielles. L'atomisation du liquide en fines gouttelettes peut être obtenue par des systèmes à air comprimé ou par centrifugation. Un procédé permettant de charger électriquement les gouttelettes améliore l'efficacité du dépôt sur les pièces métalliques reliées à la terre ainsi que la régularité de la couche déposée. Pour peindre, par ce procédé, les pièces isolantes (matières plastiques par exemple), il convient au préalable de les rendre conductrices en surface. On peut, dans certains cas, placer une pièce métallique derrière la pièce à peindre ou projeter des charges sur l'envers de cette même pièce à l'aide d'un **neutraliseur**. Le procédé de peinture électrostatique est largement utilisé dans l'automobile ou l'appareillage électrodomestique.

■ Depuis les années soixante-dix s'est développé le **poudrage électrostatique** [58] permettant de déposer des peintures ou des revêtements sans solvant avec, pour avantage principal, la possibilité de réutiliser la poudre qui n'a pas atteint la pièce à peindre. Pour les pièces de petites dimensions (de l'ordre de quelques 10 cm), on peut utiliser un lit fluidisé dans lequel la poudre est chargée par des électrodes à effet couronne.

■ Pour terminer avec les procédés de peinture mettant en œuvre des techniques électrostatiques, on peut citer l'**électrophorèse**. Il s'agit d'un procédé dans lequel la pièce conductrice à peindre est immergée dans un bain contenant une électrode portée à un potentiel de quelques centaines de volts par rapport à celle-ci.

Les composants de la peinture en solution dans l'eau migrent sous l'effet du champ électrique et réagissent aux électrodes en se déposant. Il s'agit de sels organiques de polymères rendus solubles en ajustant le pH de la solution et de particules de pigment. La plus grande application de ce procédé est le traitement anticorrosion des carrosseries de véhicules.

Signalons que l'électrophorèse est également une méthode de séparation électrochimique qui peut servir soit à l'analyse, soit à la préparation [59].

7.4 Dépoussiéreurs électrostatiques

Un dépoussiéreur électrostatique ou électrofiltre utilise l'effet couronne pour ioniser les poussières contenues dans l'air, les accélérer et les déposer sur des électrodes collectrices d'où elles seront éliminées par frappeage ou lavage. Un électrofiltre est donc constitué essentiellement :

- d'électrodes émissives (fils de section triangulaire, carrée ou cruciforme, fils *barbelés* ou ressorts tendus) ;
- d'électrodes collectrices en forme de plaques parallèles ou de tubes (tôles laminées à froid, métal déployé, tiges, chaînes...) ;
- d'un système de nettoyage des électrodes soit par frappeage à l'aide de marteaux, soit par douchage périodique du système ; ce dernier système nécessite alors l'arrêt du fonctionnement, car il ne peut s'effectuer sous tension.

Il existe des dépoussiéreurs de petite taille (quelques dizaines de centimètres) destinés à l'élimination de fumées ou vapeurs pour régénérer l'air d'une pièce. Les centrales thermiques, les usines d'incinération d'ordures ménagères ou les hauts fourneaux nécessitent l'utilisation de dépoussiéreurs de grandes dimensions (environ 10 m). On trouvera dans la bibliographie [60] un guide de choix en fonction de l'utilisation.

7.5 Applications diverses

Il existe un grand nombre d'autres applications de l'électricité statique moins répandues que celles qui viennent d'être citées. Nous en décrivons succinctement quelques-unes.

7.5.1 Séparateur électrostatique

Cette application permet de séparer des matériaux en fonction de leur conductivité et de la taille des particules. Celles-ci sont chargées par effet couronne et adhèrent ainsi à un support conducteur (figure 23). Les particules les plus conductrices sont facilement séparées de ce support en passant en face d'une électrode qui les charge par induction, tandis que les particules isolantes doivent être raclées pour se détacher du support [61].

7.5.2 Contacteur électrostatique

L'extraction liquide-liquide est un procédé de séparation qui utilise la distribution inégale des constituants à séparer dans deux liquides non miscibles. L'application d'un champ électrique permet d'agir sur chaque étape du transfert par rupture des gouttes sous l'effet de la pression électrostatique, par transport des gouttes sous l'effet des forces d'électrophorèse et de diélectrophorèse, par coalescence [62].

