



# Électricité statique

## L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les CRAM-CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels. Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées par les CRAM. Pour les obtenir, adressez-vous au service prévention de la Caisse régionale ou de la Caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

## Les Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et Caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les Caisses régionales d'assurance maladie et les Caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).

La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de deux ans et d'une amende de 150 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2004. Conception & réalisation : Page Impact. Couverture : Alexandre Ganem. Illustrations : Francis Metzger. Photos : AISS

# Électricité statique

N. Berger  
M. Denozière  
J.-C. Gilet  
D. Guionnet  
H. Romat



# Préliminaires

Le présent ouvrage est destiné aux responsables chargés de la sécurité des installations, bureaux d'études, services techniques des établissements, concepteurs de matériels, équipements et systèmes de prévention.

Il a été réalisé en collaboration avec les organismes suivants :

- ✶ Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (Barpi)
- ✶ Centre d'études et de recherches en protection électromagnétique (Cerpem)
- ✶ Atofina
- ✶ Groupement professionnel des conseillers techniques en sécurité incendie (GPCTSI)
- ✶ Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)
- ✶ Institut national de recherches et de sécurité (INRS)
- ✶ Laboratoire central des industries électriques (LCIE)
- ✶ Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (MATE)
- ✶ Secrétariat d'État à l'Industrie
- ✶ Ministère chargé du Travail
- ✶ Rhoditech
- ✶ Société nationale des poudres et explosifs (SNPE)
- ✶ Union des industries chimiques (UIC)
- ✶ Université de Poitiers (Laboratoire d'études aérodynamiques LEA).

Le comité de pilotage était composé de :

- ✶ H. Baratin (Barpi)
- ✶ N. Berger (Atofina)
- ✶ H. Bongrain (Cerpem)
- ✶ D. Bourbon (ministère chargé du Travail)
- ✶ M. Denozière (LCIE)
- ✶ R. Estival (secrétariat d'État à l'Industrie)
- ✶ P. Fricou (DRIRE Haute-Normandie)
- ✶ J.-C. Gilet (INRS)
- ✶ D. Guionnet (Ineris)
- ✶ J. Jarry (MATE)
- ✶ C. Jouin (GPCTSI)
- ✶ F. Legrand (SNPE)
- ✶ L. Loyon (MATE)
- ✶ M.-C. Michel (ministère chargé du Travail)
- ✶ J.-P. Pineau (Ineris)
- ✶ N. Renard (secrétariat d'État à l'Industrie)
- ✶ H. Romat (université de Poitiers et CNRS)
- ✶ G. Simmonet (UIC)
- ✶ S. Simon et H. Vaudrey (Rhoditech)
- ✶ G. Touchard (université de Poitiers et CNRS).

Le comité de rédaction était composé de :

- ✶ N. Berger
- ✶ M. Denozière
- ✶ H. Romat
- ✶ J.-C. Gilet
- ✶ D. Guionnet.

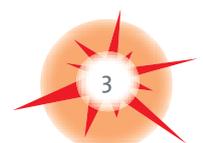
## Remerciements

Les auteurs remercient :

- ✶ l'Association internationale de la sécurité sociale (AISS) pour l'aimable autorisation de reproduction des photos de la brochure Électricité statique,
- ✶ les fabricants qui ont bien voulu mettre à disposition de l'INRS leurs photographies reproduites dans le présent ouvrage.



<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>Chapitre 1. Notions de base</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Principes généraux</b>	<b>7</b>
1.1.1. La charge électrique, le niveau microscopique	
1.1.2. La charge électrique, le niveau macroscopique	
1.1.3. Conducteurs et isolants	
1.1.4. Champ électrostatique et potentiel électrostatique	
1.1.5. Mesure et détection de grandeurs électrostatiques	
<b>1.2. Phénomènes d'électrisation</b>	<b>14</b>
1.2.1. Introduction	
1.2.2. Mécanismes d'apparition de charges	
1.2.3. Électrisation des corps solides par frottement	
1.2.4. Électrisation par transfert de charges d'un corps sur un autre	
1.2.5. Électrisation par influence	
1.2.6. Électrisation par effet de couronne	
1.2.7. Électrisation par écoulement d'un liquide ou d'un pulvérulent	
<b>1.3. Accumulation et dissipation des charges</b>	<b>21</b>
1.3.1. Notions générales	
1.3.2. Cas des solides	
1.3.3. Cas des solides divisés	
1.3.4. Cas des liquides	
1.3.5. Cas des gaz	
<b>1.4. Phénomènes disruptifs</b>	<b>27</b>
1.4.1. Loi de Paschen	
1.4.2. Cas des gaz rares	
1.4.3. Les mécanismes de la décharge disruptive	
1.4.4. Décharges d'origine électrostatique	
<b>1.5. Atmosphères explosibles</b>	<b>37</b>
1.5.1. Mécanismes	
1.5.2. Énergie minimale d'inflammation	
<b>Chapitre 2. Accidents d'origine électrostatique</b>	<b>41</b>
<b>2.1. Exemples d'accidents</b>	<b>41</b>
<b>2.2. Principales causes d'accidents</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre 3. Analyse du risque électrostatique et prévention</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Réglementation</b>	<b>53</b>
3.1.1. Introduction	
3.1.2. Législation européenne	
3.1.3. Législation française	
<b>3.2. Mesures générales de prévention et de protection</b>	<b>56</b>
3.2.1. Organisation de la sécurité et de la prévention	
3.2.2. Méthodologie d'analyse pour la prévention du risque d'incendie et d'explosion	





- 3.2.3. Mesures de prévention destinées à supprimer ou à limiter l'atmosphère explosible
- 3.2.4. Mesures de prévention destinées à éviter l'apparition de décharges disruptives
- 3.2.5. Mesures de prévention relatives à la production et à l'accumulation de charges
- 3.2.6. Efficacité et fiabilité des équipements de prévention contre l'électricité statique (certification NF ELSTAT)

## Chapitre 4. Exemples de cas ..... 65

- 4.1. Exemple d'analyse de risque ..... 65**
  - 4.1.1. Présentation du cas
  - 4.1.2. Étape 1 : identification de l'atmosphère explosible
  - 4.1.3. Étape 2 : identification des types de décharges possibles
  - 4.1.4. Étape 3 : évaluation du risque
  - 4.1.5. Mesures de prévention
  
- 4.2. Exemples de mesures de prévention particulières ..... 69**
  - 4.2.1. Introduction
  - 4.2.2. Machines à imprimer
  - 4.2.3. Machines à enduire
  - 4.2.4. Fabrication de films photographiques
  - 4.2.5. Machines textiles et industrie du papier
  - 4.2.6. Stockage et manutention de liquides inflammables
  - 4.2.7. Transvasement d'hydrocarbures liquides
  - 4.2.8. Détente de gaz comprimés ou liquéfiés
  - 4.2.9. Nettoyage au jet de vapeur
  - 4.2.10. Peinture au pistolet
  - 4.2.11. Opérations de traitement et de manutention de particules solides
  - 4.2.12. Outils à main
  - 4.2.13. Tuyaux et canalisations
  - 4.2.14. Courroies de transmission et systèmes similaires
  - 4.2.15. Hôpitaux

## Chapitre 5. Autres nuisances de l'électricité statique ..... 75

- 5.1. Bureaux et salles de réunion ..... 75**
- 5.2. Industries électroniques ..... 76**
- 5.3. Exemples de mesures sur site industriel ..... 80**
  - 5.3.1. Rapport de contrôle

## Conclusion .....

- Annexe 1 Glossaire ..... 91
- Annexe 2 Documents normatifs ..... 101
- Annexe 3 Bibliographie ..... 104
- Annexe 4 Fournisseurs ..... 106



# Introduction

---



*Si l'électricité statique était déjà connue des Anciens par ses manifestations, elle n'a cependant fait l'objet, à ce jour, que de rares études ayant des incidences pratiques en situation industrielle où elle n'apparaît le plus souvent que comme un phénomène parasite secondaire. Pourtant elle fait largement partie de notre vie quotidienne par ses applications : photocopie, peinture, pulvérisation, dépolluage, etc.*

*Directement liée à la structure atomique des matières utilisées ou traitées dans l'industrie, elle se crée spontanément, dans certaines conditions, au cours d'opérations de fabrication ou de manutention.*

*L'intérêt qui lui est porté, et qui s'est largement accru au cours des dernières années, est directement lié à l'utilisation, dans les domaines les plus divers, de matières plastiques isolantes qui ont une aptitude marquée à l'accumulation des charges électriques.*

*Invisible, discrète, l'électricité statique se manifeste souvent d'une façon anodine mais toujours insidieuse. Elle peut provoquer des accidents aux conséquences désastreuses : incendies, explosions, effets physiologiques.*

Le chapitre 1 rappelle les principes généraux nécessaires à la compréhension des phénomènes développés dans la suite du guide. Les notions théoriques complexes ont été précisées dans le glossaire de manière à ne pas alourdir le présent chapitre.

## 1.1. Principes généraux

### 1.1.1. La charge électrique, le niveau microscopique

L'ensemble des phénomènes électriques (qui comprend les phénomènes électrostatiques) s'explique à l'aide de théories qui sont toutes basées sur un même édifice : la théorie atomique de la structure de la matière.

La notion de charge électrique occupe une place importante dans cet édifice.

Les études expérimentales faites sur la matière à la fin du siècle dernier et au début de ce siècle ont poussé leurs auteurs à considérer la matière comme étant constituée de particules plus ou moins grosses (de masse plus ou moins importante) regroupées de façon ordonnée dans des entités appelées atomes.

Le nombre de ces particules détermine la nature de l'atome.

Trois principaux types de particules ont été identifiés, les neutrons et les protons qui forment le noyau de l'atome (partie compacte située au centre de l'atome) et les électrons qui forment un nuage autour du noyau.

Les masses précises de ces particules élémentaires sont données dans le tableau suivant :

Électron	$9,1091 \cdot 10^{-31}$ kg
Proton	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg
Neutron	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg

Tableau 1.1 Masse des particules

Cette description schématique de la constitution de la matière ne suffit pas à elle seule à expliquer tous les phénomènes que l'on peut rencontrer ou provoquer dans la nature et notamment les phénomènes électriques.

Il faut, pour cela, doter certaines des particules élémentaires de propriétés particulières, résultat de la présence d'une charge électrique négative pour les électrons et d'une charge électrique positive pour les protons.

C'est justement grâce à cette charge électrique que l'on explique l'ensemble des phénomènes de l'électricité. Le neutron est, quant à lui, une particule sans charge électrique.

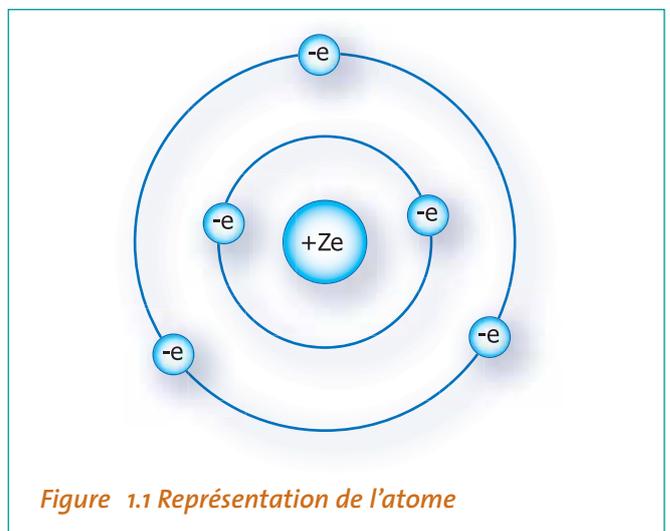


Figure 1.1 Représentation de l'atome

L'unité de charge électrique est le coulomb (symbole C).

La charge électrique portée par l'électron vaut

$$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Celle portée par le proton vaut

$$+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

C'est exactement, au signe près, la même quantité d'électricité (même charge électrique).

On appelle charge électrique élémentaire la quantité

$$e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Un problème électrique (électrocinétique ou électrostatique) macroscopique est donc le résultat de la somme



plus ou moins complexe des interactions microscopiques entre atomes mettant en jeu leurs constituants. Quelques informations supplémentaires sur la structure des atomes vont donc être utiles à la compréhension des phénomènes électrostatiques que nous aurons à étudier dans ce guide.

Le noyau (neutrons et protons) est de charge électrique totale positive, et le nuage d'électrons est de charge électrique totale négative.

À l'état "naturel" (l'état le plus courant), tout atome X est globalement électriquement neutre car le nombre d'électrons est toujours égal à celui des protons du noyau.

On appelle nombre de masse A (ou masse atomique) d'un atome la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons de son noyau et numéro atomique Z d'un atome le nombre d'électrons tournant autour du noyau (c'est aussi le nombre de protons).

Ces deux nombres suffisent à caractériser un atome.

Un atome de fer, par exemple, caractérisé par  $Z=26$  et  $A=56$ , a donc 26 électrons, donc 26 protons, et  $56-26=30$  neutrons ; électriquement, il possède 26 charges positives et 26 charges négatives, ce qui lui donne une charge globale nulle.

Si les particules du noyau forment un ensemble très soudé et sont donc difficilement séparables, les électrons sont, pour certains d'entre eux (ceux qui gravitent loin du noyau : les électrons dits périphériques), plus enclins à se séparer de l'atome auquel ils appartiennent quand ils sont l'objet d'une sollicitation venant de l'extérieur (une réaction chimique, un contact, un "frottement", etc.).

Un atome peut donc gagner ou perdre un ou plusieurs électrons, il devient alors un ion que l'on note  $X^-$ ,  $X^+$ ,  $X^{2-}$ ,  $X^{2+}$ ,  $X^{3-}$ , etc., selon le nombre d'électrons qu'il a gagnés ou perdus par rapport à son état "stable".

Un ion n'est plus globalement neutre, il est électriquement positif ou négatif.

---

*Ce seront les électrons périphériques qui entreront en jeu dans tous les phénomènes d'électrisation car, situés sur l'orbite la plus externe de l'atome, ils sont plus susceptibles que les autres d'être arrachés de l'atome.*

---

L'atome X, dont nous parlions plus haut, ayant perdu par exemple 2 électrons (réaction chimique), devient un ion  $X^{2+}$ , dont le numéro atomique Z vaut 24 et dont le nombre de masse A reste égal à 56.

Électriquement, il possède 26 charges positives ( $+26^e$ ) et 24 charges négatives ( $-24^e$ ), ce qui lui confère une charge électrique globale de  $+2^e$ .

Cette présentation très succincte de la constitution des atomes est évidemment incomplète, mais sera suffisante pour la compréhension des phénomènes électrostatiques qui nous intéressent.

### **1.1.2. La charge électrique, le niveau macroscopique**

Les phénomènes que nous aurons à étudier ne mettront jamais en jeu qu'un ou quelques atomes. Nous serons toujours en présence de corps macroscopiques, constitués d'un très grand nombre d'atomes, parmi lesquels certains réagiront pour donner lieu aux phénomènes électrostatiques.

Reprenons une des expériences de base de l'électrostatique (faisant intervenir des corps macroscopiques), expérience que l'on retrouve dans tous les manuels d'électricité.

Elle va nous permettre, d'une part, de voir comment la théorie atomique de la structure de la matière, dont nous venons de rappeler les rudiments, explique le phénomène et d'autre part, d'introduire assez naturellement, toujours pour expliquer le phénomène, la notion de force électrique.

Une baguette de verre bien sec est frottée énergiquement avec un chiffon en tissu puis est accrochée à un étrier léger lui-même suspendu à un fil (**figure 1.2**).

Lorsqu'un bâton de résine acrylique, que l'on a également frotté avec un chiffon ou un tissu, est approché de l'extrémité de la baguette de verre, la baguette suspendue est attirée. Si nous remplaçons le bâton de résine acrylique (du Plexiglas®, par exemple) par une autre baguette de verre qui a subi le même traitement, la baguette suspendue est repoussée. **Nous avons électrisé les baguettes.**

L'explication de cette double expérience tient tout d'abord à la façon dont la matière est constituée mais aussi à la manière dont les deux types "d'électricité" agissent l'un sur l'autre.

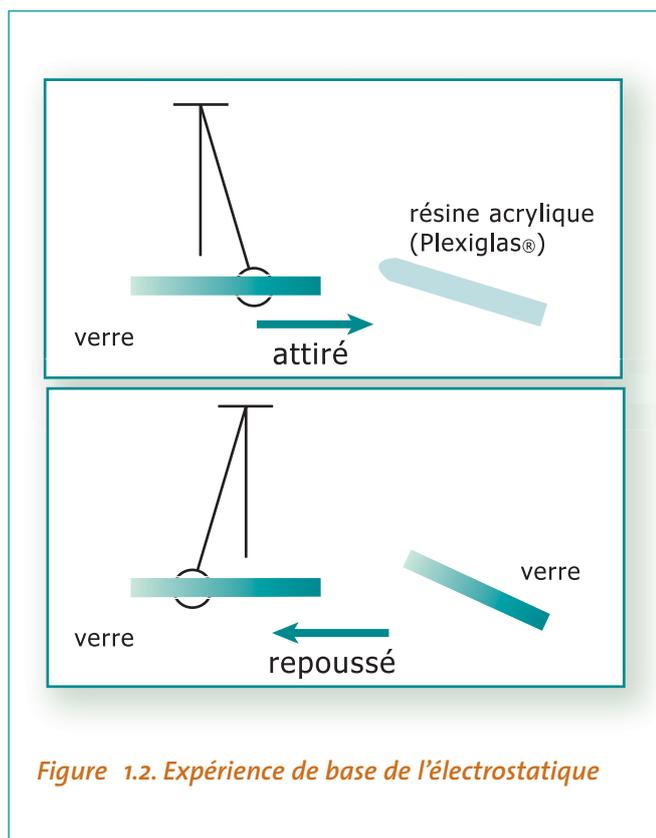


Figure 1.2. Expérience de base de l'électrostatique

Dans la première partie de notre expérience, le chiffon et la baguette de verre possèdent donc chacun une même charge électrique mais de signe contraire alors qu'ils étaient tous les deux électriquement neutres au départ.

Cette simple explication décrit correctement ce qui se passe au niveau atomique, dans le premier comme dans le second cas, mais n'est cependant pas suffisante à l'explication totale du phénomène puisqu'elle ne rend pas compte de l'attraction et de la répulsion des baguettes. Pour cela nous devons préciser la façon dont les charges électriques agissent les unes sur les autres.

Le plus simple est de repartir du niveau microscopique.

*En résumé, le frottement d'un corps sur un autre fait apparaître des charges électriques négatives sur l'un des corps, et des charges positives sur l'autre, qui restent en place une fois les corps séparés.*

Deux particules chargées, au repos, portant des charges électriques  $q$  et  $q'$  exercent l'une sur l'autre **des forces de grandeur égale**, de sens opposé et portées par la droite qui joint les centres des particules.

Elles sont répulsives si les charges sont de même signe et attractives si elles sont de signe contraire. Si les charges  $q$  et  $q'$  sont dans le vide, le module commun de ces forces est :

$$F = \frac{q \cdot q'}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot d^2}$$

avec :

- ☀  $q$  et  $q'$  les deux charges électriques ponctuelles exprimées en coulomb **C** ;
- ☀  $\epsilon_0$  ( $= 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m), la permittivité électrique du vide exprimée en farad par mètre (**F/m**) ;
- ☀  $d$  la distance séparant les deux charges en mètre (**m**) ;
- ☀  $F$  est la force de Coulomb exprimée en newton (**N**).

Mathématiquement, tout se passe comme si l'ensemble de la charge électrique était concentré en un point : le centre de la particule matérielle. Si les deux charges sont dans un milieu matériel (un gaz, un liquide, etc.), on remplace la permittivité du vide  $\epsilon_0$  par celle du milieu  $\epsilon$  qui s'écrit aussi où  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ , est la permittivité relative du milieu.

La baguette et le bâton de notre expérience ne peuvent évidemment en aucun cas être assimilés à des charges ponctuelles (qui n'existent d'ailleurs jamais en réalité). La formule précédente ne peut donc pas être appliquée telle quelle directement.

*Sans entrer dans le détail des calculs, on peut signaler néanmoins que l'intensité réelle de l'attraction ou de la répulsion d'un objet sur un autre est la somme des multitudes d'attractions ou de répulsions développées par toutes les particules électriques présentes sur les objets, particules assimilées cette fois-ci à des charges ponctuelles.*

Les deux parties de notre expérience s'expliquent donc maintenant sans difficulté.



Le verre frotté porte une charge électrique de signe contraire à celle que porte la résine acrylique frottée (les deux baguettes s'attirent).

Dans la deuxième partie de l'expérience, elles se repoussent car les baguettes (toutes deux en verre) portent des charges de même signe.

Les charges ponctuelles isolées ne se rencontrent en réalité qu'en physique atomique.

Dans la réalité macroscopique, qui est celle que nous traitons dans ce guide, les phénomènes sont relatifs à un très grand nombre de charges disposées soit sur un fil, soit sur une surface, soit dans un volume.

La multitude des charges va alors conférer à l'ensemble de la charge un caractère continu.

### 1.1.3. Conducteurs et isolants

#### 1.1.3.1. Généralités

Tout phénomène électrostatique est donc dû à la présence de charges électriques.

Une charge électrique n'existe pas indépendamment d'un support matériel, même la charge élémentaire est portée par un électron qui est une particule matérielle.

---

*Au niveau macroscopique, pour les problèmes électrostatiques dont nous aurons à rendre compte, il est important de préciser l'aptitude de la matière (un morceau de métal, de plastique, un gaz, un liquide, etc.) à donner naissance, sous l'action d'une sollicitation extérieure, à des charges électriques en son sein, c'est-à-dire son aptitude à s'opposer ou non à la séparation des charges positives des charges négatives.*

---

D'après ce que l'on a vu précédemment, ces charges électriques sont soit des électrons, soit des ions positifs, soit des ions négatifs.

Selon que le matériau permettra la mobilité des charges ou non, il sera respectivement conducteur ou isolant.

#### 1.1.3.2. Les solides

L'état solide est composé **d'atomes fixes dans l'espace**, "liés" les uns aux autres.

##### Cas des isolants

Le nuage électronique (l'ensemble des électrons qui gravitent autour du noyau) de chaque atome reste bien localisé dans l'espace.

Ces électrons sont fortement liés aux atomes, ils ne peuvent pas se déplacer dans le milieu, même sous l'action de fortes sollicitations extérieures. Un tel milieu est isolant. La séparation des charges (ions) positives et négatives est possible, mais ces charges sont très peu mobiles (les isolants jouent un rôle important en électrostatique).

Les matières plastiques telles que le PTFE (Téflon), le polyéthylène, le PVC (polychlorure de vinyle), etc., sont des exemples typiques d'isolants.

##### Cas des conducteurs

L'organisation des atomes se révèle être composée d'un réseau d'ions positifs rigidement liés entre eux, baignant dans un nuage d'électrons délocalisés (n'appartenant pas en propre à un atome précis).

Ce nuage d'électrons délocalisés reste néanmoins "attaché" au réseau d'ions positifs dans le sens où les électrons ne s'éparpillent pas dans tout l'espace.

Cependant, ils sont susceptibles de se déplacer à l'intérieur du milieu sous l'action de forces électriques extérieures même faibles (du fait de la présence de charges positives ou négatives extérieures par exemple).

Les ions positifs du réseau sont, eux, immobiles. Un tel milieu est dit conducteur ; en effet, on peut y séparer facilement les charges négatives des charges positives.

Il s'agit d'un conducteur électronique (mais pas ionique) dont les exemples typiques sont les métaux (fer, cuivre, etc.).

##### Conductivité et résistivité

La conductivité électrique ( $\sigma$ , en  $S/m$ ) est un paramètre qui caractérise l'aptitude des matériaux à faciliter le passage des porteurs de charge.

La résistivité ( $e$ , en  $\Omega.m$ ) caractérise, elle, la capacité du matériau à s'opposer au passage des porteurs de charge.



Ces deux notions se déduisent simplement l'une de l'autre par :

$$\sigma = 1/\rho$$

Il n'existe pas d'isolant ou de conducteur parfait ; tout corps est un plus ou moins bon conducteur (plus ou moins bon isolant).

Il n'existe pas, en fait, de ligne de séparation entre les matériaux isolants et conducteurs.

Les unités employées ici seront explicitées dans le glossaire (annexe 1).

### 1.1.3.3. Les liquides

*Un liquide est constitué en général d'un mélange de molécules (assemblage d'atomes) neutres et de molécules ionisées (qui ont un excès ou un défaut d'électrons) et, contrairement au solide, toutes les molécules n'ont pas de place fixe dans l'espace. Un liquide est neutre, il contient autant d'ions positifs que négatifs.*

Faiblement liées les unes aux autres, les molécules peuvent sans difficulté se mouvoir.