Un contacteur électrostatique est un appareil qui, par application d'un champ électrostatique, permet de mettre en contact (d'où son nom) deux liquides non miscibles ou, au contraire, de les séparer.

La séparation pétrole-eau est une application envisagée.

7.5.3 Utilisation des fluides électrorhéologiques

L'effet électrorhéologique (ou électrovisqueux), décrit pour la première fois par Winslow en 1949, correspond au phénomène de modification de la viscosité d'un liquide lorsqu'on lui applique un champ électrique. Il est surtout marqué pour des suspensions de particules dans une huile isolante.

Pour que l'effet électrorhéologique apparaisse, il faut une concentration en volume des particules de 20 à 40 %. Les particules doivent être plus conductrices que le liquide et avoir des tailles de 4 à 20 μm environ.

Le phénomène est dû à la formation de *fibres* de particules sous l'effet du champ [63].

Les applications sont assez prometteuses pour l'avenir, notamment dans le domaine de l'amortissement des vibrations mécaniques [64].

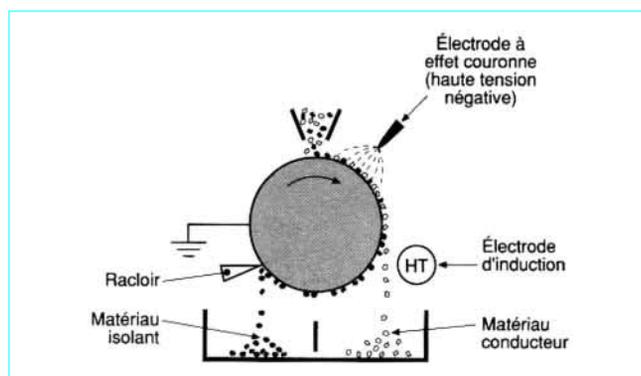


Figure 23 – Séparateur électrostatique à tambour tournant

Électricité statique

Principes. Problèmes. Applications

par **Claude MENGUY**

Chef de service au Laboratoire Central des Industries Électriques (LCIE)

Bibliographie

Ouvrages généraux

BERTIN (M.) et al. – *Électromagnétisme 1*. Dunod Université.

FOURNET (G.). – *Électromagnétisme*. Masson éd. (1985).

Électrostatique

[1] FOURNET (G.). – *Électromagnétisme*. D 1 020, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, mars 1993.

[2] BAIXERAS (J.). – *Conduction électrique dans les solides*. D 155, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, sept. 1985.

[3] FOURNIÉ (R.). – *Diélectriques. Bases théoriques*. D 213, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, juin 1986.

[4] MacALLISTER (D.). – *Computer modelling in electrostatics*. Research Studies Press.

Mesures

[5] LECONTE (A.). – *Mesures en électrotechnique*. D 1 500, D 1 501, D 1 502, et D 1 503, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, sept. 1995.

[6] DUCLUZEAUX (A.). – *La mesure électrique au temps des pionniers*. RGE n° 10, p. 4-16, nov. 1990.

[7] ELNÉKAVÉ (N.). – *Diviseurs de tension ou de courant*. R 1 005, traité Mesures et Contrôle. Techniques de l'Ingénieur, janv. 1987.

[8] *Low level measurements. For effective low current, low voltage and high impedance measurements*. Keithley.

[9] Application note ES - 31 : *Electrostatic voltmeters*. Monroe Electronics Inc. (représenté en France par ETAT).

[10] Catalogue Trek (représenté en France par Optilas).

[11] DAVIES (K.). – *Méthodes de mesure en électrostatique*. Séminaire LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[12] BERTEIN (H.). – *Application de la méthode des figures de poudres à l'étude de la décharge par effet couronne dans les isolants*. RGE (1960).

[13] TOUREILLE (A.). – *Mesures de charges d'espace par la méthode de l'onde thermique : différentes techniques de validation numérique et expérimentale*. Journées d'études SEE Electrostatique, 12/13 mai 1992.

[14] ALQUIÉ (C.). – *Étude de la distribution de charges électriques par perturbation locale induite par laser*. Thèse de doctorat Paris (1983).

[15] LEWINER (J.) et al. – *La méthode de l'onde de pression : perfectionnement et application à des matériaux pour câbles à courant continu*. Journées d'études SEE Isolants électriques, 29/30 nov. 1989.

Électrisation

[16] GERL (M.). – *Phénomènes de transport*. A 247, traité Sciences fondamentales. Techniques de l'Ingénieur, nov. 1976.

[17] COSTE (J.). – *Idées actuelles sur l'origine des charges électrostatiques : phénomènes de contact et de frottement*. Journées d'études SEE Electrostatique, sept. 1984.

[18] DAVIES (K.). – *Contact electrification of polymers*. p. 285-318 dans l'ouvrage « *Electrical properties of polymers* » édité par D.A. Seenor. Academic Press (1982).

[19] CROSS (J.). – *Electrostatics-Principles, problems and applications*. p. 29-31, Adam Hilger, Bristol.

[20] GRACIET (M.). – *Protection contre les perturbations*. D 5 170, D 5 171, D 5 172 et D 5 173, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, mai 1998.

[21] KLINKENBERG (A.). – *Static electricity in liquids*. Static Electrification Conference, p. 63-68 (1967).

[22] GIBSON (N.). – *Static in fluids*. Static Electrification Conference, p. 71-83 (1971).

[23] OTTEWILL (R.H.). – *Electrostatics in colloidal science*. Inst. Phys. Conf. Ser. n° 27, p. 56-73 (1975).

[24] FÉLICI (N.). – *Conduction and electrification in dielectric liquids : two related phenomena of the same electrochemical nature*. Journal of Electrostatics n° 15, p. 291-297 (1984).

[25] ATTEN (P.). – *Mouvement d'un fluide en présence d'un champ électrique*. D 2 850, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, nov. 1999.

[26] TOUCHARD (G.). – *Streaming currents developed in laminar and turbulent flow through a pipe*. Journal of Electrostatics n° 5, p. 463-476 (1978).

[27] WALMSLEY (H.L.). – *The generation of electric current by the turbulent flow of dielectric liquids : I. long pipes*. J. phys. D-Applied Physics. Vol. 15, p. 1907-1934 (1982).

[28] WALMSLEY (H.L.). – *The generation of electric current by the turbulent flow of dielectric liquids : II. pipes of finite length*. J. phys. D-Applied Physics. Vol. 16, p. 553-572 (1983).

Nuisances et dangers de l'électricité statique

[29] TAILLET (J.). – *Investigation procedures applied to major electrostatic accidents in complex systems*. Electrostatics. Inst. Phys. Conf. Series n° 118 (1991).

[30] TAILLET (J.). – *Phénomènes physiques intervenant dans l'électrisation au cours du transport de matière et leurs conséquences dans l'industrie*. Journées d'études SEE Electrostatique, 12-13 mai 1992.

[31] GLOR (M.). – *Electrostatic hazards in powder handling*. Research Studies Press Ltd.

[32] POINTU (A.M.). – *Plasmas froids de décharge*. D 2 830 et D 2 835, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, fév. 1998 et nov. 1997.

[33] FALLOU (B.). – *Origine des principales nuisances électrostatiques*. Séminaire LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[34] BONNOT (G.). – *Impact des charges électrostatiques sur la contamination des surfaces*. Séminaire LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[35] GREASON (W.D.). – *Electrostatic damage in electronics : devices and systems*. Research Studies Press Ltd.

[36] TAYLOR (D.M.). – *Electrostatic discharges*. Conférence ESD 90. Electrostatic damage to electronics, Southampton, 25-26 avril 1990.

[37] AVERY (L.R.). – *Beyond MIL HBM testing : how to evaluate the real capability of protection structures*. Journal of Electrostatics. vol. 28, n° 3, p. 301-311, sept. 1992.

[38] SILVESTRE (M.). – *Caractéristiques d'explosivité et de toxicité des principaux gaz et vapeurs inflammables*. RGS n° 14, p. 69-74, mai 1982.

[39] GUIONNET (D.). – *Poussières et poudres*. Séminaire LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[40] SPENCER (A.J.). – *Device damage*. Conférence ESD 90. Electrostatic damage to electronics, Southampton, 25-26 avril 1990.

[41] CHAMPIOT (G.). – *Une aide à l'industrie : la norme d'immunité aux décharges électrostatiques : Publication CEI 801-2*. Séminaire LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[42] GIBSON (N.). – *Electrostatic hazards in chemical industry*. Séminaire Electrostatic problems in industry. Londres, 13-14 déc. 1983.

[43] GIOCOLI (R.). – *Charges électrostatiques dans l'industrie pétrolière*. Séminaire SPRINT Rome, 13-14 juin 1989.