Une faible sollicitation électrique extérieure (présence d'une paroi chargée par exemple) va attirer les ions du liquide de signe contraire à celui de la paroi et repousser les autres. Étant libres (ou presque) de se déplacer, ces ions vont se mouvoir et l'on va obtenir une séparation des deux types de porteurs de charge électrique (qui ne sont pas des électrons mais des ions).

Si la sollicitation extérieure augmente en intensité, d'autres phénomènes entreront en jeu, mais le principe restera le même et, suivant la concentration des ions dans le liquide et l'influence de beaucoup d'autres paramètres qu'il n'est pas utile de détailler dans ce chapitre, nous aurons un liquide plus ou moins conducteur. La conduction ici est ionique.

### 1.1.3.4. Les gaz

**Un gaz est un ensemble de molécules libres** (encore plus libres que celles à l'état liquide) se déplaçant dans toutes les directions.

Les molécules du gaz sont composées d'atomes électriquement neutres et sont donc globalement électriquement neutres. Il n'y a pas dans un gaz à l'état naturel de charges électriques libres (comme les ions dans le liquide ou les électrons dans le solide).

Une force électrique extérieure d'intensité normale n'aura pas de résultat sur les molécules neutres.

Il n'y aura pas séparation des charges positives des charges négatives, **les gaz sont donc des isolants ioniques et électroniques.**

Toutefois, dans certains cas (températures très élevées, sollicitations électriques très intenses), des atomes peuvent s'ioniser.

Il apparaît alors des électrons libres, des ions positifs et éventuellement des ions négatifs, ce qui constitue un ensemble de charges qui sont libres de se déplacer et de se diriger dans la direction dictée par le signe de leur charge électrique.

**Un gaz ionisé est conducteur ionique** et électronique dans des cas particuliers.

## 1.1.4. Champ électrostatique et potentiel électrostatique

Deux notions seront très importantes pour la suite, ce sont celles de **champ électrostatique** et de **potentiel électrostatique**. Nous allons les définir rapidement ici.

Reprenons la formule donnant la force avec laquelle deux charges électrostatiques ponctuelles s'attirent ou se repoussent dans le vide :

$$F = \frac{q \cdot q'}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot d^2}$$

Dans cette expression, si l'on se place du point de vue de la charge  $q$ , on peut considérer la formule en deux parties, une,  $q$ , qui contient uniquement ce qui est relatif à la charge  $q$ , et une autre partie,

$$\frac{q'}{4\pi \epsilon_0 d^2}$$

qui contient tout ce qui ne concerne pas la charge  $q$ .

Les deux parties contribuent par leur produit à l'intensité de l'attraction mutuelle.

Toujours du point de vue de la charge  $q$ , la partie

$$\frac{q'}{4\pi \epsilon_0 d^2}$$

caractérise ce qui, provenant de  $q'$ , attire (ou repousse)  $q$ .





Cette partie qui agit sur  $q$  constitue ce que l'on appelle le champ électrostatique créé par  $q'$ .

La charge  $q$  est plongée dans le champ électrostatique développé par  $q'$  dont l'intensité vaut

$$\frac{q'}{4\pi\epsilon_0 d^2}$$

Il en résulte une attraction (ou une répulsion) dont l'intensité est donnée par la force de Coulomb. Un raisonnement analogue pourrait être fait de façon parfaitement symétrique pour  $q'$ .

Il est beaucoup moins aisé de définir le potentiel électrostatique. Cependant, une comparaison avec la température va nous aider car, en fait, le rôle joué par le potentiel électrostatique est analogue à celui joué par la température en thermique.

Prenons deux plaques rectangulaires  $P_1$  et  $P_2$  (figure 1.3) maintenues à températures différentes et insérons entre ces deux plaques une troisième,  $P_3$ , conductrice de la chaleur et en contact sur ses deux faces avec  $P_1$  et  $P_2$ .

$P_3$  va être le lieu d'un transfert de chaleur entre  $P_1$  et  $P_2$  (l'intensité de ce transfert variera en fonction de la qualité du matériau constituant  $P_3$ ).

Si la température de  $P_1$  est plus élevée que celle de  $P_2$ , on aura un flux de chaleur dirigé de  $P_1$  vers  $P_2$ .

De façon tout à fait similaire, prenons deux plaques rectangulaires  $P_1$  et  $P_2$  de potentiels électrostatiques différents et insérons entre elles une troisième plaque  $P_3$  conductrice de l'électricité (prenons ici par exemple un métal) en contact sur ses deux faces avec  $P_1$  et  $P_2$ .

$P_3$  va être le lieu d'un transfert de charges électriques (un courant électrique constitué ici d'électrons) dont l'intensité va varier avec la qualité du matériau.

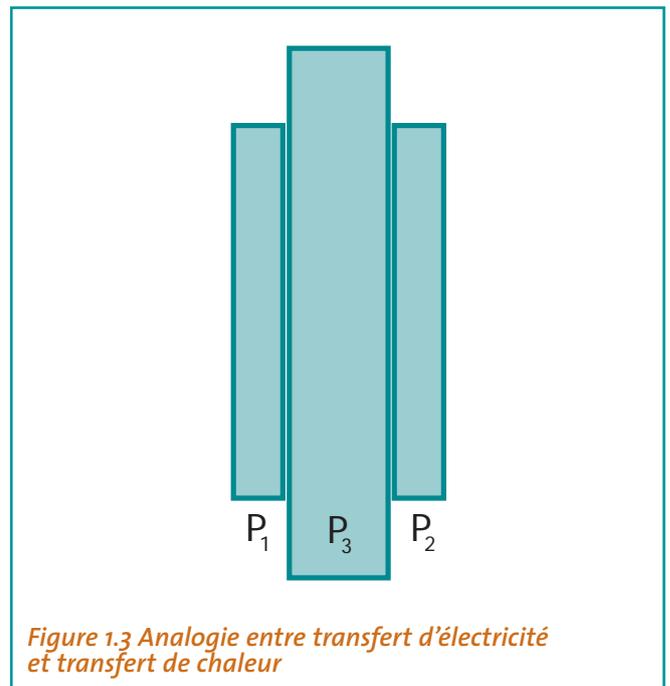


Figure 1.3 Analogie entre transfert d'électricité et transfert de chaleur

Le sens des charges électriques va dépendre du signe des porteurs de charge. Si on place entre les deux plaques un liquide conducteur, les charges positives présentes dans le liquide iront dans le sens des potentiels décroissants et les charges négatives dans le sens des potentiels croissants.

Cette comparaison simple avec la température permet de se faire une idée juste du potentiel électrostatique même si les deux phénomènes (thermique et électrique) ne relèvent pas du tout de la même réalité physique et des mêmes mécanismes.

La relation qui existe entre le potentiel électrostatique que nous venons de définir et la charge électrique dont nous avons parlé plus haut s'exprime mathématiquement par une expression que nous citerons en annexe 1 (glossaire "Potentiel électrostatique").

Cependant, on peut dès à présent en avoir là encore une idée simple en prenant l'exemple d'une sphère isolée de la terre. Plus on apportera à la sphère de charges électriques d'un même signe, plus elle sera potentiellement capable d'en restituer à la terre : son potentiel électrostatique augmentera.

De par la convention convenue sur les signes des deux types "d'électricité", le potentiel aura le signe des charges présentes sur la sphère.

---

***En définitive, une différence de potentiel électrostatique engendre un transfert d'électricité comme une différence de température engendre un transfert de chaleur.***

---

### 1.1.5. Mesure et détection de grandeurs électrostatiques

On peut déterminer la valeur d'une charge électrostatique en adjoignant à un voltmètre électrostatique un cylindre de Faraday ou conducteur creux, dans lequel on apporte la charge à mesurer.

Le potentiel  $V$  mesuré par l'électromètre est proportionnel à la charge  $Q$ , pour une capacité donnée  $C$  de l'ensemble "électromètre-cylindre de Faraday".

Ces appareils ne sont utilisés généralement que dans le cadre du laboratoire ; dans l'industrie on préfère procéder à des mesures de champ électrique, c'est-à-dire utiliser des dispositifs basés sur le principe de la mesure à distance, sans prélèvement de charges.

Plusieurs appareils légers, maniables et autonomes sont offerts sur le marché, parmi ceux-ci nous mentionnerons deux modèles de conception totalement différente :

- ☀ l'un, de type électronique, utilise les propriétés des transistors à effet de champ (photo 1.1) ;



Photo 1.1 Différents exemples de mesureurs de champ électrique

- ☀ l'autre est constitué d'une électrode de mesure à influence et d'un modulateur à ailettes, entraîné par un petit moteur électrique, qui créent une tension alternative proportionnelle à la valeur du champ (photo 2).

Cependant, il faut noter que, si ces appareils sont particulièrement utiles pour déterminer l'emplacement et l'importance d'une charge électrostatique, il est parfois difficile, dans un atelier, d'effectuer des mesures quantitatives précises. En effet, si dans un laboratoire il est rela-



Photo 1.2 Exemple de mesureur de champ électrique ("moulin à champ")

tivement aisé, au moyen d'une cage de Faraday, de soustraire l'élément chargé aux influences extérieures, en situation industrielle il n'en est pas ainsi et, notamment, il serait imprudent de prétendre détecter une charge accumulée sur une surface isolante sans préciser l'emplacement de cette surface par rapport à tous les corps conducteurs voisins.

Ainsi, une mesure effectuée dans les conditions indiquées par la figure 1.4 conduirait à affirmer qu'il n'existe aucune charge sur la bande isolante.

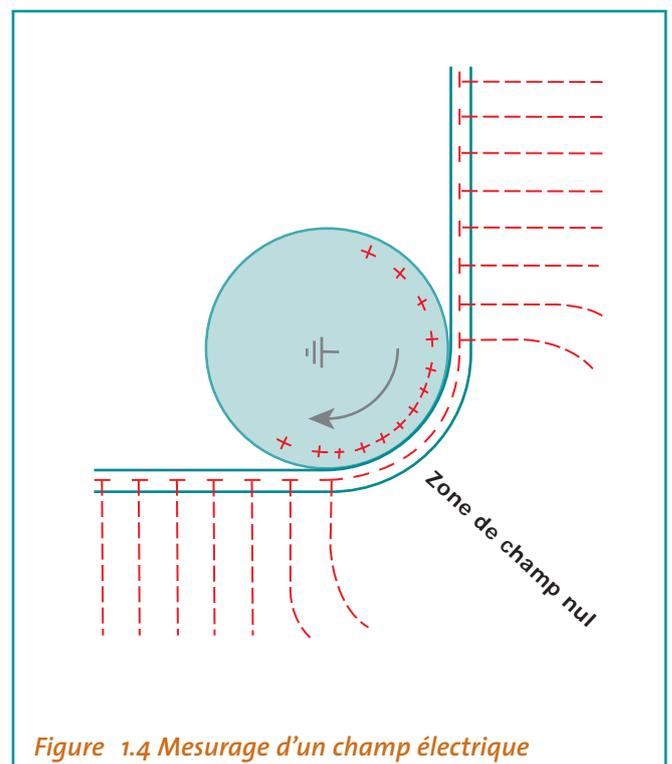


Figure 1.4 Mesurage d'un champ électrique



## 1.2. Phénomènes d'électrisation

### 1.2.1. Introduction

Après avoir passé en revue les différentes façons dont la matière, quelle qu'elle soit, se comporte vis-à-vis d'une sollicitation extérieure l'amenant à opérer en son sein une séparation entre charges négatives et charges positives, nous allons voir maintenant de quelle manière on peut faire apparaître la séparation de charge.

Nous distinguerons plusieurs cas : l'électrisation par frottement, par transfert, par influence, par effet de couronne et par écoulement dans une conduite.

### 1.2.2. Mécanismes d'apparition de charges

#### 1.2.2.1. Introduction

Quand il y a contact entre deux matériaux, l'apparition des charges provient soit d'un transfert d'électrons d'un matériau vers l'autre, soit d'un transfert d'ions (ou encore d'un mélange des deux transferts).

Nous allons aborder chacun de ces cas dans deux paragraphes intitulés "Théorie électronique" (pour les phénomènes issus d'un transfert d'électrons) et "Théorie ionique et de double couche électrique" (pour les phénomènes issus d'un transfert ionique).

#### 1.2.2.2. Théorie électronique

Ce que nous allons développer ici servira à expliquer la plupart des phénomènes d'électrisation qui apparaissent au contact entre solides, la théorie ionique étant plus adaptée pour les contacts entre solides et liquides.

L'apparition de charges électrostatiques dans un milieu solide donné est souvent imputée au phénomène d'électrisation par frottement. Les premières expériences de l'électrostatique sont là pour en témoigner : "on frotte un bâton de verre avec...".

En réalité, même quand on met en simple contact deux corps de matériaux différents, on observe, après séparation de ces corps, un excès de charges positives sur l'un et un excès de charges négatives sur l'autre, bien qu'il n'y ait pas eu de frottements (de mouvement tangentiel d'une surface de contact sur l'autre). Dans ce cas, l'intensité du

phénomène est toujours largement inférieure à celle observée pour des objets frottés l'un sur l'autre.

---

*Le frottement n'apporte finalement rien de fondamental à l'origine de l'électrisation, il ne fait qu'amplifier le phénomène qui est déjà présent dans un simple contact entre deux corps neutres de matériaux différents.*

---

Nous allons donc maintenant développer la théorie qui permettra de comprendre l'origine de l'électrisation (du transfert d'électrons) résultant du contact simple (sans frottement) de deux corps de nature différente.

C'est dans les caractéristiques électroniques fines des matériaux que nous devons rechercher une explication à l'apparition de l'électrisation, ce que nous allons faire à l'aide de théories issues de la mécanique quantique.

#### 1.2.2.3. Propriétés électroniques des matériaux

Nous savons déjà qu'un corps quelconque est constitué d'atomes composés de noyaux autour desquels gravitent des électrons répartis sur des "orbites" plus ou moins proches du noyau.

---

*Pour un atome isolé, la mécanique quantique précise que les électrons n'ont accès qu'à certaines "orbites" formant un ensemble discret (discontinu). L'appartenance d'un électron à une "orbite" dépend de son état énergétique. Plus on fournit de l'énergie à un électron plus il s'éloignera du noyau jusqu'à se séparer de l'atome si l'on dépasse un certain seuil.*

---

Cet électron ne pourra cependant accepter que certaines quantités (quanta) d'énergie bien précises pour passer d'une orbite à une autre.

L'énergie de l'électron à l'intérieur d'un atome est quantifiée, elle ne peut prendre que certaines valeurs et l'électron n'a pas d'existence stable en dehors de ces valeurs.

À chaque orbite, on peut donc faire correspondre un niveau énergétique précis. C'est pour cette raison que l'on a substitué à l'image traditionnelle d'un noyau entouré "d'orbites" circulaires, occupées par des électrons, un schéma énergétique mettant en valeur les niveaux énergétiques accessibles par l'électron plutôt que les "orbites" sur lesquelles il est censé évoluer.

L'électrisation par simple contact se produit avec tous les matériaux. Elle est le résultat de la différence d'énergie nécessaire aux électrons périphériques des atomes des matériaux pour sortir de l'attraction des noyaux. Les matériaux, pour lesquels il faut peu d'énergie aux électrons périphériques pour sortir de l'attraction des noyaux, auront tendance à donner les électrons à ceux pour lesquels il faut plus d'énergie.

Après séparation des corps, la charge présente sur les deux constituants dépend de la capacité des charges créées à se mouvoir sur la surface vers le dernier point de contact (**figure 1.5**).

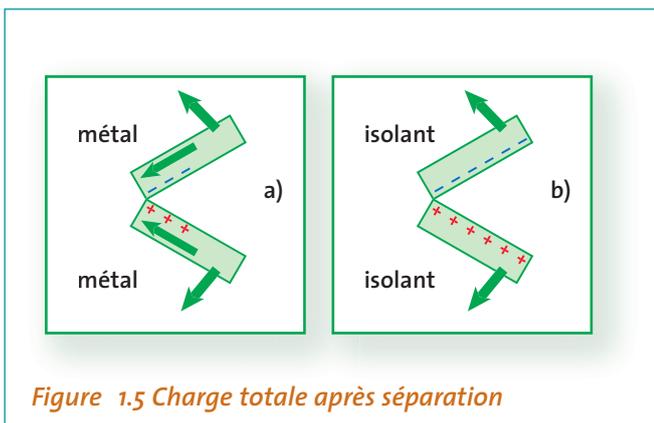


Figure 1.5 Charge totale après séparation

En effet, au fur et à mesure de la séparation des corps, les charges mobiles présentes à la surface du corps vont avoir tendance à se recombinaison.

Pour deux métaux, les électrons en excès sur une surface vont avoir tendance à revenir dans la zone où ils sont en défaut (l'autre surface). Plus les charges seront mobiles à la surface des matériaux plus cela pourra se faire facilement. C'est le cas des électrons dans les métaux et c'est la raison pour laquelle la charge totale après séparation de deux métaux est toujours faible.

En revanche, lorsque l'un des matériaux (ou les deux) est isolant (polymères par exemple), les charges sont incapables de migrer au dernier point de contact entre les surfaces car elles sont piégées sur la surface isolante (ou à l'intérieur).

C'est cette capacité des isolants à piéger pour une période importante l'excès de charge transférée à leurs surfaces qui est la cause de leur électrisation.

Les situations industrielles d'électrisation sont généralement issues de phénomènes comportant des frottements. Les charges recueillies sont alors beaucoup plus importantes que celles obtenues par un simple contact.

*Ceci s'explique par le fait que le frottement des surfaces améliore la qualité des contacts et augmente le transfert d'électrons.*

*La plupart des recherches faites à ce propos montrent que la charge transférée augmente avec la pression entre les deux matériaux en contact ainsi qu'avec la vitesse de frottement et qu'elle diminue avec la rugosité des surfaces.*

#### 1.2.2.4. Théorie ionique et de double couche électrique

Si les phénomènes d'électrisation résultant du contact entre solides s'expliquent pour la grande majorité des cas par un transfert d'électrons d'un matériau vers l'autre, ceux issus du contact entre un liquide et un solide s'expliquent globalement par un transfert d'ions entre la paroi solide et le liquide.

*Lorsqu'un liquide au repos est mis en contact avec une paroi solide, un ensemble de réactions électrochimiques complexes se développe à l'interface du liquide et du solide et aboutit à la présence d'une certaine charge électrique accolée à la paroi et d'une charge électrique égale mais de signe contraire dispersée dans le fluide.*



Les ions accolés à la paroi forment une couche dite compacte, et ceux répartis au sein du liquide forment une couche dite diffuse ; l'ensemble des deux couches constitue la couche double électrique.

On attribue classiquement cette double couche électrique à des phénomènes d'adsorption préférentielle d'ions par la paroi solide, c'est-à-dire de rétention de certains types d'ions par la paroi.

*La couche compacte a une épaisseur de quelques angströms ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), la couche diffuse peut s'étendre sur plusieurs millimètres.*

Si l'on met en mouvement le liquide en question, on met également en mouvement les charges électriques qu'il contient.

**Seules les charges électriques de la couche diffuse peuvent être touchées par l'écoulement**, celles de la couche compacte étant trop proches de la paroi pour pouvoir être entraînées.

Un écoulement dans ces conditions draine un certain type de charges qui, une fois collectées dans un récipient isolé électriquement de la terre, peuvent participer à des phénomènes électrostatiques indésirables.

### 1.2.3. Électrisation des corps solides par frottement

Tout corps frotté est le siège de phénomènes d'électrisation.

Pour schématiser, on peut dire que le frottement "arrache" des électrons aux deux corps en présence, plus facilement à un conducteur qu'à un isolant.

La séparation des deux corps laissera sur l'un des corps des électrons en excès et, sur l'autre, des électrons en défaut.

On aura deux corps électrisés.

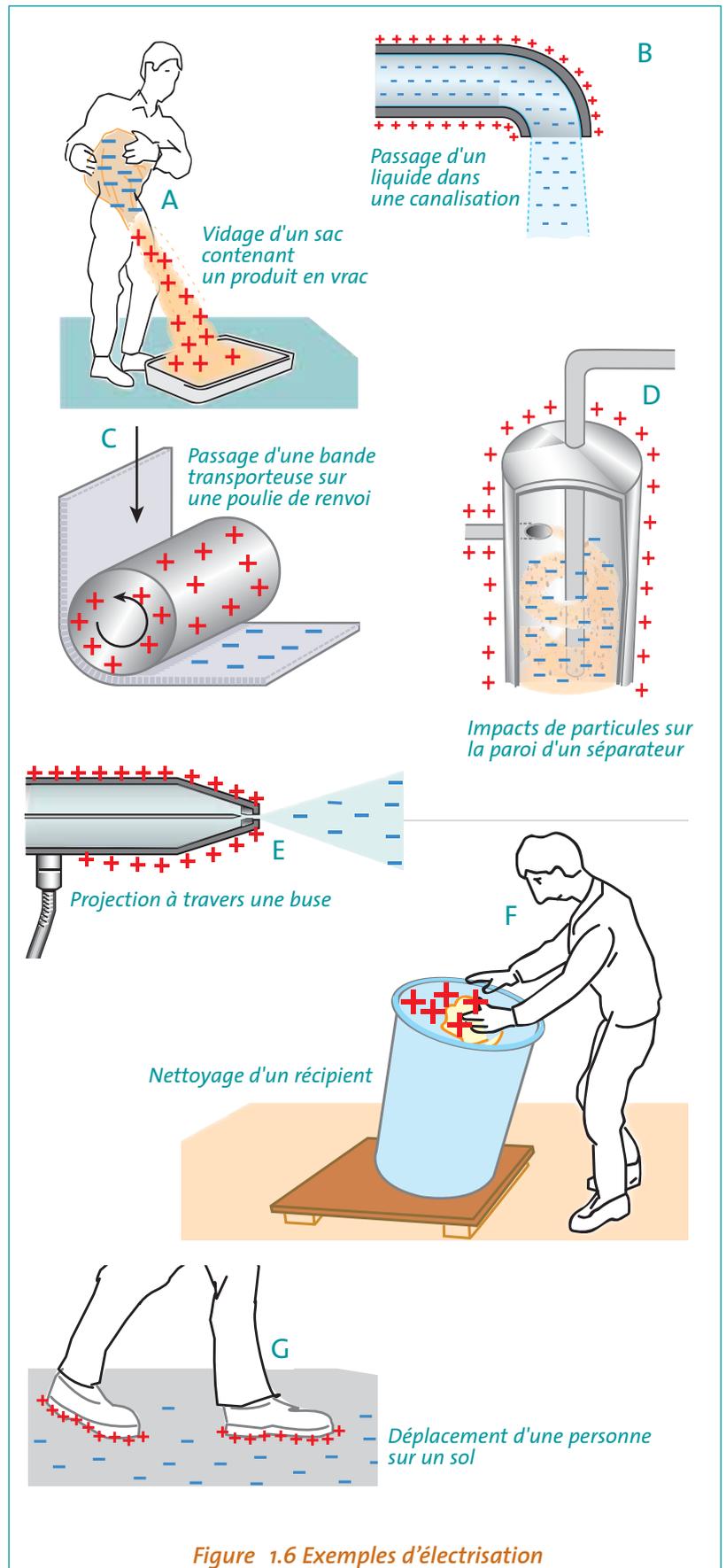


Figure 1.6 Exemples d'électrisation

Si l'un est isolant, l'électrisation sera faible et restera cantonnée à l'endroit où le frottement a eu lieu ; en revanche, s'il est conducteur, l'électrisation occupera l'espace du corps en entier à condition de ne pas le mettre en relation avec la terre par un autre conducteur (l'expérimentateur par exemple), auquel cas l'électrisation disparaît.

Considérons, pour illustrer ce qui précède, une boule métallique électriquement neutre. Si, en frottant la boule métallique avec un chiffon (figure 1.7a) on lui apporte des électrons, le conducteur devient négatif. Les électrons en excès se repoussent mutuellement sous l'action des forces électrostatiques et se distribuent sur toute la surface extérieure du conducteur, produisant une électrisation superficielle négative. Si maintenant le frottement soustrait des électrons à la boule métallique, sa charge électrique globale devient alors positive et, là encore, elle se répartit sur l'ensemble de sa surface extérieure en produisant une électrisation superficielle positive.

Dans l'expérience que nous venons de décrire, l'expérimentateur est supposé avoir travaillé en maintenant la sphère par l'intermédiaire d'un manchon isolant pour ne pas perturber les résultats de l'électrisation. En effet, s'il avait tenu les corps frottés à mains nues (figure 1.7b), les électrons en excès de la boule métallique (premier cas) se seraient répandus, non seulement sur la surface du conducteur, mais aussi à travers le corps de l'expérimentateur pour rejoindre la terre.

L'électrisation de la boule aurait disparu. Un raisonnement totalement identique peut se faire si la boule est chargée positivement.

Si nous avons fait la même expérience avec une boule de matériau isolant, le frottement aurait induit une électrisation qui aurait, cette fois-ci, gardé son intensité plus longtemps, même après l'avoir reliée à la terre. En réalité, les conducteurs et les isolants parfaits n'existent pas, et la boule isolante, une fois reliée à la terre, se décharge mais avec un temps plus long que celui de la boule métallique pour laquelle le phénomène est instantané.

Ce que nous venons de dire peut avoir lieu sans qu'il y ait obligatoirement frottement. En effet, c'est le contact entre corps différents qui génère la séparation des charges et donc l'électrisation.

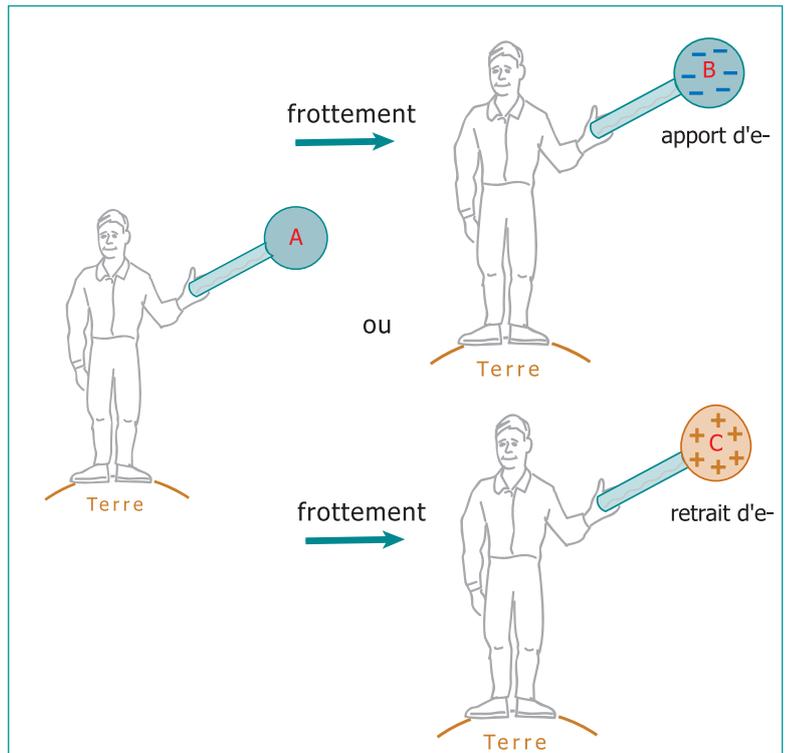


Figure 1.7a Électrisation d'une boule métallique par frottement (avec manchon isolant)

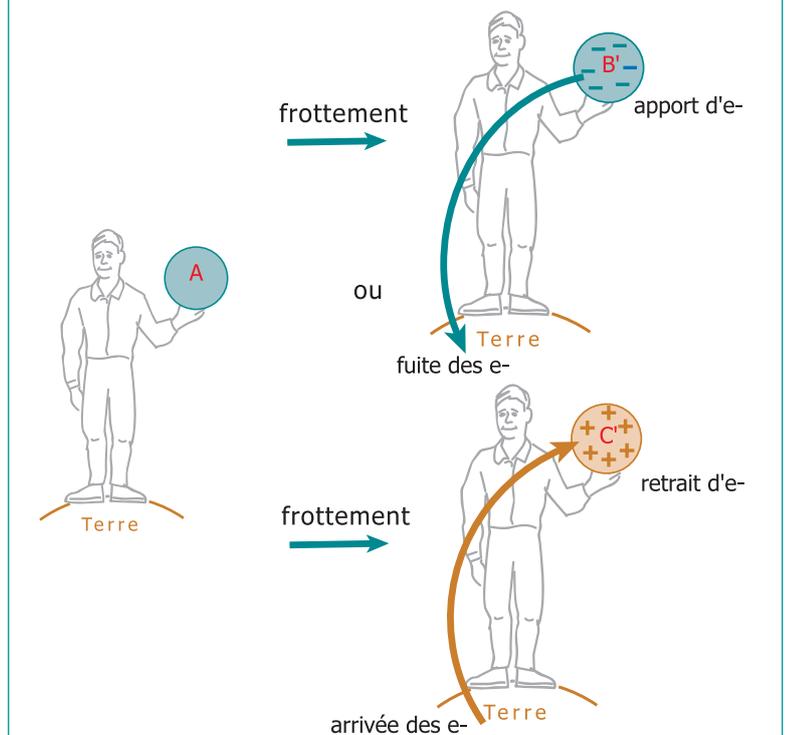


Figure 1.7b Électrisation d'une boule métallique par frottement (sans manchon isolant)

Figure 1.7 Electrisation d'une boule métallique par frottement



### 1.2.4. Électrisation par transfert de charges d'un corps sur un autre

Approchons (figure 1.8) un corps conducteur B électriquement neutre d'un corps conducteur A électrisé et mettons-les en contact.

La charge de A est  $Q$  et prenons-la, par exemple, positive. L'ensemble des deux conducteurs ne forme désormais qu'un seul conducteur sur lequel se répartit la charge  $Q$ .

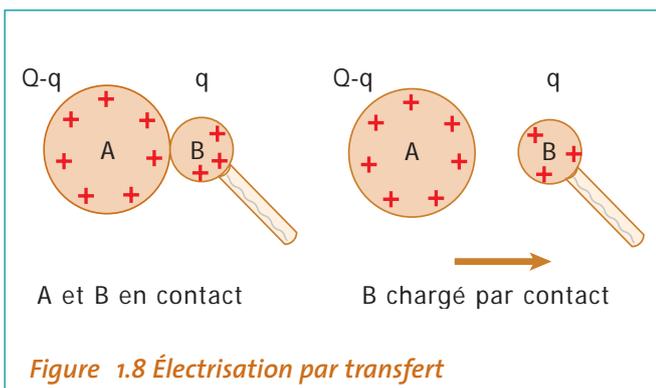


Figure 1.8 Électrisation par transfert

S'il y a rupture de contact, le corps B emporte sur sa surface une certaine charge  $q$  tandis que le corps A garde la charge  $Q-q$ . Nous avons ainsi chargé B par contact en prélevant une partie de la charge de A. Il faut bien sûr que A soit isolé de la terre car, autrement, il ne conserverait pas sa charge, B doit l'être aussi pour les mêmes raisons.

On pourrait imaginer une expérience dans laquelle A et B (ou l'un des deux) seraient des isolants. Bien que très plausibles, ces expériences auraient des résultats moindres voire nuls, vu la difficulté que présentent les matériaux isolants à conduire les charges.

### 1.2.5. Électrisation par influence

Les phénomènes d'influence sont basés sur la propriété selon laquelle les charges de même signe se repoussent et de signe contraire s'attirent.

Considérons (figure 1.9a) un corps conducteur A électrisé et de charge positive. Approchons de A un corps conducteur neutre B, tenu par l'intermédiaire d'un manchon isolant. Les électrons libres de B sont attirés par la charge positive de A. Il en résulte l'apparition de charges négatives sur la partie la plus rapprochée de A et de charges positives sur sa partie la plus éloignée. Il y a donc sur B

deux régions portant des charges de signe contraire : nous avons électrisé B par influence. Ce type d'électrisation dure tant que l'on maintient A à proximité de B, la charge totale du corps B restant nulle.

Si B n'est plus isolé de la terre (figure 1.9b) mais relié à la terre, la présence de A va encore influencer les charges électriques de B, mais, cette fois, les charges positives apparues dans la partie de B la plus éloignée de A disparaîtront car elles seront compensées par des électrons venus de la terre. Si l'on coupe brusquement le lien entre la boule B et la terre, on obtient alors un corps chargé par influence.

Dans tous les cas, la charge induite dans B est plus petite que la charge de A. Pour qu'elle soit égale, il faudrait que A englobe entièrement B et qu'il y ait influence totale (figure 1.9c).

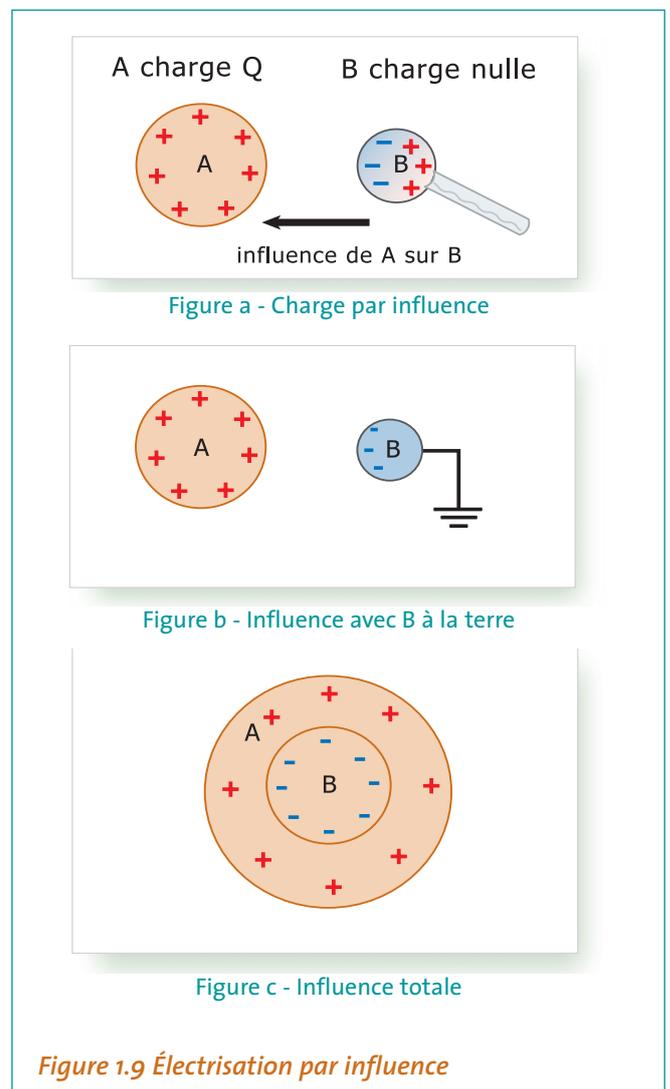
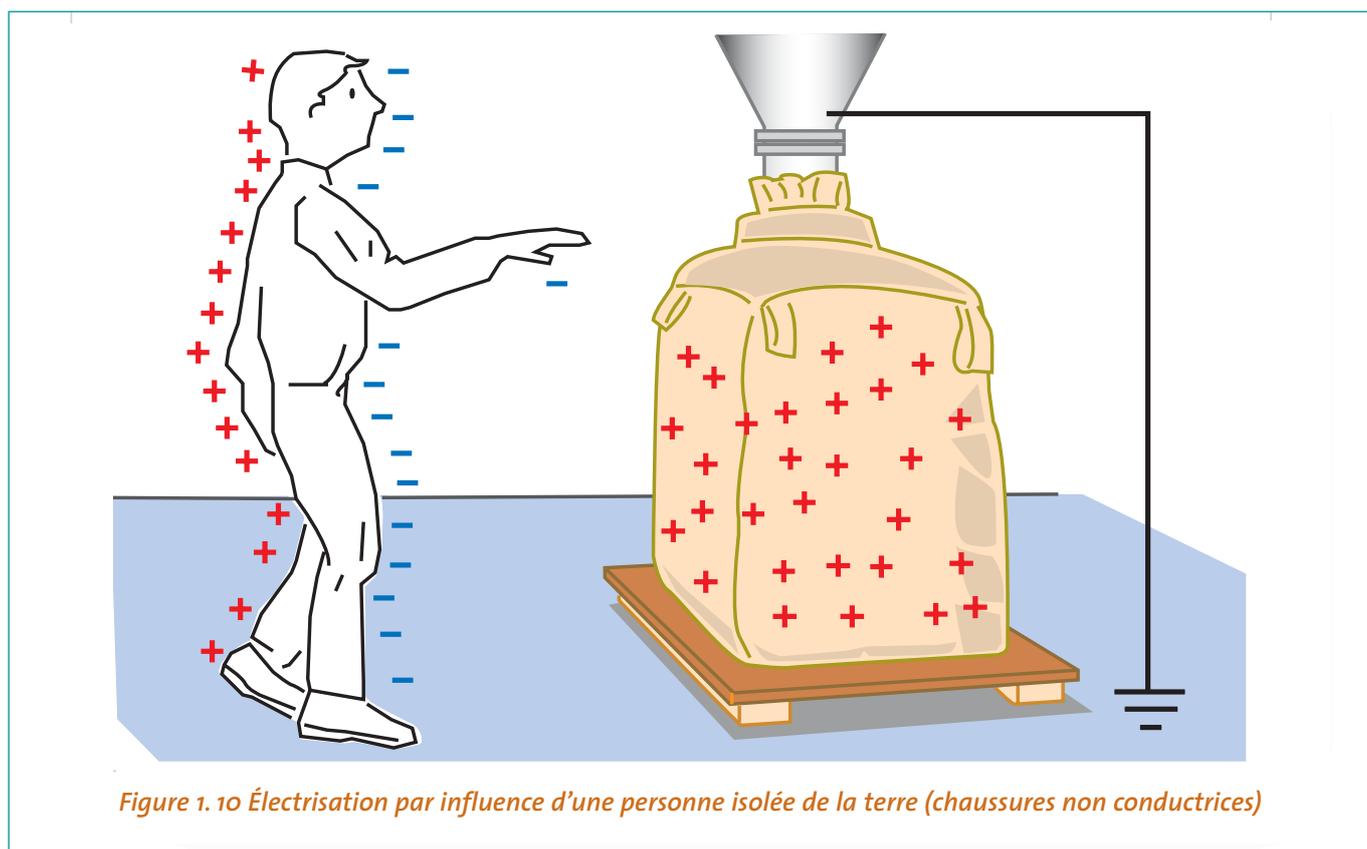


Figure a - Charge par influence

Figure b - Influence avec B à la terre

Figure c - Influence totale

Figure 1.9 Électrisation par influence



### 1.2.6. Électrisation par effet de couronne

Dans ce chapitre est traité l'ensemble des phénomènes d'origine électrostatique dus à ce qu'on appelle le "pouvoir des pointes".

On dispose une pointe, reliée à un générateur de tension, face à une plaque plane reliée à la terre (figure 1.11a).

Le milieu qui sépare la pointe de la plaque est de l'air et ne laisse "normalement" pas passer les charges électriques.

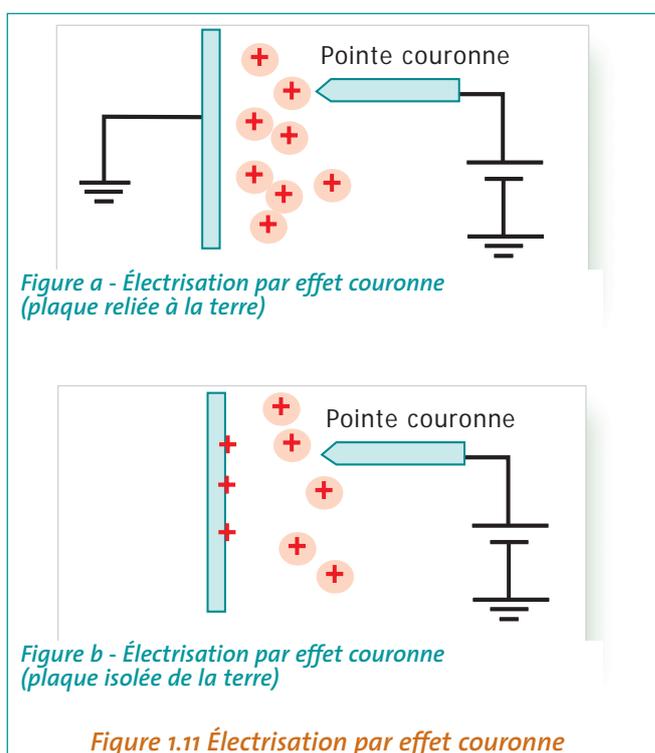
Suivant la polarité du générateur, on va avoir une accumulation de charges positives ou négatives sur la pointe.

Dans un cas comme dans l'autre, au fur et à mesure que l'on augmente la présence des charges sur la pointe (par exemple en augmentant le potentiel électrique de sortie du générateur), on va assister, à partir d'un certain seuil, au passage d'un courant faible entre la pointe et la plaque.

Ce courant est le résultat des mécanismes complexes d'ionisation de l'air entourant la pointe.

Les charges issues de la pointe vont se diriger vers la plaque et y céder un électron (si elles sont négatives) ou y capter un électron (si elles sont positives). L'apport ou le retrait d'électrons sera assuré par la connexion à la terre.

Si maintenant la plaque est isolée (fig. 1.11b), alors les charges électriques s'accumuleront sur la plaque sans pouvoir être compensées et y resteront. La plaque sera alors électrisée.





Pour qu'il y ait électrisation par ce mécanisme, il suffit donc de mettre par exemple une pointe (ou tout autre objet ayant une géométrie semblable) à haut potentiel négatif (ou positif) en face d'une surface isolante recouvrant une surface métallique mise à la terre.

---

*Le phénomène, généralement accompagné d'une lueur autour de la pointe, a reçu le nom "effet de couronne".*

---

### 1.2.7. Électrisation par écoulement d'un liquide

Nous allons, dans ce qui suit, présenter une situation particulière d'apparition de phénomènes d'électrisation.

Ces phénomènes apparaissent quand on fait par exemple écouler certains liquides (liquides organiques, carburants, etc.) dans des conduites.

Le schéma de principe du phénomène est représenté sur la **figure 1.12**. Un liquide traverse un ensemble de conduites et charge électriquement le réservoir isolé de la terre dans lequel il se déverse.

La charge véhiculée par le liquide et que l'on retrouve dans le récipient collecteur provient du contact entre le liquide et la paroi des conduites.

Dans l'exemple représenté sur la **figure 1.12**, ces phénomènes de paroi aboutissent à la création d'une zone chargée positivement, accolée à la paroi, et à celle d'une zone chargée négativement qui peut s'étendre jusqu'au centre de la conduite.

On peut donc réaliser l'électrisation d'un récipient lors du remplissage par un liquide.

Suivant la nature du matériau constituant les conduites, celle des liquides en écoulement et des écoulements eux-mêmes (lents ou rapides) et le degré d'isolation électrique du récipient collecteur et des conduites, la charge électrique collectée sera plus ou moins importante.

Des phénomènes analogues, bien que ne relevant pas du même processus de création, apparaissent avec le transport de milieux pulvérulents (poudres alimentaires, céréales, etc.).

---

*Quand le fluide est en écoulement, la partie centrale du fluide est entraînée et la partie proche de la paroi ne l'est pas. Il en résulte qu'une charge électrique est transportée par le liquide qui, à son tour, charge le réservoir dans lequel il se déverse.*

---

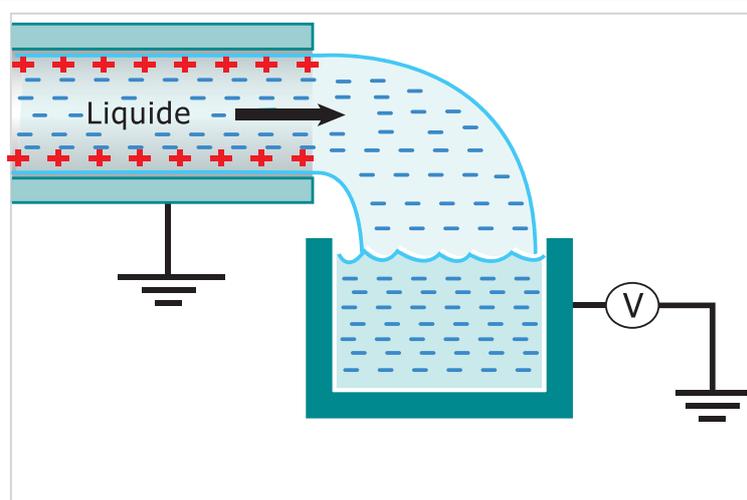


Figure 1.12 Électrisation par écoulement

## 1.3. Accumulation et dissipation des charges

### 1.3.1. Notions générales

Pour tous les procédés de génération sur une surface ou dans un volume de charges électriques, il n'y a accumulation que si le taux de génération est supérieur à celui de disparition (dissipation).

Un phénomène pour lequel les deux taux sont égaux n'engendre pas d'accumulation.

C'est donc par l'étude de la génération et de la dissipation que nous allons rendre compte des phénomènes électrostatiques dans leur globalité.

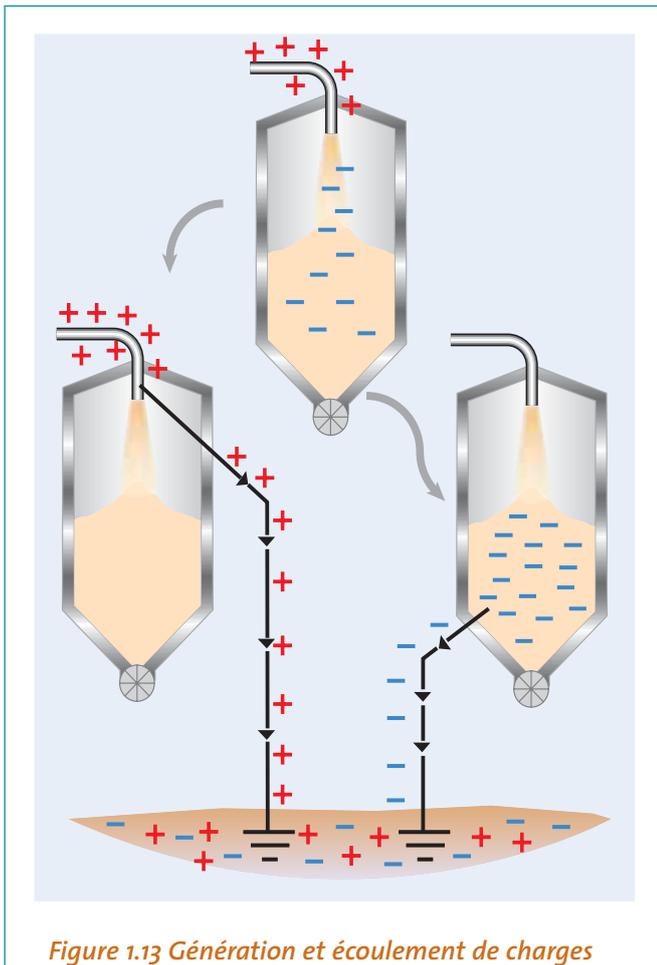


Figure 1.13 Génération et écoulement de charges

Quelles que soient la géométrie et la complexité du système industriel en cause dans les phénomènes électrostatiques, l'étude du problème peut souvent être ramenée à celle d'un condensateur (ou un ensemble de condensateurs) dont la géométrie (plane, cylindrique, etc.) présente des similitudes avec celle du système industriel considéré. Ainsi, deux grandes surfaces portées à des potentiels différents et séparées par de l'air seront assimilées à deux armatures planes et infinies d'un condensateur, même si elles ne sont pas totalement planes (et même si, évidemment, elles ne sont pas infinies).

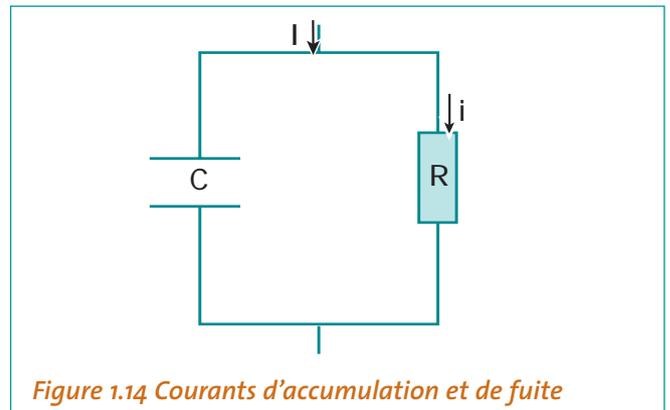


Figure 1.14 Courants d'accumulation et de fuite

Dans tous les cas de figure, on pourra faire l'étude globale du phénomène par l'intermédiaire de celle de la charge et la décharge (génération, dissipation) d'un condensateur simple.

Rappelons quelques points importants du comportement des condensateurs.

Tout condensateur chargé, s'il n'est pas alimenté, perd régulièrement sa charge. Le milieu diélectrique qui sépare les armatures n'est pas totalement isolant, l'environnement extérieur des armatures ne l'est pas non plus, si bien que la charge électrique du condensateur décroît au fur et à mesure que le temps s'écoule. Le schéma électrique réel qui tient compte de la perte de charge fait intervenir une résistance  $R$  dite résistance de fuite.

Si l'on veut décrire totalement le fonctionnement d'un condensateur réel, on doit ajouter les courants électriques (figure 1.14),  $I$  étant le courant de charge,  $i$  le courant de fuite. Quand  $I$  est plus grand que  $i$ , le condensateur se charge ; quand  $I$  est égal à  $i$ , le condensateur garde sa charge ; quand  $I$  est plus petit que  $i$ , le condensateur se décharge.



La loi de décharge d'un condensateur s'écrit :

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t / \tau)$$

où :

- ☀  $Q(t)$  est la charge du condensateur à l'instant  $t$  ;
- ☀  $Q_0$  la charge à l'instant 0 ;
- ☀  $\tau$  est une constante qui a la dimension d'un temps et qui vaut  $RC$ .