[44] LEONARD (J.T.). – *Generation of electrostatic charges in fuel handling systems : a literature survey*. NRL Report 8484. Washington DC.

[45] BUSTIN (W.M.) et DUKEK (W.G.). – *Electrostatic hazards in the petroleum industry*. Research Studies Press Ltd.

Lutte contre l'électricité statique nuisible ou dangereuse

[46] ANTINONE (R.J.). et al. – *Electrical over-stress protection for electronic devices*. Noyes Publications.

[47] DESMONS (A.). – *Tenues des circuits intégrés à l'application de décharges électrostatiques*. Séminaires LCIE Nuisances d'origine électrostatique dans l'industrie, 24/25 oct. 1988.

[48] BOXLEITNER (W.). – *Electrostatic discharge and electronic equipment*. IEEE Press.

[49] MARDIGUIAN (M.). – *Electrostatic discharge. Understand simulate and fix ESD problems*. Interference control technologies Inc. Gainesville. Virginia.

[50] EOS/ESD technology review, août-sept. 1992.

[51] PROBST (N.). – *Le noir de carbone, la solution des problèmes posés par l'électricité statique*. Journées d'études SEE Électrostatique, 25-26 oct. 1984.

[52] CARETTE (L.). – *Antistatiques. Lubrifiants. Antichocs*. A 3 236, traité Plastiques et Composites. Techniques de l'Ingénieur, août 1993.

[53] HAVENS (M.R.). – *The chemistry of pink polyethylene*. EOS/ESD Technology, fév.-mars 1990.

[54] TAILLET (J.). – *Élimination des charges électrostatiques engendrées dans le traitement des produits pulvérulents*. Journées d'études SEE Électrostatique, 12-13 mai 1992.

Applications de l'électricité statique

[55] FRICK (G.). – *Machines électrostatiques*. D 590, traité Génie électrique. Techniques de l'Ingénieur, déc. 1994.

[56] LETOURNEL (M.). – *Le Vivitron : un Van de Graaf tandem de 35 MV*. Journées d'études SEE Électrostatique et Générateurs haute tension.

[57] SCHARFE (M.). – *Electrophotography, principles and optimization*. Research Studies Press Ltd.

[58] HUGHES (J.F.). – *Electrostatic powder coating*. Research Studies Press Ltd.

[59] GAREIL (P.) et PELTRE (G.). – *Électrophorèse*. P 1 815, traité Analyse et Caractérisation. Techniques de l'Ingénieur, oct. 1995.

[60] *Electrostatic precipitators : product guide*. Modern power systems, août 1992.

[61] CROSS (J.). – *Electrostatics : principles, problems and applications*. P. 237-248. Adam Hilger. Bristol.

[62] MARTIN (L.). et al. – *Contacteur électrostatique pour l'extraction liquide/liquide*. Journées d'études SEE Électrostatique, 25-26 oct. 1984.

[63] ATTEN (P.). et al. – *Modèle à grande échelle de l'interaction entre particules dans un fluide électrorhéologique*. Journées d'études SEE Électrostatique, 12-13 mai 1992.

[64] SPROSTON (J.L.). et al. – *The electro-rheological automotive engine mount*. Journées d'études SEE Électrostatique, 12-13 mai 1992.

Normalisation

Commission Électrotechnique Internationale CEI

93 1980 Méthodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides.

801-2 1991 Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. 2^e partie : Prescriptions relatives aux décharges électrostatiques.

1087 1991 Guide d'évaluation des décharges provenant d'une surface chargée.

Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)

CECC 00 015 1991 Système harmonisé d'assurance de la qualité des composants électroniques. Spécification de base. Protection des produits sensibles aux décharges électrostatiques. Partie 1. Règles générales. (EN 100 015)

Union Technique de l'Électricité UTE

Association Française de Normalisation AFNOR

NF C 26-215 03.82 Méthodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides.

NF C 46-021 01.86 Compatibilité électromagnétique principalement pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. Prescriptions relatives aux décharges électrostatiques.

NF T 51-080 04.84 Plastiques. Mesurage de la résistivité des plastiques conducteurs.

British standards

BS 5783 1984 Code of practice for handling of electrostatic sensitive devices.

BS 5958 Code of practice for control of undesirable static electricity.