Dans la réalité, le problème se complique un peu car les paramètres  $R$  et  $C$ , que nous citons plus haut et que nous avons considérés constants, peuvent varier au cours du temps.

En pratique, le problème sera donc d'évaluer  $i$  par rapport à  $I$  :

- ☀  $i$  sera la perte régulière de charge électrique du système ;

- ☀ I sera l'apport régulier de charge électrique, apport qui s'effectuera par l'un des mécanismes détaillés au paragraphe précédent.

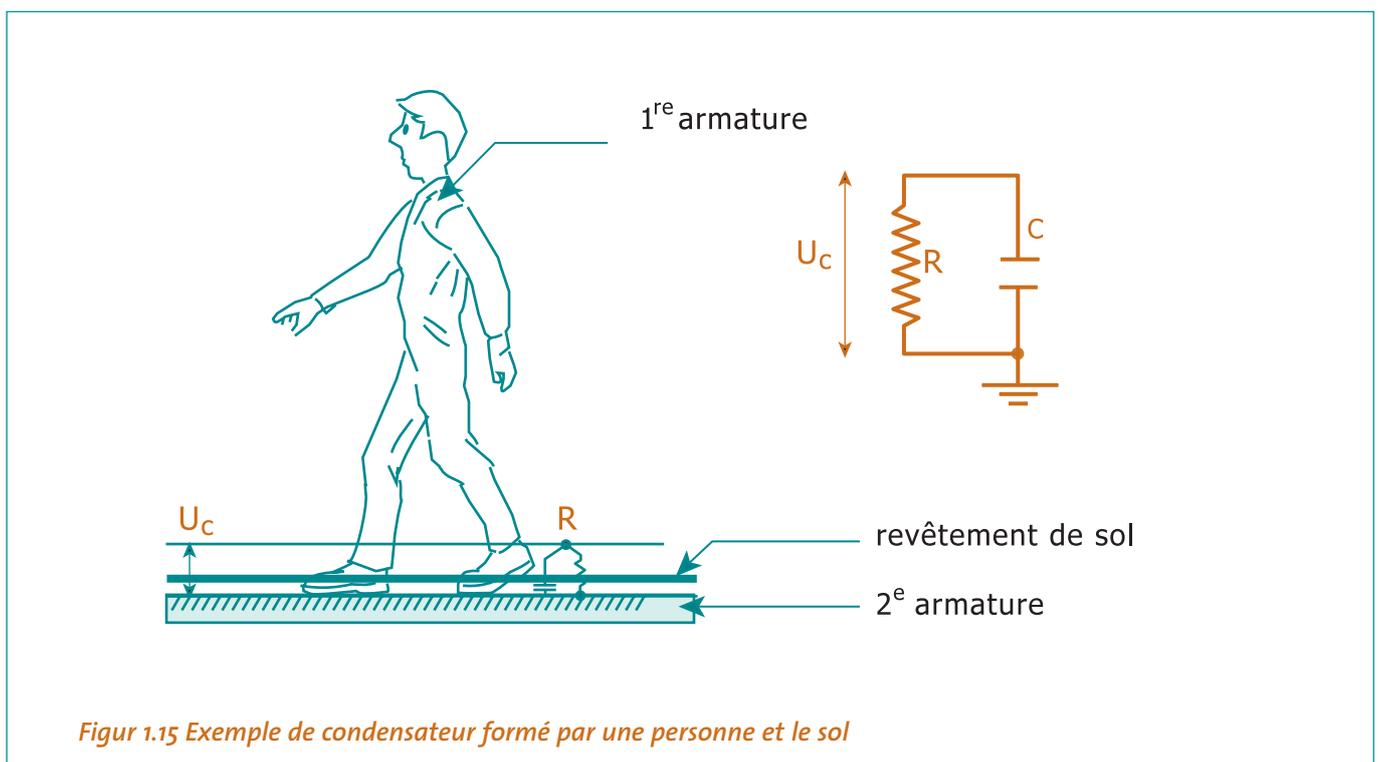
---

*Pour éviter toute accumulation dangereuse de charges, on cherchera avant tout à favoriser leur dissipation (et également à réduire leur apparition).*

---

### Exemple de condensateur formé par une personne et le sol

Une personne peut être assimilée à la première armature d'un condensateur dont le diélectrique serait constitué par les chaussures de la personne et le revêtement du sol sur lequel elles reposent ; la seconde armature est représentée par le sol supposé sans résistance (figure 1.15).



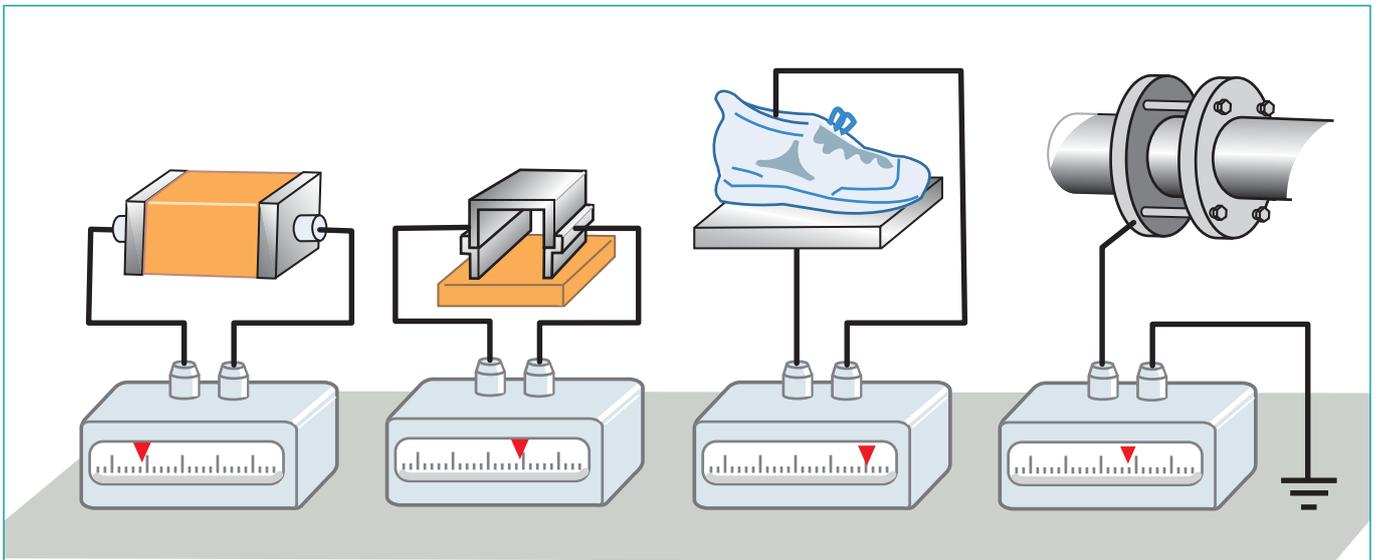


Figure 1.16 Exemple de mesures de résistances (résistance volumique, résistance de surface, résistance d'isolement, résistance par rapport à la terre)

### 1.3.2. Cas des solides

#### 1.3.2.1. Mécanismes

Les mécanismes de contact-séparation et de frottement sont à l'origine de la majeure partie des phénomènes d'accumulation de charges électriques sur des surfaces.

Les problèmes d'accumulation surviennent dans le cas des surfaces en frottement quand au moins une des surfaces est isolante.

En effet, deux surfaces conductrices et reliées à la terre qui produisent par frottement des charges électriques les évacuent aussi rapidement qu'elles les créent.

Les charges accumulées sur une surface vont tenter de gagner un point à la terre.

La résistance superficielle est une grandeur importante pour caractériser la dissipation des charges de la surface considérée.

Cette résistance superficielle s'obtient par la mesure du rapport tension/courant ( $U/I$ ) obtenu à partir de deux électrodes posées sur la surface considérée. Plus ce rapport est important, plus les charges auront des difficultés à migrer vers un point à la terre, plus elles s'accumuleront et plus elles auront tendance à créer des décharges de surface très énergétiques.

#### 1.3.2.2. Facteurs d'influence

Les principales causes d'apparition des charges sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Exemples d'opérations	Principales causes d'apparition des charges
Mouvement d'une bande sans fin défilant sur des rouleaux (exemples : courroies de transmission, bandes transporteuses, déroulement continu de films, etc.).	<ul style="list-style-type: none"> <li>☀ Contact et rupture de contact entre la bande et les organes de machines (poulies, rouleaux, tambours, support de coulage pour les films et les pellicules, etc.).</li> <li>☀ Frottement de bandes avec des pièces de machine ou des matières transportées.</li> </ul>
Marche d'une personne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>☀ Contact entre la semelle et le sol, l'un des deux étant isolant.</li> </ul>



### 1.3.3. Cas des solides divisés

#### 1.3.3.1. Mécanismes

Les matériaux granulaires en écoulement ont un comportement qui s'apparente à celui d'un fluide isolant. Le mécanisme de création de charge est toutefois différent de celui à l'origine des charges électriques dans un liquide. **C'est le choc des particules entre elles ou sur la paroi des équipements qui génère des charges électriques** dans le milieu (création par contact-séparation). Ce qui est développé pour les liquides au paragraphe suivant peut s'appliquer ici sans trop de modifications ; **là encore, le temps de relaxation (ou de dissipation) joue un rôle important** : plus ce temps est faible, plus les charges se dissipent rapidement.

Vouloir réduire les charges électrostatiques signifie ici encore vouloir réduire le courant de génération et augmenter le courant de dissipation. On est souvent obligé, pour des raisons techniques, de ne pas toucher à la vitesse de débit des poudres ou des granulés. On ne peut finalement jouer que sur le courant de dissipation en agissant par exemple sur l'humidité du matériau (quand cela est possible) ou alors en faisant intervenir des agents antistatiques. En effet l'eau, ou l'agent antistatique, rend conducteur le milieu granulaire et la charge accumulée peut donc se dissiper plus rapidement. Ce procédé n'est pas toujours applicable car tous les matériaux ne supportent pas la présence d'eau et on ne peut pas toujours ajouter un additif antistatique (cf. chapitre 3.2.5).

#### 1.3.3.2. Facteurs d'influence

Les principaux facteurs intervenant dans l'accumulation des charges sont regroupés dans le tableau en bas de page.

La charge électrostatique des produits pulvérulents est habituellement caractérisée par la densité de charge massique qui s'exprime par le rapport de la charge électrique totale d'une certaine quantité de produit à sa masse.

Pour les opérations industrielles types, les ordres de grandeur de densité de charge massique (extraites de la publication UTE C 79-138) sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Opération	Densité de charge massique ( $\mu\text{C}/\text{kg}$ )
Tamassage	$10^3$ à $10^5$
Versement	$10^1$ à $10^3$
Transport par roulement	1 à $10^2$
Broyage	1 à $10^1$
Filtrage micronique	$10^2$ à $10^1$
Transport pneumatique	$10^3$ à $10^1$

Tableau 1.2 Ordres de grandeur de densités de charge massique

#### Exemples d'opérations

Fabrication, transport et stockage de poudres.

#### Facteurs intervenant dans l'accumulation des charges

- ☀ Composition chimique et caractéristiques physiques des matériaux
- ☀ Teneur en humidité
- ☀ Structure et nature des parois de l'équipement
- ☀ Taille des particules
- ☀ Concentration du nuage de poussières dans l'atmosphère
- ☀ Vitesse des particules
- ☀ Turbulence

## 1.3.4. Cas des liquides

La **conductivité** des liquides est un facteur important pour la couche diffuse car elle conditionne son épaisseur et, par conséquent, les expressions du potentiel et de la charge totale (cf. glossaire "Théorie ionique"). Dans la publication UTE C 79-138, les liquides sont classés selon leur conductivité de la façon suivante :

- ☀ **conductivité élevée** : 1000 pS/m (1 pS/m, lire "un picosiemens par mètre" ; 1 pS/m vaut  $10^{-12}$  S/m) ;
- ☀ **conductivité moyenne** : entre 50 pS/m et 1000 pS/m ;
- ☀ **conductivité faible** : inférieure à 50 pS/m.

Pour certains liquides, des valeurs indicatives des conductivités et les temps de relaxation correspondants (extraits de la publication UTE C 79-138) sont reportés dans le tableau 1.3 ci-dessous. Les liquides qui donneront naissance à des phénomènes d'électrisation lors d'un écoulement seront ceux qui auront justement un temps de relaxation important (liquides qui auront des difficultés à retrouver rapidement un état électrique neutre). **Plus le liquide est isolant (plus les charges qu'il contient ont des difficultés à se mouvoir), plus son temps de relaxation est important et donc plus les phénomènes d'électrisation ont de chance de se produire.**

Liquides	Conductivité(pS/m)	Temps de relaxation (s)
<b>Conductivité faible</b>		
Hydrocarbures très purifiés	$10^2$	2000
Hydrocarbures typiques	$10^1 - 10$	2 - 200
Composant aromatique purifié (toluène, xylène, etc.)	$10^1 - 10$	2 - 200
Composant aromatique typique	5 - 50	0,4 - 4
Essence	$10^1 - 10^2$	0,2 - 200
Kérosène	$10^1 - 50$	0,4 - 200
Fioul	1 - $10^2$	0,2 - 20
Huiles de couleurs blanches	$10^1 - 10^2$	0,2 - 200
Huile lubrifiante	$10^2 - 10^3$	0,02 - 2000
Éthers	$10^1 - 10^2$	0,2 - 200
Mélanges de solvants aromatiques	1 - $10^3$	0,02 - 20
Gaz naturel condensé sans inhibiteur de corrosion	10 - $10^2$	0,2 - 2
<b>Conductivité moyenne</b>		
Combustibles et huiles contenant des additifs dissipatifs	50 - $10^3$	0,02 - 0,4
Huiles combustible lourd (noir)	50 - $10^5$	$2 \times 10^1 - 0,4$
Esters	$10^2 - 10^6$	$2 \times 10^5 - 0,2$
<b>Conductivité élevée</b>		
Huile brute	$\geq 10^3$	$\leq 0,02$
Gaz naturel condensé avec inhibiteur de corrosion	$\geq 10^3$	$\leq 0,02$
Alcool	$10^6 - 10^8$	$2 \times 10^7 - 2 \times 10^5$
Cétones	$10^5 - 10^8$	$2 \times 10^7 - 2 \times 10^4$
Eau	$\geq 10^8$	$\leq 2 \times 10^7$

Tableau 1.3 Valeurs indicatives des conductivités et des temps de relaxation de certains liquides



Dans le tableau, la valeur du **temps de relaxation** est déduite de la formule suivante :

$$\tau = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\sigma}$$

où  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du liquide,  $\epsilon_0$  la permittivité du vide ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m) et  $\sigma$  la conductivité électrique du liquide (en S/m). On pose souvent

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

Pour les liquides de conductivité faible (les hydrocarbures par exemple), la densité volumique de charge transportée augmente avec la longueur de la conduite. À partir d'une certaine longueur

$$L \geq 3v\tau$$

cette valeur devient stationnaire et est donnée en régime laminaire faibles débits par l'expression empirique suivante :

$$\rho = 5v$$

formule dans laquelle  $v$  est la vitesse du fluide dans la conduite (en m/s) et  $\rho$  est la densité volumique de charge (en  $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ).

Cette expression peut être utilisée, par exemple, lors du remplissage d'un réservoir. En pratique, pour les vitesses qui varient de 1 à 10 m/s, on obtient des densités volumiques de charge comprises entre  $5 \mu\text{C}/\text{m}^3$  et  $50 \mu\text{C}/\text{m}^3$ .

En régime turbulent forts débits, la densité volumique de charge électrique est toujours plus élevée qu'en régime laminaire. Précisons que les filtres et les valves que l'on rencontre dans une conduite génèrent des charges électriques importantes du fait de la turbulence des écoulements qui règne dans ces zones.

### 1.3.5. Cas des gaz

Les mécanismes d'écoulement des gaz purs ne sont pas générateurs de charges électrostatiques. En revanche, les impuretés solides ou liquides présentes dans ces gaz peuvent être à l'origine de phénomènes électrostatiques (tableau ci-dessous).

Exemples d'opérations	Paramètres importants pour la création de la charge
Frottement des impuretés contenues dans les gaz les unes contre les autres, sur les parois des canalisations et du récipient.	⚡ Vitesse de circulation du fluide, quantité d'impuretés.
Détente de gaz comprimés ou liquéfiés, détente de jets de vapeurs conduisant à former des aérosols.	⚡ Débit de fluide, quantité d'aérosols produits.

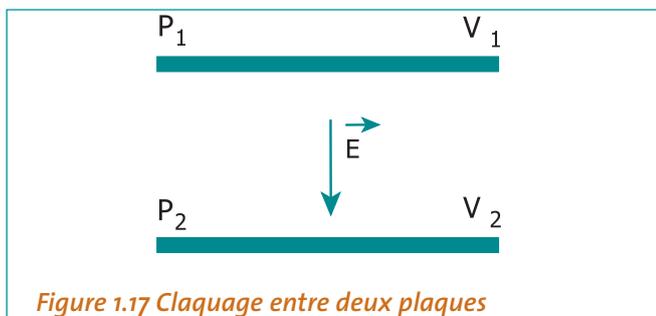
## 1.4. Phénomènes disruptifs

### 1.4.1. Loi de Paschen

L'expérience montre que, lorsqu'une différence de potentiel  $\Delta V = V_2 - V_1$  est appliquée entre deux plateaux conducteurs et parallèles distants de  $d$  et séparés par un gaz à pression  $p$  (figure 1.17), un claquage se produit si  $\Delta V$  dépasse une certaine valeur seuil  $V_d$  appelée tension disruptive.

Une étincelle jaillit alors quelque part entre les plateaux.

Dans la plupart des gaz, on constate que le potentiel disruptif dépend de la masse de gaz contenue dans le volume séparant les deux plateaux divisée par la surface commune aux deux plateaux.



L'influence de la pression  $p$ , de la température absolue  $T$  et de la distance  $d$  entre les plateaux n'intervient que dans l'expression de la masse de gaz.

Si l'on considère que le gaz est parfait (ce qui est justifié dans une grande majorité des cas), ce rapport est proportionnel à  $p.d/T$  : c'est la loi de Paschen (figure 1.18).

Pour des valeurs de  $T$  et de  $p$  constantes (température ambiante et pression atmosphérique), la loi de Paschen peut être simplifiée par l'expression :

$$V_d = f(p.d / T) = a + b.d$$

Pour les très petites valeurs du produit  $p.d$ , la tension disruptive augmente quand  $p.d$  diminue. La pente est très forte et correspond au fait que le vide est un isolant parfait. Pour les valeurs plus importantes du produit  $p.d$ , le potentiel augmente lentement quand le produit  $p.d$  augmente.

Pour les valeurs de  $p.d$  supérieures à 1, on a une bonne approximation de  $V_d$  par la relation :

$$V_d = 32100 p.d$$

avec  $p$  en bar,  $d$  en centimètre et  $V_d$  en volt, d'où

$$V_d \approx 30 \text{ kV pour } d = 1 \text{ cm} \leq \text{pression atmosphérique}$$

La loi de Paschen ne s'applique qu'à la décharge entre deux plateaux plans infinis, ou du moins de grandes surfaces (champ électrique uniforme).

En effet, les phénomènes sont entièrement modifiés si le champ électrique n'est pas uniforme, en particulier si l'une des électrodes est une pointe, le champ électrique est très intense à son voisinage, même pour des valeurs modérées du potentiel électrique.

Les valeurs typiques de tension disruptive de l'air dans un champ uniforme à 20°C et à 1 bar (valeurs extraites de la courbe de Paschen d'après le rapport Cigre WG 15 mars 1977) sont regroupées dans le tableau 1.4 ci-dessous :

Distance de claquage (mm)	Tension disruptive, valeur de crête (kV)
0,5	2,7
1	4,5
1,5	6
2	7,5
3	11,2
4	14,2
5	16,8
6	19,9
8	26
10	31,7
15	45,5
20	59
30	86
40	112
50	138
60	164
80	215
100	266

Tableau 1.4 Tensions disruptives de l'air

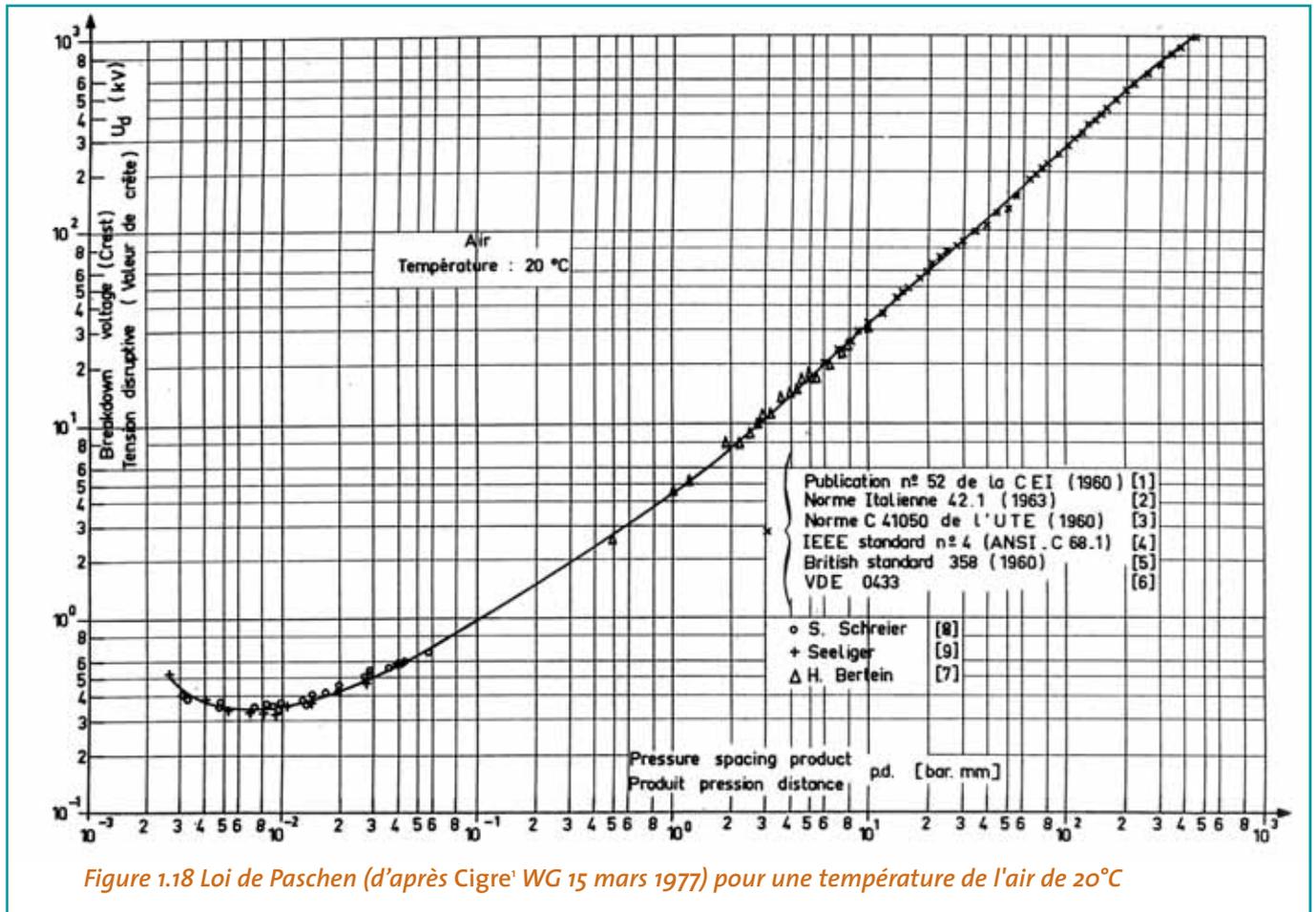


Figure 1.18 Loi de Paschen (d'après Cigre' WG 15 mars 1977) pour une température de l'air de 20°C

### 1.4.2. Cas des gaz rares

Lorsque l'on mesure les potentiels disruptifs dans les gaz rares (argon, néon, hélium) pris à l'état pur, on obtient des valeurs cent fois plus faibles que dans l'air à la même pression et l'expérience montre qu'elles ne dépendent pas de la pression.

Les lois de la décharge disruptive dans les gaz rares purs sont différentes de celles qui s'appliquent aux autres gaz. Il suffit cependant que le gaz rare renferme une très faible quantité d'air (de l'ordre de 1 %) pour que les lois de la décharge soient les mêmes que dans l'air.

### 1.4.3. Les mécanismes de la décharge disruptive

L'explication de la brusque décharge électrique que l'on observe entre les deux plateaux n'est pas immédiate, car le gaz présent entre les plateaux composé de molécules neutres est a priori isolant.

Une décharge électrique étant un mouvement de charges électriques d'une plaque vers l'autre, on voit mal comment ce mouvement pourrait s'opérer dans un milieu isolant.

Cependant, une étude plus approfondie montre qu'il existe en très petite quantité dans le gaz, même s'il n'est pas soumis à l'action d'un champ électrique, des ions dont on attribue la présence à l'action des rayons cosmiques à haute énergie sur les molécules du gaz. Ces rayons entrant en collision avec les molécules du gaz ont une énergie suffisante pour extraire un électron de la molécule.

L'ionisation du gaz est faible mais permanente au cours du temps.

Les électrons et les ions créés en l'absence de champ électrique se recombinent entre eux (autant d'entités de chaque espèce apparaissent et disparaissent à chaque instant).

Si l'on impose un champ électrique faible, les électrons et les ions vont avoir tendance à se diriger vers l'électrode du signe opposé au leur.

<sup>1</sup> CIGRE : Congrès International des Grands Réseaux Électriques

Après un nombre incalculable de collisions avec d'autres molécules (neutres ou pas), un électron qui arrive sur le plateau chargé positivement va être capté, et un ion positif qui arrive à proximité du plateau chargé négativement va capter un électron.

Un courant circule, il est infime, voire techniquement non mesurable, sauf avec des systèmes très sophistiqués.

L'augmentation de l'intensité du champ électrique a pour effet d'augmenter la vitesse des électrons créés.

En dessous d'un certain seuil de champ électrique, rien de particulier n'apparaît si ce n'est une accélération du processus que nous avons décrit plus haut : les électrons créés "rebondissent" de molécules neutres en molécules neutres de plus en plus rapidement.

À partir d'un certain seuil, la vitesse acquise par les électrons sera suffisante pour que, lors d'une collision avec une molécule neutre, il y ait libération d'un électron par un des atomes de la molécule.

---

*Pour un électron incident, on obtient après collision, d'après ce scénario, deux électrons (l'électron incident et celui arraché à la molécule), chacun d'entre eux ayant une énergie moindre que celle qu'avait l'électron incident avant la collision.*

---

Pris dans le même champ électrique, ils vont être accélérés et pouvoir donner naissance chacun à deux autres électrons qui, pris dans le champ électrique, seront eux-mêmes accélérés, et ainsi de suite...

---

*Un phénomène d'avalanche est enclenché et on assiste à une décharge brutale entre les deux plateaux (ou les deux surfaces chargées).*

---

Ce mécanisme est connu sous le nom de "mécanisme de Townsend".

### 1.4.4. Décharges d'origine électrostatique

#### 1.4.4.1. Les différents types de décharges

*Les décharges d'origine électrostatique font toujours suite à une situation d'accumulation excessive de charges électrostatiques.*

*Elles ont lieu lorsque l'intensité du champ électrique au voisinage d'un objet chargé excède le champ disruptif du gaz environnant qui est de l'air dans la plupart des situations industrielles.*

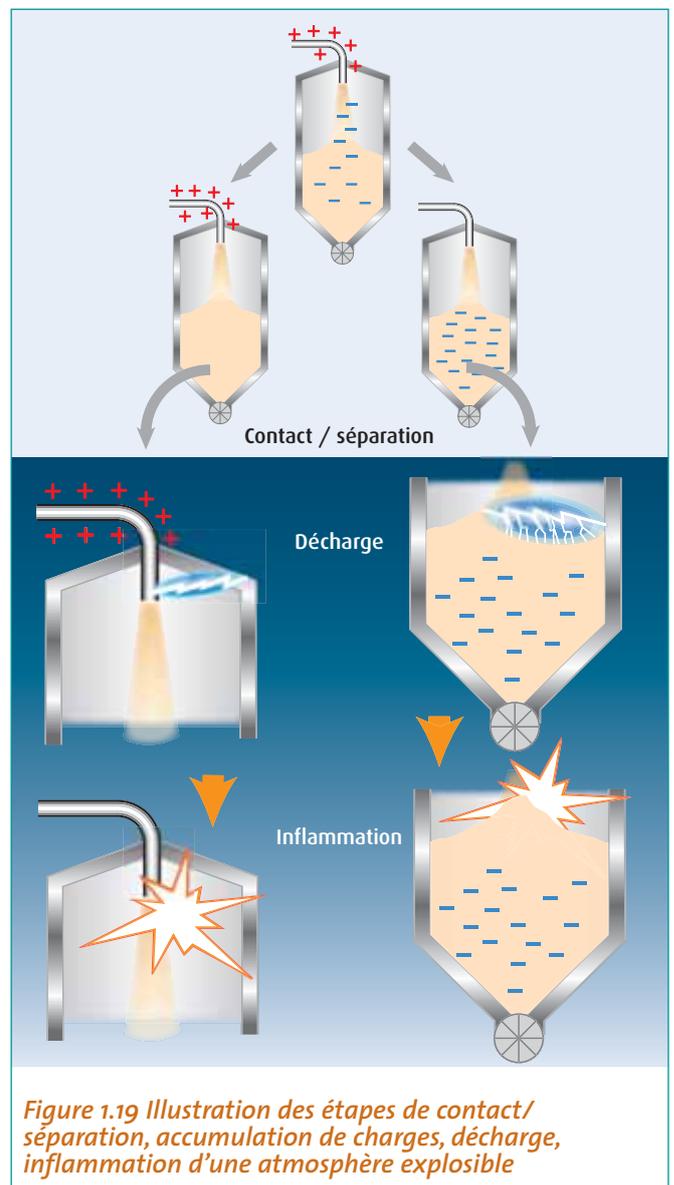


Figure 1.19 Illustration des étapes de contact/séparation, accumulation de charges, décharge, inflammation d'une atmosphère explosible



Elles se manifestent de différentes façons et ont été abondamment étudiées dans la littérature.

Elles prennent différentes formes selon la situation qui dépend à la fois de la géométrie des équipements, de la conductivité des milieux séparant les surfaces chargées mais aussi de la conductivité des surfaces elles-mêmes et du processus des opérations.

Comme indiqué précédemment, la connaissance de la nature des décharges d'origine électrostatique est nécessaire pour l'analyse du risque.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons décrire et classer les différents types de décharges.

#### 1.4.4.2. Décharge étincelle

C'est une décharge qui a lieu entre deux conducteurs portés à des potentiels tels que le champ électrique (peu divergent) entre les deux conducteurs soit au moins égal au champ disruptif (environ 3 MV/m en champ uniforme pour l'air à la pression atmosphérique).

Si les conducteurs peuvent être assimilés à des plans parallèles et si les effets de bord sont négligeables, le champ électrique entre les plaques est uniforme et l'étincelle peut se produire en n'importe quel point de l'électrode.

Dans l'air à la pression atmosphérique (figure 1.20), la décharge est caractérisée par un éclair très lumineux qui emprunte le plus court chemin pour aller d'une électrode à l'autre.

En milieu industriel, on peut s'attendre à ce qu'il y ait une **étincelle** chaque fois que l'on sera en présence de corps conducteurs (métalliques par exemple) électriquement isolés.

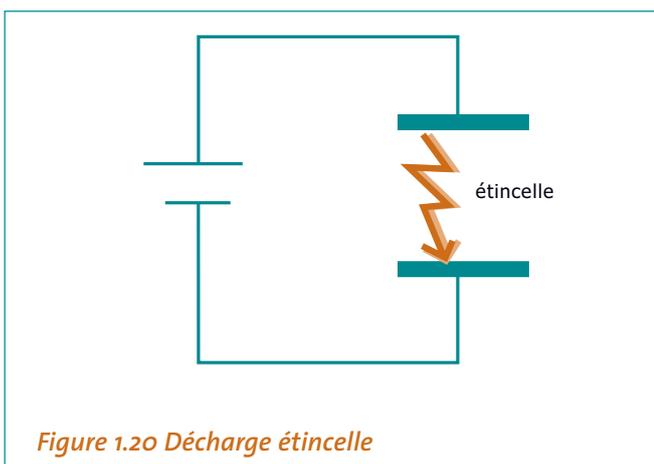


Figure 1.20 Décharge étincelle

*Cette décharge peut se produire par exemple entre un récipient métallique électriquement isolé qui a emmagasiné des charges électriques lors de son remplissage et qui est placé au voisinage d'un conducteur mis à la terre (mais, évidemment, qui n'est pas en contact avec le récipient).*

On est dans une configuration électrique semblable à celle d'un condensateur (d'où le nom de "décharge capacitive") qui, pour un potentiel supérieur au potentiel disruptif, va subir un claquage (cf. glossaire "Claquage"). Les valeurs typiques de capacité rencontrées dans la pratique courante sont données dans le tableau 1.5 ci-après.

Objets	Capacité (1 pF = 10 <sup>-12</sup> F)
Bride (taille minimale 100 mm)	#10
Pelle mécanique	# 20
Petit conteneur (seau, bidon 50 l)	10-100
Entonnoir	10-100
Conteneur moyen (de 250 à 500 l)	50-300
Corps humain	100-300
Grands équipements (silos, camions-citernes, etc.)	1000-10000

Tableau 1.5 Valeurs type de capacités

Ces valeurs ne sont qu'indicatives car elles dépendent de l'atmosphère environnante et de la proximité de l'objet isolé par rapport à la terre. Si la capacité et le potentiel d'un système conducteur isolé peuvent être mesurés, l'énergie disponible pour une décharge du système de type étincelle est donnée par la formule des condensateurs :

$$W = 1/2 CV^2$$

Dans l'exemple ci-après (figure 1.12), le corps humain, isolé du sol par des semelles en caoutchouc ou tout autre isolant, peut atteindre un potentiel, à l'égard de la terre, de plusieurs milliers de volts par le frottement de

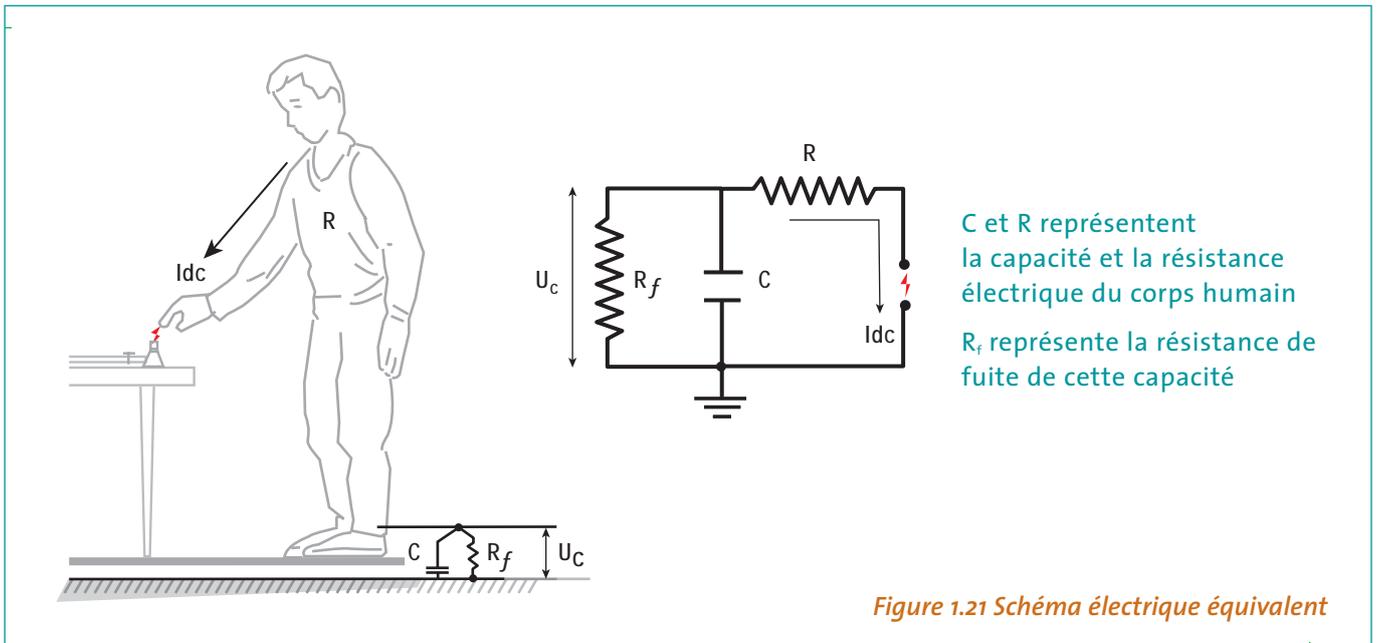


Figure 1.21 Schéma électrique équivalent

ses chaussures sur le revêtement de sol. On admet que sa capacité par rapport à la terre oscille entre 100 et 300 picofarads et l'énergie maximale susceptible d'être libérée dans une décharge disruptive peut atteindre facilement quelques dizaines de mJ ce qui est suffisant pour enflammer le gaz sortant d'un bec Bunsen ou provoquer une explosion si l'atmosphère ambiante est constituée d'un mélange air-gaz.

Plus l'énergie d'une décharge est importante, plus elle causera de dégâts ; les décharges étincelle peuvent produire l'érosion et même la fusion des surfaces qu'elles atteignent.

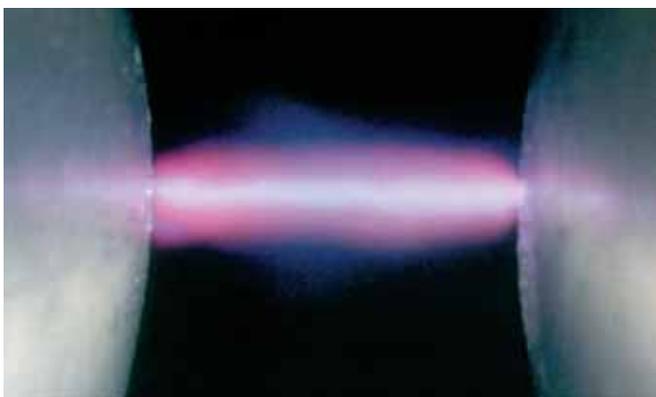


Photo 1.3 Décharge étincelle

Dans d'autres géométries (sphère-plan, pointe-plan, etc.), la décharge étincelle peut également exister, mais d'autres phénomènes vont entrer en jeu (effet de couronne). Les principales caractéristiques de ce type de décharge sont résumées dans le tableau ci-après :

<b>Surfaces impliquées</b>	Conducteurs (liquides ou solides).
<b>Conditions de décharges</b>	Le champ électrique est supérieur ou égal au champ disruptif du milieu environnant (3 MV/m pour l'air).
<b>Courant de la décharge</b>	Dépend de l'impédance du système et peut atteindre plusieurs ampères en valeur pic.
<b>Exemple de situations industrielles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tronçon de conduite électriquement isolé qui se charge du fait de l'écoulement d'un liquide ou d'un pulvérulent dans la conduite ;</li> <li>• Décharge provoquée par une personne chargée d'électricité statique (charge due à la marche, à l'électrisation par influence, etc.).</li> </ul>
<b>Énergie et caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'énergie de ce type de décharge peut être calculée, connaissant la capacité C équivalente de l'élément chargé et sa tension (par rapport à la terre). Elle est donnée par la relation : <math>W = 1/2 CV^2</math> ;</li> <li>• Cette décharge peut laisser des traces d'érosion sur les surfaces.</li> </ul>

Tableau 1.6 Principales caractéristiques des décharges étincelles



Objet chargé	Capacité C (pF)	Potentiel U (kV)	Énergie W (mJ)
Bride	10	10	0,5
Petit récipient (50 litres)	50	8	2
Personne	150	12	11
Fût métallique (200 litres)	200	20	40

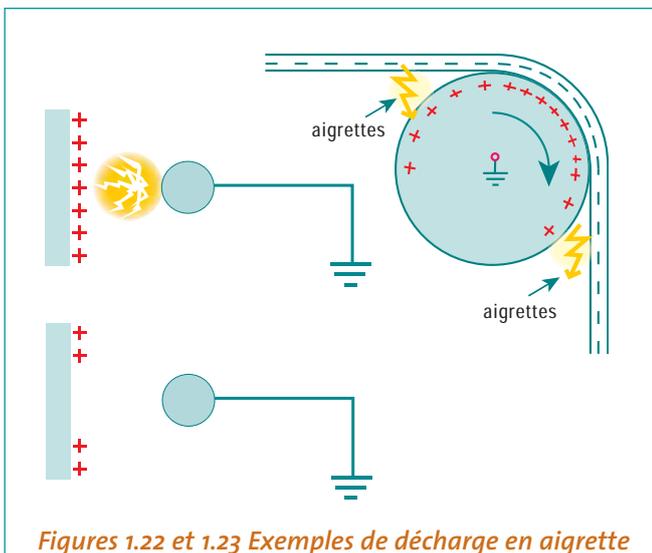
Tableau 1.7 Valeurs type de l'énergie des décharges étincelles

Dans le tableau ci-dessus (d'après AISS Prevention Series n°2017) sont indiquées quelques valeurs types de l'énergie des décharges étincelle.

#### 1.4.4.3. Décharge en aigrette

Quand on est en présence d'une surface isolante, les décharges prennent une autre allure.

Le cas de la **figure 1.22** suivante est celui d'une sphère métallique reliée à la terre et d'une surface isolante porteuse de charges électriques. Lorsque l'on approche la sphère de la surface isolante chargée, il se produit, à partir d'une certaine distance, une décharge électrique qui prend naissance à la surface de la sphère et se propage vers la surface isolante. La forme de cette décharge électrique prise dans le champ électrique non uniforme s'évase près de la surface isolante et se termine par de multiples filaments, ce qui lui donne l'aspect d'une aigrette.



Figures 1.22 et 1.23 Exemples de décharge en aigrette

Cette décharge peut s'accompagner d'un crépitement. Elle a pour conséquence la neutralisation de certaines charges sur l'isolant dans le voisinage de la zone proche de la sphère. Les charges de la partie de la surface isolante éloignée de la sphère sont conservées. On peut ainsi, en déplaçant la sphère le long de la surface isolante, provoquer des décharges en **aigrette** successives.

Contrairement au cas précédent où le chemin emprunté par l'étincelle était de très petite taille, ici l'espace occupé par la décharge va en s'élargissant et la partie de la surface isolante qui reçoit la décharge est beaucoup plus importante que celle correspondant à la décharge étincelle.

Les principales caractéristiques de ce type de décharge sont résumées dans le tableau 1.8 ci-dessous.

<b>Surfaces impliquée</b>	Surface isolante chargée
<b>Conditions de décharges</b>	Le champ électrique est égal au champ disruptif du milieu environnant (3 MV/m pour l'air)
<b>Courant de la décharge</b>	Courant observé de quelques microampères
<b>Exemple de situations industrielles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Décharges de surface isolantes chargées par frottement, soit de manière continue (courroie de machine par exemple), soit de manière aléatoire (coffret isolant de matériel électrique) ;</li> <li>• Les décharges de surface des liquides isolants (lors du remplissage à vitesse élevée dans un réservoir par exemple) sont un cas particulier de décharge en aigrette.</li> </ul>
<b>Énergie et caractéristiques</b>	L'énergie de la décharge peut être généralement considérée comme étant inférieure à quelques mJ.

Tableau 1.8 Principales caractéristiques des décharges en aigrette

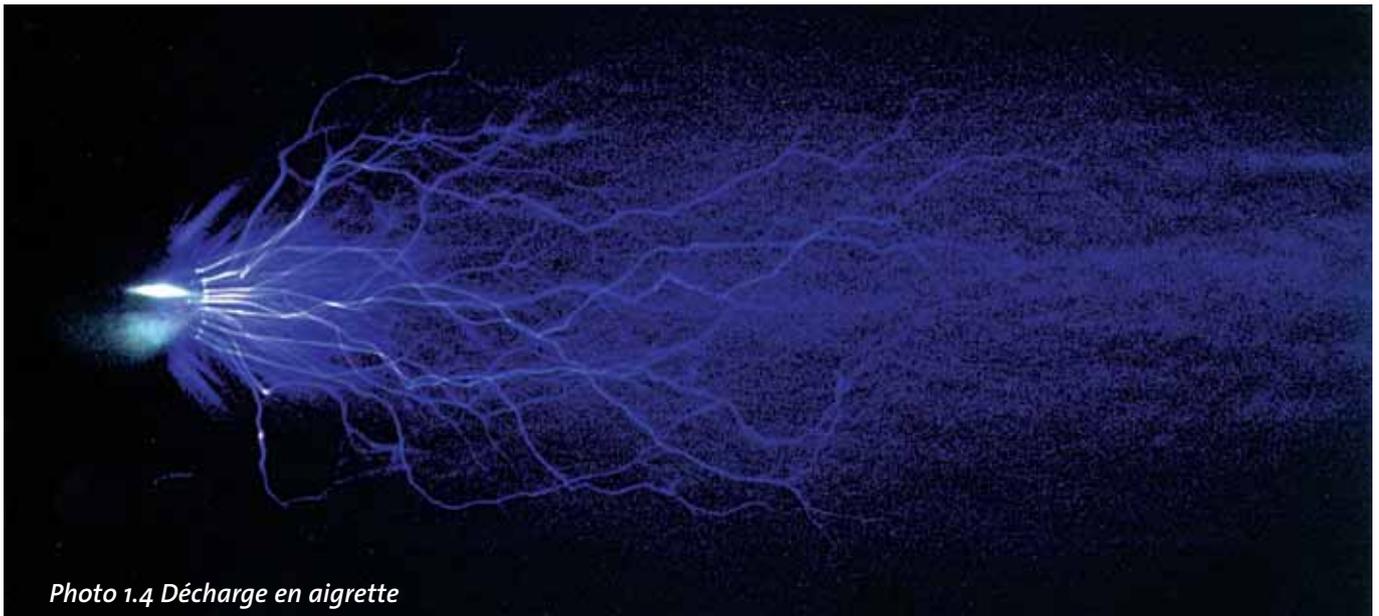


Photo 1.4 Décharge en aigrette

*Pour une même énergie transportée, les effets seront donc plus diffus et les traces laissées sur la surface ne seront pas souvent visibles.*

#### 1.4.4.4. Décharge glissante de surface

Dans certaines conditions pratiques particulières, on peut assister à un type de décharge très énergétique tel qu'explicité de manière théorique ci-après.

Une surface conductrice plane et reliée à la terre est recouverte d'un film isolant (figure 1.24).

Le film isolant est chargé (positivement sur l'exemple), à la suite d'une opération fortement génératrice de charges (par exemple transport pneumatique).

La surface conductrice se charge par influence (négativement sur l'exemple, cf. chapitre 1.2.5).

La charge superficielle du film peut devenir très intense, beaucoup plus intense que s'il n'y avait pas un conducteur à la terre en contact avec le film.

En effet, les charges s'attirent mutuellement à travers le film et, dans ce cas, les charges positives de la surface du film ont plus tendance à s'accumuler que dans la configuration sans surface métallique à la terre.

Lorsque l'on approche de la surface isolante chargée une sphère conductrice reliée à la terre, il se produit, à partir d'une certaine distance, une décharge électrique qui prend naissance à la surface de la sphère et se propage vers la surface isolante.

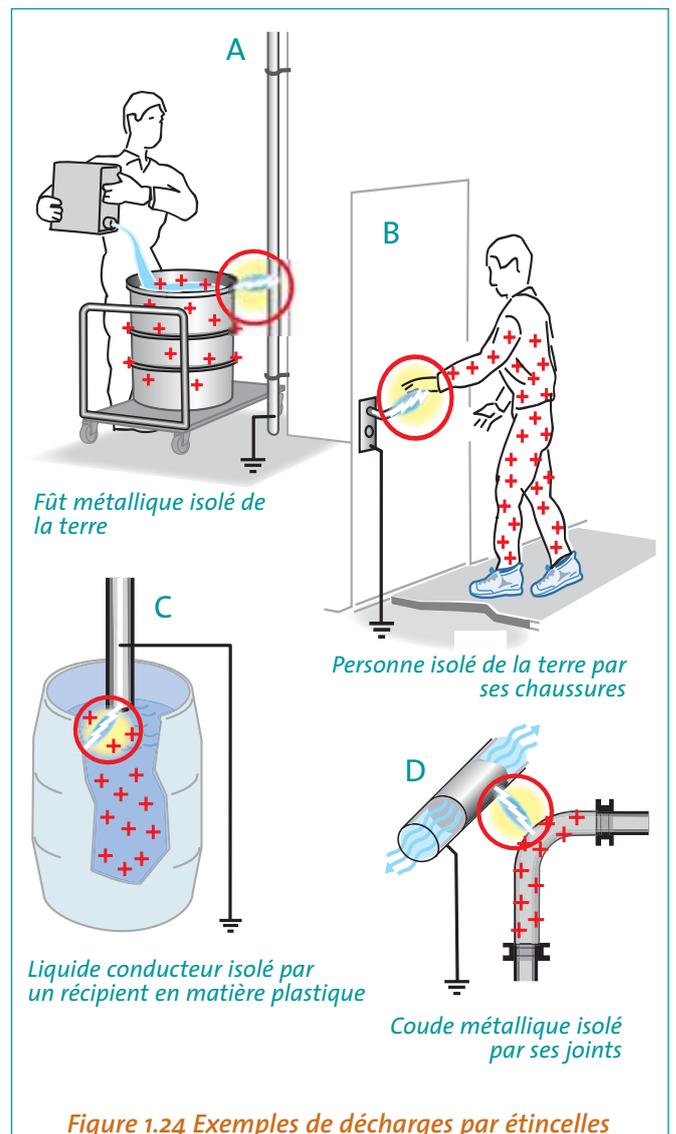


Figure 1.24 Exemples de décharges par étincelles



Cette décharge est de très forte intensité par rapport à la décharge en aigrette. Une grande partie des charges de la surface isolante va alors être neutralisée à partir du point le plus proche de la sphère.