1980 Part 1 : General considerations

1991 Part 2 : Recommendations for particular industrial situations.

American Society for Testing and Materials ASTM

ASTM D 4470 91 Standard test method for static electrification.

American National Standards Institute ANSI

Electronic Industries Association EIA

Department of Defence DOD

Federal test Method Standard FTMS

ANSI/EIA 541 1988 Packaging material standards for ESD sensitive items.

DOD HDBK 263 Electrostatic discharge control handbook for protection of electrical and electronics parts assemblies and equipment (excluding electrically initiated explosive devices).

FTMS 101C Method 4046 Electrostatic properties of materials.

International Standards Organization ISO

ISO 3915 1981 Plastiques. Mesurage de la résistivité des plastiques conducteurs.

Australian Standard AS

AS 1020 The control of undesirable static electricity.

Laboratoire Central des Industries Électriques LCIE

Guide de bonne pratique à l'usage des industries électriques et électroniques : il propose la définition de différentes classes de zones de sécurité électrostatiques adaptées à la sensibilité des composants ou matériels qui y sont manipulés.

Fournisseurs

Fournisseur	Produits																					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
Acheson Colloiden B.V. (NL)															*							
Bijl B.V. (NL)	*		*	*			*			*		*				*				*		
Bondline (GB)	*		*	*	*	*	*	*		*	*	*				*	*			*	*	
Bystat Inc. (CDN)	*	*	*	*	*	*	*	*		*		*	*	*		*	*		*	*		
Cabot Plastics International (B)															*							
Davum-TMC (F)	*		*				*	*	*			*		*		*			*	*		
Elcom GmbH (RFA)																				*		
Elcowa (F)								*													*	
Eltex (F)								*													*	
Formica (F)										*												
Fosroc (F)										*												
Gerland (F)										*												
B.F. Goodrich (B)												*				*	*	*			*	
Grace SA (F)	*															*						
Graseby Plastic Systems Inc. (USA)	*	*	*	*		*				*		*		*					*	*		
Hans Kolb Wellpappe GmbH (RFA)							*									*						
Key Tek Instrument Corp (USA)																					*	
LCIE (F)																	*					*
3M France (F)	*		*	*	*		*	*		*	*	*	*			*	*			*	*	
MJB (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*			*	*					
PMT Partikel Messtechnik GmbH (RDA)								*														
Polyrey (F)										*												
SDEP (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*				*	
SJM Eurostat (F)	*		*	*		*	*	*	*	*	*	*	*			*	*				*	
Simco Nederland B.V. (NL)	*	*	*	*			*	*				*				*				*	*	
Sommer (F)										*												
Static Limited (GB)	*				*			*													*	
Teknis Limited (GB)	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*	*	*		*	*			*	*	
Valitec (F)								*														
Verifier Systems Limited (GB)																					*	
Vermason Limited (GB)	*		*	*	*		*				*	*	*	*		*	*					
Viteo Composite Systems (GB)			*				*			*		*				*						
(1) Sacs et films d'emballage (2) Vêtements (3) Bracelets et talonnettes (4) Étiquetage et affichage (5) Mobilier (6) Chaussures (7) Mousses de protection (8) Éliminateurs (9) Gants (10) Revêtements de sol et/ou de plan de travail (11) Accessoires électriques	(12) Tapis dissipateurs (sol et plan de travail) (13) Audits - Assistance (14) Équipement de maintenance sur site (15) Matériaux et revêtements pour blindage (16) Conteneurs - Boîtes de stockage (17) Châssis pour cartes (18) Machines industrielles (19) Produits de finition pour sols (20) Équipement de mesure, de contrôle et d'essai (21) Matériaux pour formage sous vide (22) Essais - Études																					

Société	Produits
Bijl	Richmond
Bondline	Erem, A.P.S., Prostat Static Prevention Inc.
Cabot	Cabot plastics internat.
Davum-TMC	Plastic Systems Otter, Endstat, Bima
Gerland	Gerflex
Grace SA	Cryovac
Hans Kolb Wellpappe	Corstat
INK	Vitec
MJB	Wez, Charles Water Bradford
PMT	Ion Systems Inc.
SDEP	Wolfgang Warmbier
Techni-Industrie	Sekisui, Setam, Simco
Tekelec Airtronic	Vermason
Teknis Limited	Baystat, Chapman Otter, Servicor, Wez
OMX Top-Tronic	Bystat