*Les décharges glissantes de surface sont toujours très énergétiques.*

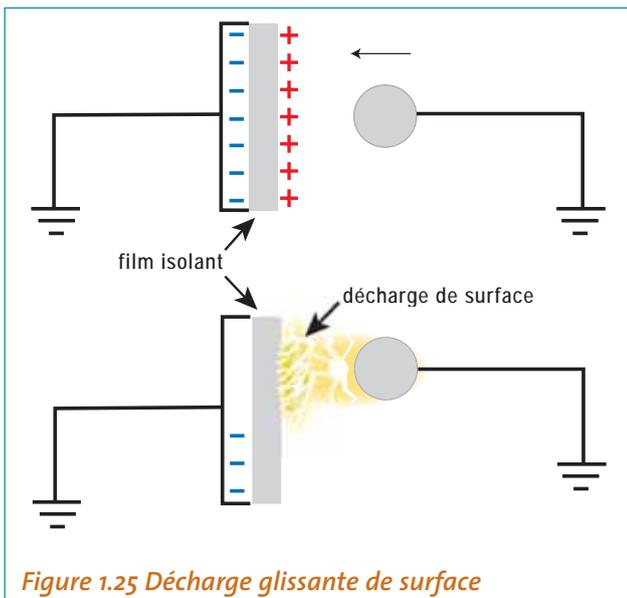


Figure 1.25 Décharge glissante de surface



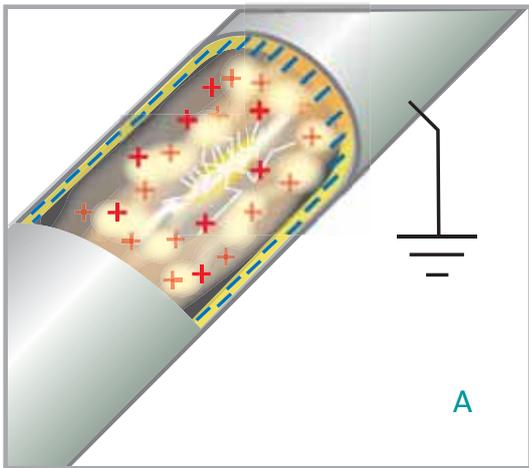
Photo 1.5 Décharge glissante de surface

On rencontre concrètement ce type de décharge quand, par exemple, une feuille de PVC, de Téflon ou d'un isolant quelconque recouvre une surface conductrice mise à la terre.

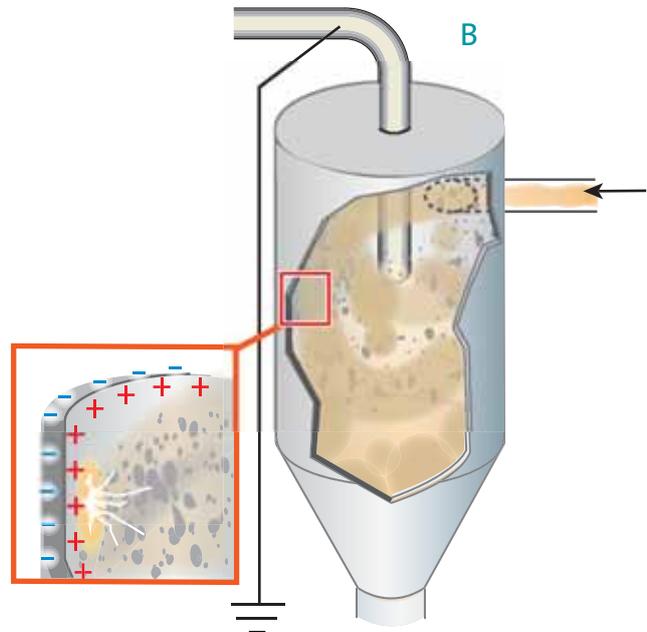
Si la tension, à travers la feuille isolante, atteint la tension de claquage du matériau constitutif, un trou apparaîtra dans l'isolant et une décharge de type glissante se produira. Au cours de celle-ci, toutes les charges de la surface emprunteront en un temps très court le chemin électrique créé par le trou dans la feuille.

<b>Surface impliquée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conducteur revêtu d'un isolant de fine épaisseur ou isolant revêtu d'un conducteur (configuration en double couche)</li> </ul>
<b>Conditions de décharges</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité surfacique de charge supérieure à environ <math>2,7 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2</math>.</li> <li>• Tension de claquage de la couche isolante supérieure à 4 kV [voir Cenelec R044-001 (1999)]</li> </ul>
<b>Exemples de situations industrielles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport pneumatique des poudres à grande vitesse à travers une conduite conductrice (métallique ou composite) à revêtement interne isolant.</li> <li>• "Mise à la terre" à tort d'un isolant (par maillage métallique, peinture conductrice, tresse de masse enroulée, etc.) : cette situation est due à une interprétation erronée des phénomènes électrostatiques</li> </ul>
<b>Énergie et caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'énergie de la décharge de surface peut être évaluée en utilisant l'expression suivante : <math>W = A\sigma^2d/(2\epsilon\epsilon_0)</math> dans laquelle A est l'aire de la surface déchargée et d l'épaisseur de l'isolant.</li> <li>• Elle peut atteindre plusieurs milliers de mJ et laisser des traces sur la surface.</li> </ul>

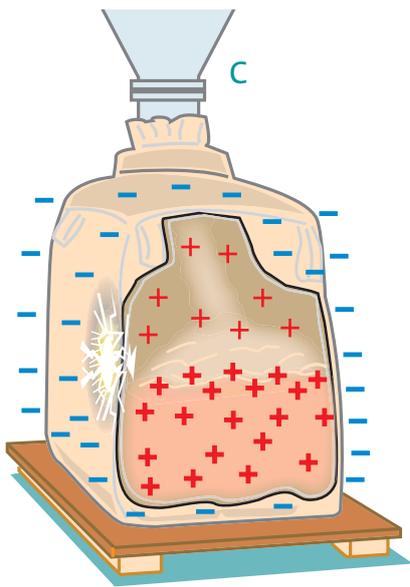
Tableau 1.9 Principales caractéristiques des décharges glissantes de surface.



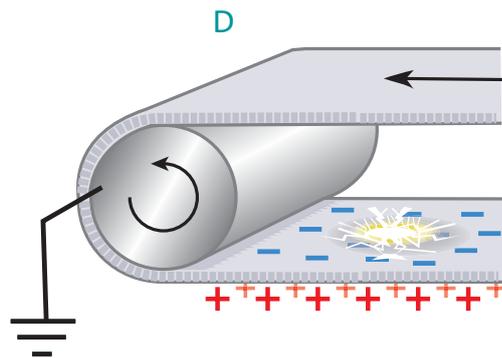
Dans une canalisation à revêtement intérieur isolant



Dans un séparateur de poussières à revêtement isolant



Dans un conteneur isolant pour produits en vrac



Sur une bande isolante à rotation rapide

Figure 1.26 Exemples de décharges glissantes de surface



Les situations industrielles les plus courantes qui peuvent donner lieu à des décharges glissantes de surface sont :

- ☀ le **transport pneumatique** à grande vitesse de poudres dans une conduite isolée ou une conduite à revêtement interne isolant ;
- ☀ le **remplissage de silos** en matériaux isolants.

Les décharges de surface sont extrêmement énergétiques et peuvent laisser des traces couvrant une partie importante de la surface de l'isolant.

Les principales caractéristiques de ce type de décharge sont résumées dans le tableau 1.10.

#### 1.4.4.5. Décharge de cône

Ces décharges se produisent entre un milieu pulvérulent et les parois d'un silo. Elles se produisent en général durant le remplissage des silos ou celui des conteneurs de grandes dimensions et se propagent à partir des parois du silo vers le sommet du cône qui se constitue au fur et à mesure du remplissage.

Ce type de décharge est la conséquence de la charge électrostatique accumulée par les produits pulvérulents au cours de leur transport vers le silo. Les décharges se produisent sur la surface du cône formé pendant le remplissage et ne mettent en jeu que la charge électrostatique des pulvérulents qui entrent dans le silo.

Les principales caractéristiques de ce type de décharge sont résumées dans le tableau 1.10 ci-dessous.

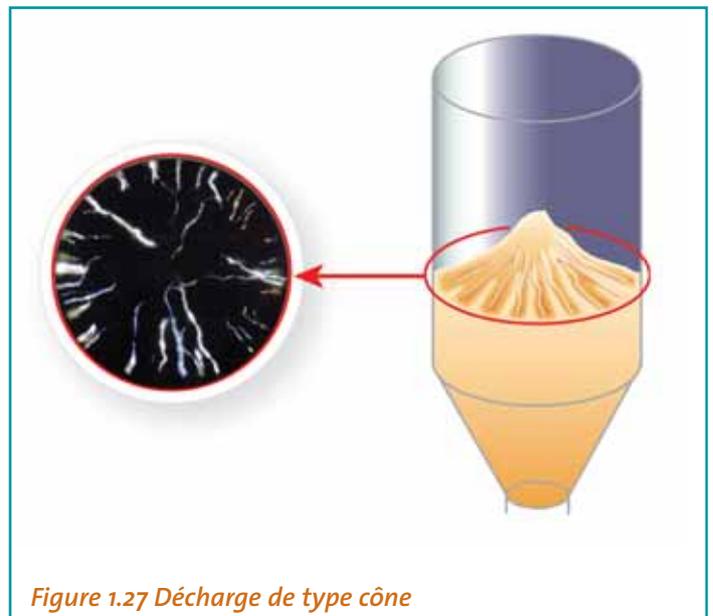


Figure 1.27 Décharge de type cône

#### 1.4.4.6. Décharge type "foudre"

Ces décharges se produisent à l'intérieur d'un nuage de poussières lorsque l'intensité du champ dû aux particules chargées est assez importante. De telles décharges ont été observées par exemple dans un large nuage de cendres lors d'une éruption volcanique mais jamais dans un nuage de poussières industriel.

<b>Conditions de décharges</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poudre de résistivité élevée.</li> <li>• Débit de remplissage élevé.</li> <li>• La présence dans le pulvérulent de produits de forte granulométrie (supérieure à 100 µm) amplifie le phénomène.</li> </ul>
<b>Situations industrielles</b>	Elle se produit lors du remplissage de silos ou de conteneurs de grandes dimensions.
<b>Énergie et caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elle a été mise en évidence par des industriels allemands et suisses.</li> <li>• L'énergie libérée pendant la décharge dépend de la taille des particules et de la dimension du conteneur (ordre de grandeur : quelques mJ à quelques dizaines de mJ).</li> </ul>

Tableau 1.10 Principales caractéristiques des décharges de cône

## 1.5. Atmosphères explosibles



Photo 1.6 Explosion de poussières de farine  
(Source INÉRIIS)

### 1.5.1. Mécanismes

L'inflammation d'une atmosphère contenant des gaz, des vapeurs, des aérosols liquides ou des poussières combustibles se produit :

- ⚡ lorsqu'ils sont mélangés à de l'air, de l'oxygène ou un gaz comburant en proportion convenable ;
- ⚡ lorsqu'un apport d'énergie suffisant ou l'élévation à une température donnée permet d'amorcer la réaction de combustion.

L'explosion est une combustion extrêmement rapide qui se caractérise par une élévation brutale de température et/ou de pression.

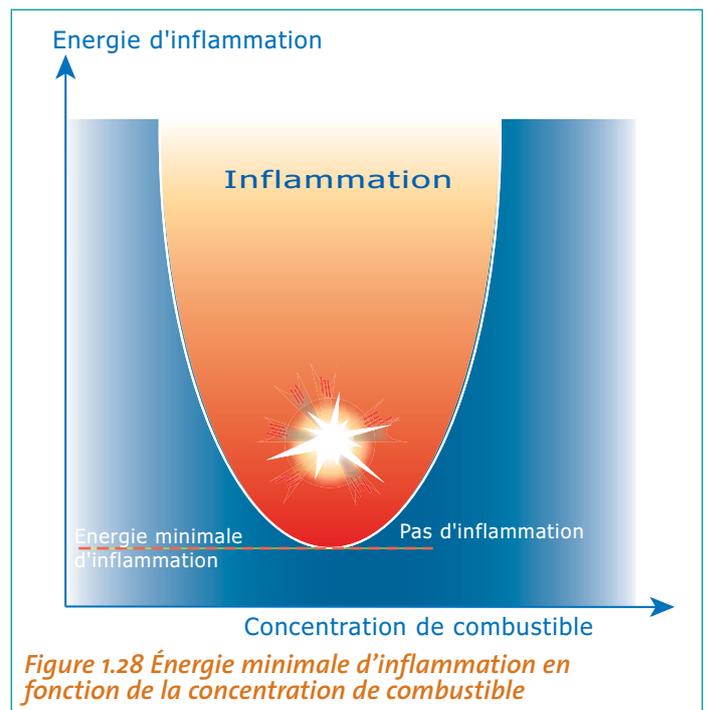
Dans le cas des pulvérulents, il faut en outre que les poussières soient en suspension pour assurer une grande surface de contact avec l'air et que leur concentration soit suffisante.

### 1.5.2. Énergie minimale d'inflammation

L'énergie minimale d'inflammation (EMI) d'un produit inflammable est définie comme la plus faible valeur d'énergie stockée dans un circuit électrique qui, en se déchargeant sous forme d'une étincelle, permet d'enflammer le mélange le plus sensible de ce produit dans l'air.

Pour la caractérisation de la sensibilité des atmosphères explosibles aux décharges d'origine électrostatique, l'étincelle est produite à partir d'un condensateur.

L'EMI est généralement déterminée à température ambiante et à pression atmosphérique.



#### 1.5.2.1. Cas des gaz et des vapeurs

Les résultats publiés par les organismes travaillant dans ce domaine sont cohérents et, pour les gaz courants, facilement utilisables en pratique.

Un certain nombre de valeurs peuvent être extraites des sources bibliographiques (Tableau 1.11)

En ce qui concerne les produits pour lesquels il n'existerait pas de données d'EMI, il est possible en première approche de leur attribuer l'EMI du gaz de référence du sous-groupe auquel ils appartiennent dans le cadre de la normalisation relative aux matériels électriques utilisables en atmosphères explosibles.

Il s'agit, par ordre d'EMI décroissante, du propane pour le sous-groupe II-A, de l'éthylène pour le sous-groupe II-B et de l'hydrogène pour le sous-groupe II-C (voir tableau 1.12 extrait de la publication CEI 60079-12).



Énergie (mJ)	Produit	Référence
0,017	Hydrogène	INRS
0,017	Acétylène	INRS
0,07	Éthylène	INRS
0,14	Méthanol	Haase (H.)
0,2	Benzène	Haase (H.)
0,30	Méthane	INRS
0,25	Propane	Haase (H.)
0,53	Méthyléthylcétone	Haase (H.)
1,15	Acétone	INRS

Tableau 1.11 Valeurs d'EMI de quelques produits

Sous-groupe II-A	
Méthane	Acétone
Propane	Méthyléthylcétone
Butane	Formaldéhyde
Hexane	
Benzène	Acétate d'éthyle
Toluène	Formiate d'éthyle
Xylène	Chlorure de méthyle
Styrène	Chlorure de vinyle
Méthanol	Oxyde de carbone
Éthanol	Ammoniac
	Diméthylamine
Sous-groupe II-B	
Éthylène	Éther éthylique
Butadiène	Oxyde d'éthylène
Acrylonitrile	Acrylate d'éthyle
	Acroléine
	Tétrahydrofurane
Sous-groupe II-C	
Hydrogène	
Sulfure de carbone	
Acétylène	

Tableau 1.12 Classement des gaz suivant publication CEI 60079-12 (extraits)

### 1.5.2.2. Cas des poussières

L'énergie minimale d'inflammation d'un pulvérulent est une grandeur qui ne caractérise pas de manière intrinsèque un produit car elle dépend de nombreux paramètres tels que :

- ☀ la granulométrie
- ☀ la surface spécifique
- ☀ la forme cristalline
- ☀ l'humidité relative du produit
- ☀ la méthode de mesure utilisée
- ☀ etc.

Contrairement aux gaz ou aux vapeurs de liquides inflammables, la détermination de l'EMI des poussières est de l'ordre de l'essai de routine. Comme exemple nous avons indiqué, sur la figure ci-dessous, le principe du dispositif d'essai utilisé dans une méthode couramment employée.

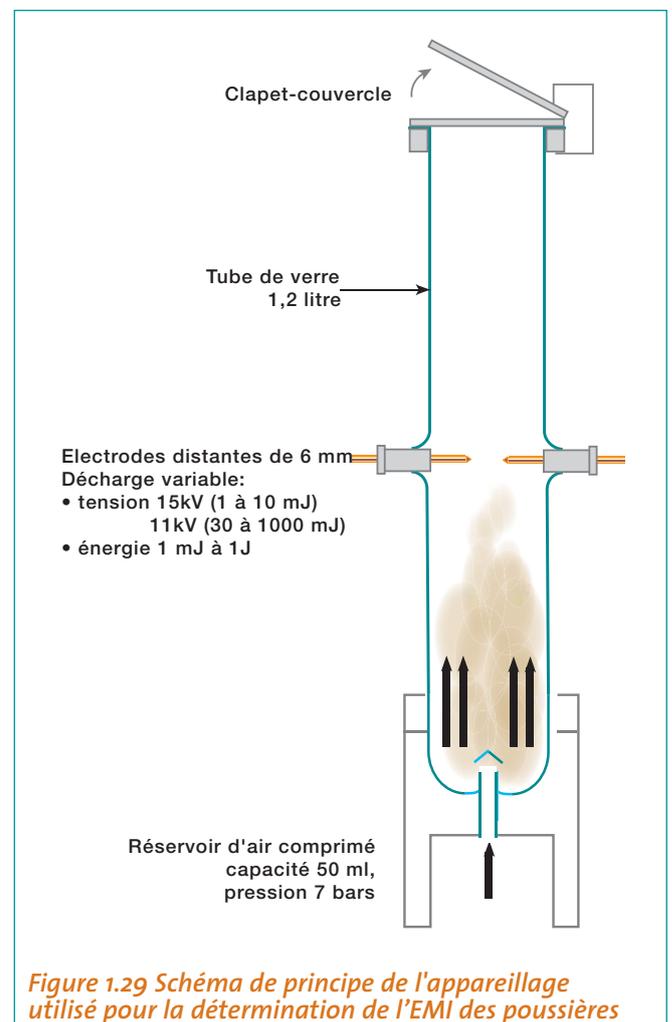


Figure 1.29 Schéma de principe de l'appareillage utilisé pour la détermination de l'EMI des poussières

Dans cet appareil, une étincelle électrique est produite entre deux électrodes situées au sein d'un nuage de poussières formé par un jet d'air. Le diagnostic d'inflammation est visuel. Pour une quantité de poussière donnée, on fait varier l'énergie mise en jeu et on déduit la valeur minimale au-dessous de laquelle l'inflammation ne se produit plus. On fait ensuite varier la quantité de poussière afin d'évaluer le minimum de l'énergie d'inflammation sur une large plage de concentrations.

Ces essais relativement simples et peu coûteux permettent de comparer les caractéristiques des produits entre eux.

Nous mentionnerons pour mémoire les travaux d'harmonisation des méthodes d'essais au niveau européen qui sont entrepris par le CEN-TC-305-WG1-SG2.

À titre indicatif, sont données dans le tableau 1.13 ci-dessous l'ordre de grandeur des énergies minimales d'inflammation (EMI) de certains produits pulvérulents.

Des valeurs utilisables en pratique ne peuvent être obtenues que par un essai sur le produit spécifique.

### 1.5.2.3. Atmosphères hybrides

Selon la norme EN 1127-1, un mélange hybride est un mélange avec l'air de substances inflammables dans des états physiques différents.

Ces mélanges sont constitués de gaz et de pulvérulents ou de gaz et d'aérosols liquides.

Des cas classiques d'atmosphères hybrides sont le mélange de méthane et de poussière de charbon avec l'air et le mélange de vapeur d'essence et de gouttelettes d'essence avec l'air.

Ce type d'atmosphère peut présenter des risques d'inflammation plus importants que ceux de chacun des constituants pris séparément, par exemple :

- ☀ des mélanges hybrides pulvérulents-gaz, pour lesquels la concentration en gaz est au-dessous de la limite inférieure d'explosibilité (LIE) peuvent être inflammables. Dans ce cas, l'énergie nécessaire pour enflammer cette atmosphère est inférieure à celle du pulvérulent considéré séparément ;
- ☀ un aérosol liquide peut former une atmosphère explosible même pour des températures inférieures au point éclair.

Poudre	Diamètre médian des particules (mm)	EMI (mJ)	Source - Référence produit
ABS	135	100-300	BIA - Stoft Nr.2986
ABS	35	10-30	BIA - Stoft Nr.2825
Aluminium	<10	<1	BIA - Stoft Nr.2887
Aluminium	28	30-300	BIA - Stoft Nr.2889
Aspirine	39	<10	BIA - Stoft Nr.1329
Caoutchouc	38	1000-3000	BIA - Stoft Nr.2614
Farine	110	300-1000	BIA - Stoft Nr.2999
Polyester	<10	5-10	BIA - Stoft Nr.3360
PVC	<10	>1000	BIA - Stoft Nr.2983
Sucre	34	10-30	BIA - Stoft Nr.5480

Tableau 1.13 Exemple de valeurs d'EMI de poussières

# Accidents d'origine électrostatique

*Cette partie a pour objet de présenter quelques accidents ayant pour origine des phénomènes électrostatiques. La liste ci-après a été établie par un comité d'experts qui a retenu les accidents représentatifs dont l'origine électrostatique paraissait la plus probable.*

## 2.1 Exemples d'accidents

Pour effectuer cet inventaire, le Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (Barpi) a été consulté.

Le Barpi gère la base de données ARIA. Cette base de données recense, à fin 1998, 15 000 accidents environ.

D'autres sources françaises ont été exploitées comme celles de l'INRS (base Epicea).

Des bases de données étrangères (Grande-Bretagne) ont aussi été consultées, notamment celle de l'ICChemE (Institution of Chemical Engineers) et la base (MHI-DAS) du Health and Safety Executive (HSE).

## 2.2 Principales causes d'accidents

Il est possible d'extraire des exemples cités dans les tableaux pages suivantes les principaux facteurs d'accidents d'origine électrostatique :

- ☀ les opérations de transfert de liquides pétroliers (dépotage, transvasement d'un réservoir à un autre, etc.)
- ☀ les opérations de nettoyage de citernes et l'utilisation mal appropriée de dispositifs d'extinction
- ☀ les déversements de poudres dans une atmosphère explosible (gaz ou vapeurs de liquides inflammables)
- ☀ les phénomènes disruptifs dus à la personne humaine électriquement chargée (car isolée de la terre)
- ☀ l'utilisation de solvant, notamment du toluène, dans des installations présentant des parties métalliques isolées ou des surfaces isolantes

☀ l'utilisation de canalisations non adaptées pour le transport pneumatique ;

☀ les absences d'équipotentialité entre matériels.

Ces accidents ont été à l'origine de :

- ☀ décès
- ☀ blessés, souvent graves, et en particulier des brûlés
- ☀ dégâts matériels souvent importants, voire considérables dans les cas, par exemple, d'extension d'incendie à des installations avoisinantes.



Tableau 2.1 Principaux accidents dans lesquels l'électrostatique est en cause

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1899	Royaume-Uni Poudres et explosifs	Explosion d'un stockage de 156 tonnes de chlorate de potassium. L'explosion se produit dans une zone où de la nitroglycérine et de la cordite sont mélangées à la main. Des dommages très importants sont causés aux usines voisines.	L'électrostatique a été considérée comme une cause possible de l'accident. En effet, un accident dû à l'électrostatique (inflammation d'acétone par décharge d'une personne humaine portant des chaussures en caoutchouc) avait eu lieu précédemment dans l'entreprise.
1947	Allemagne	Une explosion se produit lors de l'inertage au CO <sup>2</sup> (avant que l'action d'inertage soit effective) d'un réservoir de stockage de naphta. L'accident fait vingt-neuf morts.	Il a été considéré que la cause de l'inflammation de l'atmosphère explosible était due à une décharge d'origine électrostatique du fait des charges importantes générées lors de la formation du nuage de neige carbonique.
1951	Royaume-Uni Industrie pétrolière	Explosion du toit du réservoir de stockage de produits pétroliers suivi d'un incendie. Le réservoir était en cours de remplissage avec du gasoil contaminé avec de l'essence. L'incendie dure trente-huit heures et consume 7000 tonnes de produits pétroliers. L'accident fait deux morts et des dégâts matériels très importants.	L'électrostatique est évoquée comme cause possible de l'accident (décharge d'origine électrostatique entre une jauge métallique introduite dans le réservoir et le trou d'homme). Pour mémoire : <ul style="list-style-type: none"> <li>✶ il est légitime de supposer que le point éclair du liquide inflammable a été réduit par la présence d'essence ;</li> <li>✶ la présence d'impuretés dans un liquide favorise la création de charges électrostatiques.</li> </ul>
1954	Pays-Bas Industrie pétrolière États-Unis	Une explosion se produit lors d'une opération de mélange de produits pétroliers. Cette explosion est suivie, le lendemain, d'une seconde explosion lorsque l'opération est de nouveau essayée.	Il a été considéré qu'une cause très probable de l'accident est l'inflammation des vapeurs des produits utilisés par une décharge d'origine électrostatique du fait des charges générées lors du pompage. Cet accident est une des raisons qui pousseront l'industrie pétrolière à entreprendre des recherches d'envergure sur les risques dus à l'électricité statique [1.8.].
1955	États-Unis Industrie pétrolière	Une explosion se produit lors de l'inertage d'une citerne d'essence enterrée qui avait été laissée à l'abandon pendant vingt ans et devait être démontée. Pour l'inertage, il a été utilisé un extincteur pour injecter du dioxyde de carbone dans la citerne.	Il a été considéré qu'une cause très probable de l'accident est l'inflammation de vapeurs d'essence par une décharge d'électricité statique lorsque l'embouchure de l'extincteur est venue au contact de l'ouverture de remplissage du réservoir.

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
			Les risques dus aux phénomènes électrostatiques lors de l'injection de produits extincteurs sont bien connus.
1955	États-Unis Transport de produits pétroliers	Une explosion se produit dans un réservoir de déparaffinage d'une raffinerie. Les dégâts seront considérables. L'incendie se propagera à l'ensemble de la raffinerie et provoquera des explosions en chaîne.	Il a été considéré qu'une cause très probable de l'accident était l'inflammation d'une atmosphère explosible gazeuse par une décharge d'électricité statique due aux charges générées par le liquide lors de son introduction dans le réservoir.
1956	États-Unis Transport de produits pétroliers	Une explosion suivie d'un incendie se produit dans un navire de transport de produits pétroliers lors de son chargement. L'incendie se propagera à des bateaux adjacents et un pipeline sera coupé.	L'électrostatique est considérée comme la cause de l'accident.
1960	Suède Agroalimentaire	Explosions successives dans les silos en béton d'une sucrerie. Deux morts, un blessé et des dégâts matériels très importants.	L'électrostatique est évoquée comme cause possible de l'accident.
1961	États-Unis Aéronautique	Explosion lors de l'essai d'un propulseur fonctionnant à l'hydrogène.	L'électrostatique est évoquée comme cause possible de l'accident. À noter qu'il paraît fondé de faire cette hypothèse compte tenu de la : <ul style="list-style-type: none"> <li>✶ faible EMI de l'hydrogène ;</li> <li>✶ présence d'un aérosol liquide (H<sub>2</sub>) a priori électriquement chargé.</li> </ul>
1962	Lieu non précisé Transport de produits pétroliers	Une explosion suivie d'un incendie se déclare lors du remplissage d'un camion-citerne. L'accident fera un blessé.	L'électrostatique (charges électrostatiques générées par un débit de transvasement trop important) est considérée comme la cause à l'origine de l'accident.
1965	États-Unis Industrie chimique	Une explosion suivie d'un incendie se déclare lors d'une opération de remplissage (déversement en pluie) d'un réservoir de 1900 m <sup>3</sup> (500 000 gallons) de crésol (cresilic acid). Pour mémoire, le point éclair du crésol est de 20,5°C (69°F). La toiture et le tiers supérieur du réservoir furent gravement endommagés et la majeure partie du produit fut consommée.	L'inflammation serait due à une décharge d'origine électrostatique initiée par la montée en potentiel de la surface du liquide électriquement chargé par son mouvement ainsi que par les phénomènes accompagnant le déversement en pluie.



Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1969	Lieu non précisé (accident en mer)	En décembre 1969, trois "super tankers" ( <i>very large crude carriers</i> ) subissent des dommages importants suite à des explosions. Les explosions se produisent toutes dans la partie centrale du réservoir de stockage alors qu'une opération de nettoyage au jet haute pression était en cours.	Suite à ces accidents, un programme de recherche sur le risque électrostatique est entrepris. Ce programme de recherche, coordonné par la société Shell, est entrepris conjointement par le Koninklijke/ Shell Laboratorium Amsterdam (KSLA), le Thornton Research Centre et l'université de Southampton. Il se déroule de janvier 1970 à mai 1971 et comprend des essais in situ.
1970	Royaume-Uni Chimie	Une explosion se produit lors du remplissage d'un réacteur avec un produit pulvérulent (anthraquinone). Le produit était déversé dans une trémie reliée au réacteur par un tuyau en caoutchouc renforcé par un câble métallique. Le tuyau était muni à ses extrémités de tronçons en polypropylène, rompant la continuité électrique de ceux-ci, connectés à la trémie et au réacteur. L'accident fait un mort et quatre blessés.	L'accident suit le remplacement de la liaison métallique entre la trémie et le réacteur par le tuyau en caoutchouc. L'électrostatique est considérée comme la cause de l'accident.
1971	DOM (Guyane)	Le 5 novembre 1971, le lanceur Europa explose en vol moins de trois minutes après sa mise à feu.	Une recherche détaillée montre que les causes de l'accident sont dues à des phénomènes d'origine électrostatique.
1972	Pays-Bas Poudres et explosifs	Une explosion équivalente à 1500 kilogrammes de TNT se produit dans la partie séchage d'une usine de fabrication d'explosifs. L'accident fait deux morts, quinze blessés, détruit la totalité de l'usine et plusieurs milliers de vitres dans la ville voisine.	Il est considéré que l'explosion a été initiée par une décharge d'origine électrostatique d'un opérateur qui avait suivi des procédures de manutentions erronées.
1973	Norvège Poudres et explosifs	Une explosion se produit lors du remplissage d'un mélangeur avec de la poudre d'aluminium (particules lamellaires), du soufre et d'autres ingrédients. Le bâtiment de fabrication de prémélange est complètement détruit. L'explosion est suivie d'un violent incendie qui se propage aux bâtiments de stockage de matières premières. L'accident fait 5 morts et 4 blessés, dont 2 grièvement.	L'électrostatique (décharge glissante de surface) a été considérée comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident. L'EMI du produit a été mesurée comme étant de l'ordre de 1 mJ.

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1973	Lieu non précisé Chimie	Une violente explosion se produit dans une usine de fabrication de matières plastiques lors de l'introduction de poudre de dioxyde de silicium (silice) dans un réservoir contenant de la résine de polyester à haute température. L'accident fait un mort.	Le dioxyde de silicium était contenu dans des sacs en papiers eux-mêmes livrés dans des conteneurs plastiques. L'électrostatique a été considérée comme la cause à l'origine de l'accident. Postérieurement à l'expertise, il a été mis en évidence que les ouvriers avaient, à plusieurs occasions, ressenti des décharges électrostatiques sans en avoir mesuré la signification, ni en avoir informé leur encadrement.
1975	Japon Chimie	Explosion dans une tour de séchage (pulvérisation d'acide sulfurique dans un flux gazeux de chlore).	L'électrostatique est considérée par le Research Institute of Industrial Safety, Ministry of Labour, Tokyo comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident. Cette conclusion s'appuie sur des essais in situ réalisés sur une installation similaire.
1976	Lieu non précisé	Une explosion de poussières se produit au niveau d'une ligne de transfert reliant une trémie à un récipient métallique.	La goulotte métallique utilisée pour transférer la poudre de la trémie à la cuve (toutes deux métalliques) avait été remplacée par un tuyau en matière plastique. Bien que le tuyau soit conducteur, les extrémités en polypropylène utilisées pour sa connexion à la cuve ne l'étaient pas. Les charges d'origine électrostatiques formées lors du transfert de la poudre ne pouvant s'écouler à la terre, une étincelle s'est produite et a initié l'explosion de poussière.
1977	Royaume-Uni (lieu supposé) Industrie pétrolière	Lors d'une opération de transvasement d'un produit pétrolier d'un réservoir à un autre afin d'effectuer un mélange d'essences sans plomb, une explosion se produit. Les dommages matériels sont importants.	L'électrostatique (charges électrostatiques générées par un débit de transvasement trop important) est considérée comme la cause à l'origine de l'accident.
1979	Royaume-Uni Chimie	Une explosion mettant en cause de l'acétate de butyle se produit lors du remplissage de bidons de 23 litres à partir d'un stockage en vrac. L'accident fait un blessé.	L'électrostatique (défaut de mise à la terre de la tresse métallique du flexible utilisé) est considérée comme la cause à l'origine de l'accident. Une expertise interne montre que l'électrostatique a probablement initié l'explosion.



Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
	Royaume-Uni Chimie	Une explosion se déclenche lors du chargement d'un réacteur avec une poudre (acide oxalique) contenue dans des conteneurs en polypropylène tissé avec revêtement polyéthylène. Le réacteur aurait contenu au moment de l'opération un liquide inflammable à une température au-dessus de son point éclair. L'opérateur est brûlé aux bras, à la poitrine et à la tête.	Le mécanisme de production de charges électrostatiques a été identifié comme étant dû au versement de l'acide oxalique contenu dans le conteneur en matériaux composites. Après l'accident, l'acide oxalique ne sera plus versé directement dans le réacteur mais par l'intermédiaire d'un convoyeur à vis relié à la terre.
1979	Grèce Industrie pétrolière	Lors d'une opération de transvasement d'un produit pétrolier d'un réservoir à un autre, une explosion se produit.	L'électrostatique (charges électrostatiques générées par un débit de transvasement trop important) est considérée comme la cause à l'origine de l'accident.
1980	Afrique du Sud Transport de produits inflammables	Une explosion se déclare lors du remplissage d'un camion-citerne avec du xylène. Le camion avait été laissé sans surveillance, avant l'opération de remplissage, alors que la température extérieure était très élevée. L'explosion est suivie d'un incendie et fait deux blessés.	L'électrostatique est considérée comme la cause à l'origine de l'accident. Cette conclusion s'appuie sur les faits suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>✶ l'opération de transvasement était réalisée au moyen d'un tuyau flexible en polypropylène muni d'une spirale métallique reliée à son extrémité au filtre ;</li> <li>✶ la spirale métallique et le filtre n'étaient a priori pas reliés à la terre.</li> </ul>
1980	France (69) Pharmacie	Explosion suivie d'un incendie lors du versement d'une poudre (acide acétylcholinique) dans un réacteur contenant une vapeur inflammable (méthyléthylcétone). Cinq blessés dont deux gravement brûlés.	L'électrostatique semble être à l'origine de l'accident compte tenu : <ul style="list-style-type: none"> <li>✶ que le déversement d'une poudre est un processus générant des charges électrostatiques ;</li> <li>✶ de la présence d'une atmosphère explosive gazeuse de faible EMI.</li> </ul> Des accidents de ce type sont souvent présentés comme cas d'école dans la littérature.
1981	Royaume-Uni Transport de produits inflammables	Une explosion se déclare lors du remplissage d'un camion-citerne de 36 000 litres. L'accident fait un blessé.	L'électrostatique (charges électrostatiques générées par un débit de remplissage trop important) est considérée comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident.

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1981	Irlande Industrie pétrolière	Une explosion se produit dans un réservoir contenant de l'essence lors de la prise d'un échantillon par un opérateur. L'accident fait un mort.	L'électrostatique est considérée comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident. La source de l'inflammation serait une étincelle entre la sonde constituée d'un récipient métallique suspendu au bout d'une corde en polypropylène et la paroi du réacteur.
1981	Royaume-Uni Chimie	Un incendie se déclare alors que de la poudre de polyéthylène est chargée dans des conteneurs en sortie d'un sécheur. L'enquête a mis en évidence la présence de vapeur d'hydrocarbures résiduelle. L'accident fait un blessé.	L'électrostatique (défaut de mise à la terre des conteneurs, en contradiction avec les procédures) est considérée comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident.
1982	Pays-Bas Poudres et explosifs	Explosion de 240 kg de propergol dans une usine de poudre, causant la mort de trois ouvriers.	L'électrostatique (étincelle provoquée par un employé chargé enflammant de la poussière d'explosif) est considérée par le TNO (Prins Maurits Laboratory) comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident.
1983	États-Unis Transport de produits pétroliers	Une explosion se produit dans un navire de transport de produits pétroliers (essence) lors de son chargement. Outre une personne grièvement brûlée, les dommages sont très importants (bateau coulé, terminal pétrolier endommagé).	L'expertise conclut que l'inflammation serait due à un phénomène d'origine électrostatique provoqué par un débit excessif de remplissage, le produit chargé ayant d'autre part une volatilité importante et une faible conductivité.
1986	France (76) Pharmacie	Explosion suivie d'un incendie lors du versement d'une poudre (chlorhydrate de cystéamine) dans un réacteur qui contenait une vapeur inflammable (méthanol). Quatre brûlés dont deux grièvement.	L'électrostatique semble être une cause probable de l'accident compte tenu : <ul style="list-style-type: none"> <li>☀ que le déversement d'une poudre est un processus générant des charges électrostatiques ;</li> <li>☀ de la présence d'une atmosphère explosive gazeuse de faible EMI.</li> </ul> Des accidents de ce type sont souvent présentés comme cas d'école dans la littérature.



Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1988	France (60) Chimie	Trois explosions de pulvérulents (matières plastiques), consécutives (espacées de quelques jours), provoquent des dommages matériels très importants dans un ensemble constitué de plusieurs silos et d'une installation de transport pneumatique.	L'utilisation de canalisations non adaptées au risque (atmosphère explosive poussière) pour faire du transport pneumatique a été considérée comme cause de l'accident (décharge glissante de surface).
1988	États-Unis Transport de produits pétroliers	Une explosion se produit dans un navire de transport de produits pétroliers lors du déchargement de 40 000 tonnes de fuel-oil. L'expertise conclut à la présence d'une atmosphère explosive due à la contamination du chargement par des produits ayant été transportés antérieurement (produits pétroliers plus volatiles).	L'expertise conclut que l'inflammation serait due à un phénomène d'origine électrostatique provoqué par une fuite de vapeur et par une sonde de température non reliée à la terre.
1988	Finlande Industrie pétrolière	Un incendie se produit dans un réservoir de 25 000 m <sup>3</sup> d'isohexane. Après son extinction, l'incendie se déclare de nouveau une heure plus tard, lorsque de la mousse est injectée.	Les risques dus aux phénomènes électrostatiques lors de l'injection de produits extincteurs sont bien connus.
1989	France Fabrication de bouchons	Une double explosion se produit dans une usine de bouchons. L'accident se produit lors de l'opération de colmatage qui consiste à mélanger des bouchons de liège (préalablement conditionnés dans des sacs plastiques) à de la colle polyuréthane (de l'essence C constituant le solvant) et à de la sciure de liège. Il a été considéré que la première explosion était une explosion de gaz (vapeurs de solvant) et que la seconde était une explosion de poussière (sciure de liège). L'accident fait deux blessés (brûlés au thorax).	Il a été considéré que la première explosion, qui a elle-même déclenché la seconde explosion, était d'origine électrostatique. Les mécanismes disruptifs pourraient être provoqués soit par les opérateurs qui auraient été électriquement chargés, soit par l'opération de déversement des bouchons à partir de leur emballage (sac plastique).
1989	France Encollage	Une explosion se déclare au niveau d'une chaîne d'encollage automatique suivie d'un incendie qui se propage à l'ensemble de l'installation et à un fût de colle néoprène et à un stockage de mousse polyuréthane. Une fumée toxique est émise qui entraîne l'intoxication de deux salariés.	La cause retenue comme source de l'accident est celle d'une étincelle d'origine électrostatique au niveau d'un convoyeur.

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1990	France Chimie	Une explosion se produit lors du déversement de 60 kg de pulvérisant (diphénylcyclopropyl carbonitrile brut) dans un réacteur contenant 450 litres de méthanol. L'accident fait deux brûlés.	L'électrostatique semble être une cause probable de l'accident compte tenu : <ul style="list-style-type: none"> <li>que le déversement d'une poudre est un processus générant des charges électrostatiques ;</li> <li>de la présence d'une atmosphère explosive gazeuse de faible EMI.</li> </ul> Des accidents de ce type sont souvent présentés comme cas d'école dans la littérature.
1990	France Poudres et explosifs	Dans une usine de fabrication de pots fumigènes, une explosion se produit lorsqu'une opératrice se saisit d'un pot défectueux. L'opératrice a la main gauche arrachée.	L'électrostatique est la cause probable de l'accident, l'opératrice ayant ressenti une décharge d'origine électrostatique, juste avant l'explosion, lorsqu'elle a saisi le pot fumigène.
1991	France (49) Pharmacie	Un incendie se déclare lors de l'introduction d'heptane dans un bac filtrant. La majeure partie de l'atelier est détruite.	L'analyse après accident a mis en évidence un problème de mise à la terre défectueuse (pince démontée au moment des travaux) : <ul style="list-style-type: none"> <li>mécanisme d'accumulation de charges rendu possible par la présence d'un collier de serrage électriquement isolé du reste de l'installation ;</li> <li>mécanisme de décharge disruptive du type étincelle entre le collier et le tuyau d'écoulement.</li> </ul>
1992	France Fabrication de bouchons	Une explosion (boule de feu) se produit dans une usine de fabrication de bouchons. L'accident se produit lors de l'opération de chargement du cylindre de colmatage d'une machine avec des bouchons de liège préalablement conditionnés dans des sacs plastiques. L'accident fait deux blessés (brûlés légers).	Il a été considéré que l'explosion était d'origine électrostatique (sac en polypropylène électriquement chargé ayant provoqué l'inflammation de vapeurs de solvants).
1993	Royaume-Uni Industrie pétrolière	Une explosion se déclare alors que le conducteur d'un camion-citerne est en train de mener à bien l'opération de remplissage. Le conducteur est brûlé à la tête et aux jambes.	L'électrostatique (décharge du corps du conducteur qui ne portait pas de chaussures antistatiques) est considérée par le HSE comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident.



Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1993	France Fabrication de peintures	Un incendie se déclare dans une entreprise de fabrication de peintures lors du nettoyage d'une tête d'injection sur une chaîne de conditionnement. Le dispositif pour le nettoyage utilise du toluène qui est récupéré dans un bac et est recyclé par pompage. L'accident fait un blessé, brûlé au bras gauche et au cou.	L'électrostatique est considérée comme la cause à l'origine de l'accident. En effet, les récipients métalliques, en particulier celui placé sous la tête d'injection, n'avaient pas été reliés à la terre.
1993	France (21) Industrie pétrolière	Dans un dépôt pétrolier, un flash se produit au cours du chargement en pluie de fuel dans une citerne routière mal positionnée sur l'aire d'emportage et ayant précédemment contenu de l'essence. Il n'y a pas d'incendie. L'opérateur, brûlé au visage, aux bras, à la poitrine, et projeté sur les installations de comptage est évacué par le Samu.	Les vapeurs d'hydrocarbures auraient été allumées par une décharge d'origine électrostatique, engendrée par des gouttelettes dues au mode de chargement.
1993	France (69) Pharmacie	Dans une usine de substances pharmaceutiques, une explosion se déclenche lors du chargement d'une trémie avec une poudre organique contenue dans des fûts en carton avec sachet en polyéthylène. Elle initie une seconde explosion du nuage de poussières projeté dans l'atelier et dans les locaux voisins via les faux plafonds. L'opérateur est brûlé au deuxième degré.	Une expertise interne montre que l'électrostatique a probablement initié l'explosion. Cette conclusion s'appuie sur le fait : <ul style="list-style-type: none"> <li>✶ que le déversement d'une poudre, en particulier d'une poudre résistive (<math>\rho=10^{13} \Omega.m</math>) est un processus générant des charges électrostatiques ;</li> <li>✶ que l'atmosphère explosive était très sensible aux décharges d'origine électrostatique (EMI inférieure à 1 mJ).</li> </ul>
1994	États-Unis Transport de produits inflammables	Une explosion se produit à l'intérieur d'une barge utilisée pour le transport maritime du toluène. Cette explosion est suivie d'un incendie et fait quatre blessés.	La cause de l'inflammation des vapeurs explosives serait due à une absence de mise à la terre du tuyau flexible utilisé pour le nettoyage de la citerne.

Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1995	Allemagne Chimie	Une explosion se déclare dans une usine de fabrication de colorants. Cet accident se déclare lors du chargement dans un mélangeur d'une poudre (naphtol) provenant d'un conteneur métallique. Deux ouvriers sont blessés dont un assez gravement.	<p>L'électrostatique semble être une cause probable de l'accident compte tenu :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ que le déversement d'une poudre est un processus générant des charges électrostatiques et que l'écoulement était particulièrement rapide ;</li> <li>✦ l'analyse après accident a mis en évidence un problème de mise à la terre défectueuse (interruption de la mise à la terre du conteneur lors de son appui sur le mélangeur).</li> </ul>
1997	France (60) Chimie	Une explosion suivie d'un début d'incendie se produit lors du nettoyage d'un conteneur en polyéthylène. Le nettoyage était réalisé à l'aide d'une pompe à membrane pulvérisant du toluène en circuit fermé.	<p>L'électrostatique a été considérée comme la cause la plus probable à l'origine de l'accident.</p> <p>En effet, le système de nettoyage par recirculation et pulvérisation du toluène génère, par son principe même, des charges électrostatiques en quantité importante.</p> <p>D'autre part, l'utilisation de containers en matériau isolant augmente le risque de manière importante étant donné qu'il :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✦ présente en lui-même le risque de décharge en aigrette (brush discharge) ;</li> <li>✦ ne permet pas l'écoulement à la terre des charges générées dans le liquide, augmentant ainsi le niveau de charges accumulées en surface du liquide ou transférées aux parois isolantes ;</li> <li>✦ isole électriquement des éléments métalliques (vanne de vidange) qui peuvent collecter des charges électriques et provoquer une étincelle.</li> </ul> <p>Un accident de ce type a été présenté comme cas d'école dans la littérature.</p>



Année	Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
1997	France (71) Chimie	<p>Dans une fabrique d'additifs chimiques pour le béton d'une superficie totale de 4800 m<sup>2</sup>, un solvant [mélange de white-spirit et de méthyléthylcétone (MEC)] s'enflamme au cours du remplissage de bidons de 30 litres par gravité.</p> <p>L'incendie se propage sur une superficie de 1500 m<sup>2</sup>.</p> <p>Un employé, légèrement intoxiqué, est hospitalisé. Un périmètre de sécurité de 1,5 km de rayon est mis en place et une dizaine d'habitations sont évacuées.</p>	<p>Une expertise attribue l'accident à une décharge d'origine électrostatique générée par l'opérateur ; en effet, ce dernier avait constaté des décharges sans conséquences avant l'accident.</p>
1997	France (67) Industrie pétrolière	<p>Dans une raffinerie, une explosion avec formation d'une boule de feu survient au poste de chargement des citernes routières en gasoil.</p> <p>Cet accident est suivi d'un incendie que les pompiers mettront quinze minutes à éteindre.</p> <p>Le chauffeur routier est tué, deux personnes sont blessées, le véhicule et l'installation sont fortement endommagés.</p>	<p>Les vapeurs d'hydrocarbures auraient pu être allumées par une décharge d'origine électrostatique, engendrée par des gouttelettes dues au mode de chargement (chargement en pluie).</p>

*Ce chapitre traite de l'ensemble des mesures pour améliorer la sécurité des biens et des personnes. Il comprend le rappel des aspects réglementaires et le détail des mesures générales de prévention et de protection.*

## 3.1. Réglementation

### 3.1.1. Introduction

Nous traiterons ici de la réglementation concernant les aspects explosion-incendie ainsi que de la réglementation particulière à l'électrostatique. Nous avons rappelé en annexe 3, dans la bibliographie, les principaux textes.

### 3.1.2. Législation européenne

Trois directives traitent aujourd'hui des problèmes de prévention et de protection des explosions d'atmosphères explosives :

#### 3.1.2.1. Directive machines (98/37/CE)

En 1989, le Conseil de l'Europe a adopté la directive 89/382/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux machines (dite directive machines) qui a été remplacée depuis par la directive 98/37/CE.

Ce texte, dans son annexe 1, en plus de la prévention des risques traditionnels associés aux parties mécaniques en mouvement, demande que les **machines** soient construites de manière à prévenir tous risques d'incendie et d'explosion présentés par la machine elle-même ou par des substances produites ou utilisées par celles-ci.

Le paragraphe 1.5.2. de l'annexe I de cette directive traite spécifiquement de l'électricité statique.

Il spécifie que *"la machine doit être conçue et construite pour éviter ou restreindre l'apparition de charges électrostatiques pouvant être dangereuses, et/ou être munie des moyens permettant de les écouler"*.

Cette exigence est à rapprocher de celles du paragraphe 1.5.7 relatif aux risques d'explosion, à savoir :

*"La machine doit être conçue et construite pour éviter tout risque d'explosion provoqué par la machine elle-même ou par les gaz, liquides, poussières, vapeurs et autres substances produites ou utilisées par la machine."*

*Pour ce faire, le fabricant prendra des mesures pour :*

- ✶ éviter une concentration dangereuse des produits
- ✶ empêcher l'inflammation de l'atmosphère explosible
- ✶ minimiser l'explosion si elle se produit, pour qu'elle n'ait pas d'effets dangereux sur le milieu environnant.

*Les mêmes précautions seront prises si le fabricant prévoit l'utilisation de la machine dans une atmosphère explosible.*

*Le matériel électrique faisant partie de ces machines doit être, en ce qui concerne les risques d'explosion, conforme aux directives spécifiques en vigueur."*

#### 3.1.2.2. Directive 94/9/CE relative aux appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosives

Cette directive, adoptée en mars 1994, vise les *"appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosives"*.

Elle s'applique aussi bien aux matériels électriques que non électriques destinés à être utilisés dans tous les types d'atmosphère explosive, que cela soit des gaz, des vapeurs, des brouillards ou des poussières.

La directive spécifie les procédures d'évaluation de la conformité et indique les exigences essentielles de sécurité.

Cette directive a été transposée en droit français par le décret 96-1010 du 19 novembre 1996 relatif aux appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosives. L'application de cette directive est obligatoire à partir du 1<sup>er</sup> juillet 2003.

#### 3.1.2.3. Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999 "concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives"

Cette directive formule les objectifs à atteindre en matière de protection pour les dangers d'explosion liés à l'utilisation ou au mode d'installation des appareils.



La directive propose des définitions des zones délimitant des atmosphères explosives que ce soit au niveau des gaz, des vapeurs ou des brouillards qu'au niveau des poussières.

De plus, elle impose aux installations présentant des risques d'explosion la rédaction d'un document dans lequel devra s'inscrire une analyse des risques.

Cette directive a été transposée en droit français par les **décrets n°2002-1553 et 2002-1554 du 24 décembre 2002**, relatifs aux dispositions concernant la prévention des explosions applicables aux lieux de travail.

### 3.1.3. Législation française

#### 3.1.3.1. Législation des installations classées pour la protection de l'environnement

**Le titre V, livre 1<sup>er</sup> du Code de l'environnement**, qui a repris la loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, impose un certain nombre d'obligations aux exploitants d'usines, d'atelier, de dépôts ou d'autres établissements pouvant présenter des dangers ou des nuisances pour le voisinage ou l'environnement. Le classement d'une installation est déterminé par une nomenclature de substances ou d'activités établie par décret.

Selon la nature de l'activité, de la nature et des quantités de produits traités ou stockés, de la gravité des nuisances et des dangers qu'elle peut représenter, une installation est soumise, avant sa mise en service, soit à une simple déclaration, soit à une autorisation. Le permis de construire ne pourra pas être délivré avant obtention de l'autorisation d'exploiter ou du récépissé de déclaration.

#### *Procédure de déclaration*

Dans le cas des installations classées soumises à simple déclaration, l'exploitant remet au préfet un dossier de déclaration qui comprend des informations sur la nature et sur le volume des activités prévues ; des plans de situation, les conditions d'évacuation et d'épuration des eaux résiduaires et des émanations de toute nature, les conditions d'élimination des déchets et résidus de l'exploitation.

Le préfet délivre un récépissé de la déclaration (art. 27 du décret de 1977) auquel est jointe une copie des prescriptions générales spécifiques à chaque rubrique de la nomenclature applicable à l'installation. L'information du

public se fait par un affichage du récépissé pendant un mois à la mairie du lieu d'implantation de l'activité.

#### *Procédure d'autorisation*

Dans le cas des installations classées soumises à autorisation, l'industriel doit constituer un dossier de demande d'autorisation très complet comprenant en particulier deux parties essentielles : l'étude d'impact et l'étude des dangers qui sont complétées par une notice d'hygiène et de sécurité et par une note de synthèse non technique de l'étude d'impact.

Le dossier, établi sous la responsabilité de l'exploitant, est déposé à la préfecture du département et l'inspecteur des installations classées est consulté pour juger de sa conformité. Lorsque le dossier est recevable, le préfet prend un arrêté d'ouverture de l'enquête publique qui se déroulera durant un mois dans la commune d'implantation et dans les communes limitrophes situées dans le périmètre pour l'information publique dit périmètre d'affichage.

Ce dossier est également communiqué aux autres services de l'administration préfectorale intéressés par les problèmes de sécurité. Le commissaire enquêteur, désigné par le président du tribunal administratif, communique les observations recueillies lors de ces informations et de ses investigations personnelles ; le commissaire enquêteur rédige son rapport qu'il transmet avec l'ensemble du dossier au préfet. Les conseils municipaux des communes touchées par le rayon d'affichage et les services administratifs concernés sont appelés à donner leur avis.

L'inspecteur des installations classées, qui reçoit l'ensemble des observations sur le dossier, établit un rapport de synthèse et propose une décision fixant les conditions d'exploitation. Le rapport de synthèse et le projet d'arrêté de classement sont présentés conjointement au conseil départemental d'hygiène, sur l'avis duquel le préfet prend la décision finale.

En cas de différend entre la position prise par le préfet, l'exploitant ou le public, le tribunal administratif peut être saisi pour modifier la décision.

**L'arrêté du 31 mars 1980 du ministère de l'Environnement** relatif à la réglementation des installations électriques des établissements réglementés au titre de la législation sur les installations classées et susceptibles de présenter des risques d'explosion.

Cet arrêté réglemente les installations électriques de ces établissements et impose la délimitation de zones présentant des risques d'explosion.

Ces zones sont maintenant définies par l'arrêté du 8 juillet 2003 et par le code du travail (art.232-12, 23 à 29).

#### Pour les gaz vapeurs

**Zone 0** : emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillards est présente en permanence pendant de longues périodes ou fréquemment.

**Zone 1** : emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillards est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

**Zone 2** : emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillards n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou n'est que de courte durée, s'il advient qu'elle se présente néanmoins.

#### Pour les poussières

**Zone 20** : emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuages de poussières combustibles est présente dans l'air en permanence pendant de longues périodes ou fréquemment.

**Zone 21** : emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuages de poussières combustibles est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

**Zone 22** : emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuages de poussières combustibles n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou n'est que de courte durée, s'il advient qu'elle se présente néanmoins.

**L'arrêté du 29 juillet 1998 (modifié par l'arrêté du 15 juin 2000)** relatif aux silos et installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables. Cet arrêté régit les silos et les installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires et de tous autres produits organiques dégageant des poussières inflammables soumis à autorisation au titre de la rubrique 2160 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. L'arrêté prévoit :

- ✶ à l'article 13 (titre IV) que "les bandes de transporteurs, sangles d'élevateurs, canalisations pneumatiques, courroies, etc., doivent être difficilement propagateurs de la flamme et antistatiques" ;
- ✶ à l'article 17 (titre V) modifié par l'article 4 de l'arrêté du 15 juin 2000 les règles de mises à la terre et que

*"les silos doivent être efficacement protégés contre les risques liés aux effets de l'électricité statique, les courants vagabonds et la foudre" ;*

- ✶ à l'article 18 (titre V) que "les matériaux constituant les appareils en contact avec les produits doivent être conducteurs afin d'éviter toute accumulation de charges électrostatiques" et que "les bandes de transporteurs, sangles d'élevateurs, canalisations pneumatiques, courroies, etc. doivent avoir des conductivités suffisantes de manière à limiter l'accumulation de charges électrostatiques".

### 3.1.3.2. Législation du ministère du Travail

**Circulaire TR 22/49 du 15 novembre 1949** traite spécifiquement des principes à prendre en considération pour la prévention des dangers de l'électricité statique.

**Décret n°79-846 du 28 septembre 1979** relatif à la protection des travailleurs dans les établissements pyrotechniques traite à l'article 53 des précautions contre l'électricité statique.

**Décret n°2002-1553 du 24 décembre 2002** modifié relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions applicables aux lieux de travail et modifiant le chapitre II du titre III du livre II du code du travail.

**Décret n°2002-1554 du 24 décembre 2002** relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions que doivent observer les maîtres d'ouvrage lors de la construction des lieux de travail et modifiant le chapitre V du titre III du livre II du code du travail.

**Arrêté du 8 juillet 2003 complétant l'arrêté du 4 novembre 1993** relatifs à la signalisation de sécurité et de santé au travail.

**Arrêté du 8 juillet 2003** relatif à la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés à une atmosphère explosive.

**Arrêté du 28 juillet 2003** relatif aux conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter.

### 3.1.3.3. Législation du ministère de l'Industrie

**Arrêté du 4 septembre 1967 (modifié par les arrêtés des 12 septembre 1973 et 19 novembre 1975)** est relatif aux règles d'aménagement et d'exploitation des usines de traitement de pétrole brut, de ses dérivés et résidus. Le titre 6, 5<sup>e</sup> partie, chapitre D, traite du chargement des hydrocarbures, et définit les précautions à prendre contre les effets des courants de circulation et l'électricité statique.

**Décret n°96-1010 du 19 novembre 1996 modifié** relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosive.



## 3.2. Mesures générales de prévention et de protection

### 3.2.1. Organisation de la sécurité et de la prévention

#### 3.2.1.1. Acteurs de la sécurité

Les acteurs de la sécurité (exploitant, service spécifique du siège de la société, tiers expert, représentant de l'administration, etc.) sont multiples en termes d'incidence en matière de responsabilité. Ils sont également multiples en termes de domaine de compétences.

Il est donc important de désigner un coordinateur unique pour la prévention du risque électrostatique à l'intérieur d'un établissement.

#### 3.2.1.2. Intégration de la sécurité lors de la conception d'une installation

La meilleure façon de traiter le risque dû à l'électricité statique est de le faire au moment de la conception d'une installation.

En effet, l'incidence d'une modification est moindre, en termes de coût ou de complexité si elle se fait au moment de la conception de l'installation (prévention intégrée) plutôt qu'après travaux, lorsqu'elle nécessite le démontage et le remplacement d'une partie de l'installation. À ce titre, le choix des mesures de protection doit se faire à l'issue d'une démarche d'évaluation des risques et des coûts.

#### 3.2.1.3. Intégration de la sécurité dans le cas d'une installation en fonctionnement

La préoccupation de sécurité doit être permanente et doit suivre toutes les évolutions d'une installation. Les aspects de vieillissement des équipements doivent être mis en évidence lors de la réalisation des contrôles périodiques (voir chapitre 3.2.6).

#### 3.2.1.4. Formation

La formation du personnel est un point essentiel de la maîtrise du risque dû à l'électricité statique.

Elle peut être réalisée à plusieurs niveaux :

- ☛ sensibilisation aux risques dus à l'électricité statique (cette formation peut être courte, une demi-journée

par exemple, voire moins si elle est partie intégrante d'une formation générale, telle qu'une sensibilisation aux risques d'incendie et d'explosion) ;

- ☛ formation adaptée à une entreprise particulière (ce type de formation peut être réalisé in situ ; il est souhaitable qu'elle touche le maximum de personnes dans l'entreprise, quels que soient leurs niveaux de qualification ou leurs fonctions) ;
- ☛ formation approfondie (ce type de formation peut être réalisé sur plusieurs journées et peut comprendre des études de cas et des travaux pratiques).

#### 3.2.1.5. Contrôles et vérifications périodiques

Les contrôles et les vérifications périodiques des installations sont nécessaires au maintien d'un niveau constant et satisfaisant de maîtrise du risque dû aux dangers de l'électricité statique.

Il appartient au chef d'établissement de fixer la périodicité des contrôles dans les procédures internes à son entreprise, en ce qui concerne le risque électrostatique. Pour les autres types de risques électriques, il convient de se reporter à la réglementation en vigueur.

Ces contrôles et vérifications peuvent être effectués par un organisme extérieur agissant pour ordre du chef d'établissement.

À ce titre, il y a lieu notamment de vérifier :

- ☛ la pérennité des liaisons équipotentielles et des mises à la terre ;
- ☛ que des modifications sur les installations ou sur les procédés, qui pourraient sembler mineures, n'augmentent pas le risque.

### 3.2.2. Méthodologie d'analyse pour la prévention du risque d'incendie et d'explosion

Une inflammation ou une explosion due à l'électricité statique repose sur :

- ☛ la présence d'une atmosphère explosible

- ☀ l'enchaînement d'une suite de phénomènes qui sont :
  - la séparation (formation) de charges électrostatiques,
  - l'accumulation de charges électrostatiques,
  - le déclenchement d'une décharge disruptive
- ☀ des caractéristiques suffisantes de la décharge disruptive (notamment en termes d'énergie) pour enflammer l'atmosphère explosible.

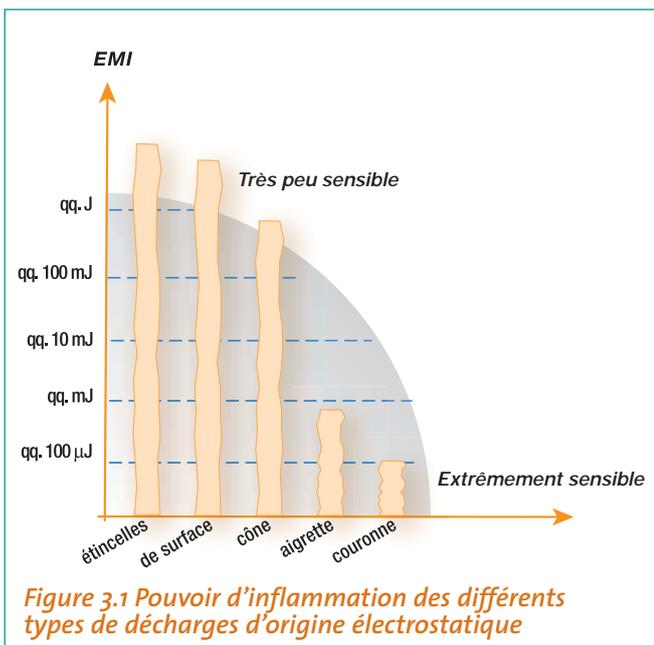


Figure 3.1 Pouvoir d'inflammation des différents types de décharges d'origine électrostatique

À partir de cette démarche logique, la méthode de travail utilisée devra posséder les caractéristiques suivantes :

- ☀ être adaptée aux différents cas de figures
- ☀ être suffisamment simple pour être utilisable en pratique.

Pour ce faire, les options suivantes seront prises :

- ☀ l'analyse commencera par une identification précise de l'atmosphère inflammable à la fois en termes de localisation géographique et de sensibilité à l'inflammation
- ☀ les décharges possibles seront identifiées en chaque point de l'installation où une atmosphère explosible est susceptible d'apparaître
- ☀ il sera considéré en première analyse que toute surface pouvant s'électrifier est susceptible d'être électrisée à sa valeur maximale
- ☀ l'énergie d'un type de décharge donné sera évaluée en première analyse à sa valeur maximale
- ☀ les phénomènes pouvant amener à la décharge d'origine électrostatique (séparation/production

de charges, accumulation de charges, variation de champ) ne seront pas examinés ni quantifiés en détail ; on se contentera d'une évaluation globale en termes de quantité de charges et de probabilité d'occurrence.

Cela amènera un travail en trois étapes tel qu'indiqué sur la figure 3.2 ci-après, à savoir :

- étape 1 :** identification de l'atmosphère explosible en termes de localisation, de probabilité d'occurrence et de sensibilité aux décharges d'origine électrostatique ;
- étape 2 :** identification des types de décharges pouvant se produire au vu des caractéristiques de l'installation et des produits manipulés. Évaluation du pouvoir d'inflammation de ces décharges sur la base de considérations globales et majorantes (figure 3.1 ci-contre). Cette analyse peut être éventuellement modulée du fait de considérations sur l'analyse des phénomènes de séparation (formation) et d'accumulation de charges ;
- étape 3 :** évaluation du risque par comparaison des éléments établis lors des étapes 1 et 2.

Ce travail sera suivi, bien entendu, de l'examen et du choix des mesures de prévention.

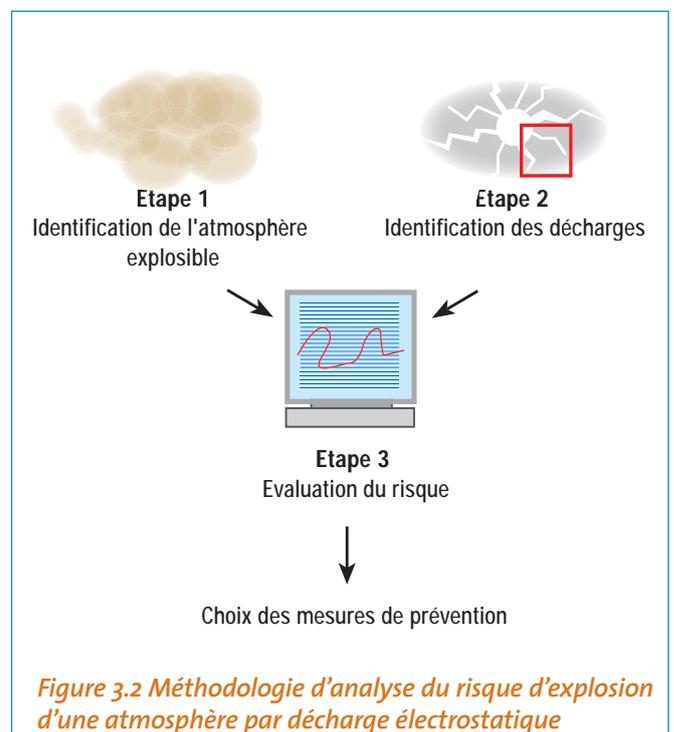


Figure 3.2 Méthodologie d'analyse du risque d'explosion d'une atmosphère par décharge électrostatique



### 3.2.3. Mesures de prévention destinées à supprimer ou à limiter l'atmosphère explosive

Dans le cadre de l'analyse de risques, il est important de réaliser aussi soigneusement que possible le classement en zones des installations notamment en prenant en compte toutes les opérations même celles qui sont effectuées de manière épisodique et en ne sous-estimant pas la zone où l'atmosphère explosive est susceptible de se former en fonctionnement normal.

Sur ce point, il est possible de s'appuyer sur les recommandations des organismes professionnels, comme celles de l'Union des Industries Chimiques (UIC).

D'autre part, il y a lieu de considérer que la première mesure de prévention consiste à limiter le plus possible la présence d'une atmosphère explosive. Pour cela, il y a lieu d'étudier particulièrement la ventilation, l'étanchéité

des récipients, les prises d'air des installations de transport pneumatique, etc. L'inertage des récipients peut être également un moyen d'élimination des atmosphères explosives (figure 3.3 ci-dessous).

### 3.2.4. Mesures de prévention destinées à éviter l'apparition de décharges disruptives

Les mesures qui suivent doivent être intégrées à une analyse de risque permettant d'identifier le ou les types de décharges et de déduire les mesures de prévention et de protection applicables.

Les mesures permettant d'éviter l'apparition de décharges disruptives figurent, de façon générale, pour chacun des types de décharges couramment rencontrées, dans le tableau 3.1 ci-après.

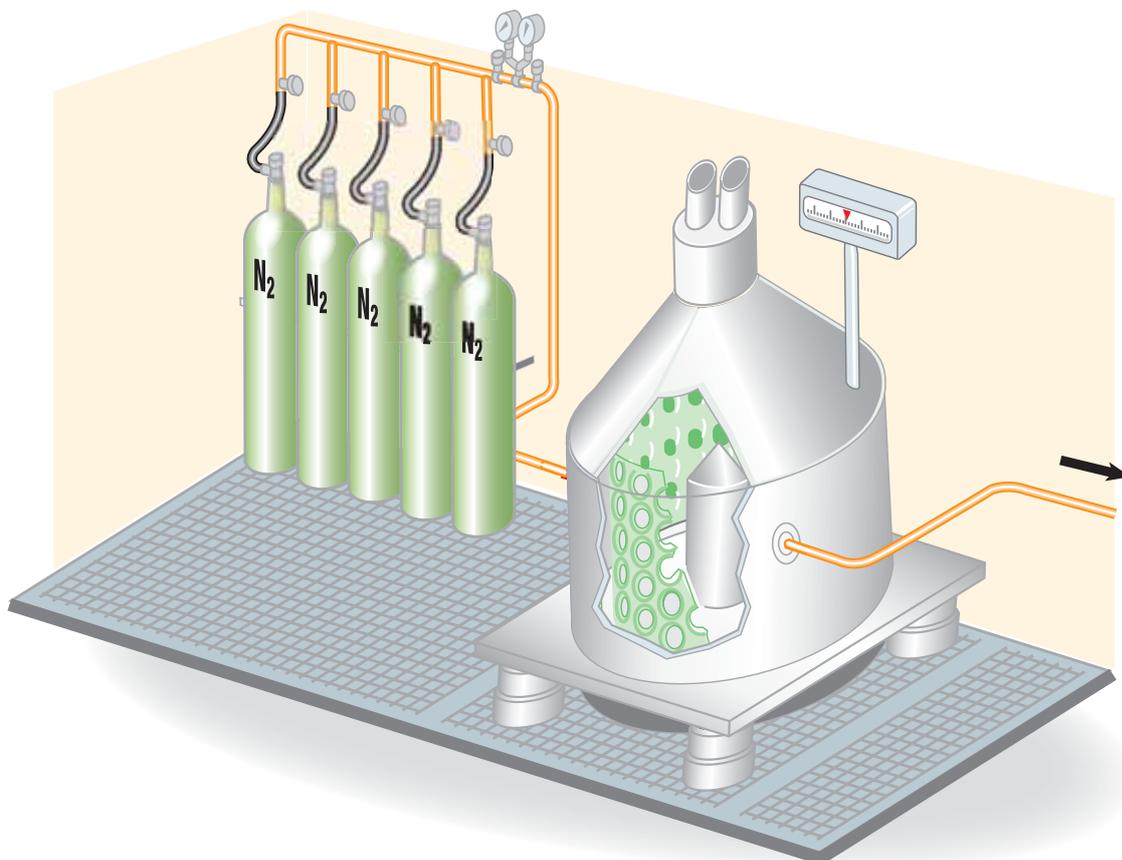


Figure 3.3 Exemple de mesure de prévention contre les explosions lors de la manipulation de suspensions et d'émulsions de liquides inflammables - Inertage à l'azote d'une centrifugeuse

Type de décharge considéré	Exemples de mesures destinées à éviter l'apparition de décharges d'origine électrostatique
Décharge étincelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ Réaliser l'équipotentialité et la mise à la terre des éléments conducteurs électriquement isolés</li> <li>⚡ Utiliser des chaussures permettant la dissipation des charges électrostatiques et vérifier que le sol des zones à risque d'explosion est suffisamment conducteur pour permettre la dissipation des charges électrostatiques</li> </ul>
Décharge en aigrette	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ Proscrire l'utilisation de matériaux isolants</li> <li>⚡ Utiliser des additifs antistatiques</li> <li>⚡ Limiter les vitesses</li> </ul>
Décharge glissante de surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ Utiliser des tuyaux, des conduits d'aspiration, etc., conducteurs</li> <li>⚡ Limiter l'utilisation des matériaux non homogènes, tels que les canalisations en matériaux composites (conducteurs/isolants), qui permettent l'accumulation considérable de charges électrostatiques par effet condensateur</li> <li>⚡ Ne pas utiliser de matériaux isolants ayant une tension de claquage supérieure à 4 kV</li> </ul>
Décharge de cône	Dans l'état actuel des connaissances, il n'y a pas de mesure pratique permettant d'éviter ce type de décharges.

Tableau 3.1 Exemples de mesures destinées à éviter l'apparition de décharges d'origine électrostatique

### 3.2.5. Mesures de prévention relatives à la production et à l'accumulation de charges

#### 3.2.5.1. Réduction des frottements

S'il est théoriquement impossible d'éviter la production de charges électriques par frottement lorsque deux corps de natures différentes entrent en contact et se séparent, il est parfois possible de prévenir en partie leur formation, soit en diminuant la pression exercée sur les corps en contact, soit en limitant au minimum les phénomènes de "glissement" entre ces corps.

Ces principes trouvent leur application immédiate dans tous les systèmes mécaniques entraînés par courroies ou lorsque la matière à transformer passe entre des rouleaux de guidage ou d'entraînement. C'est ainsi que, dans la fabrication du papier ou du carton, on peut diminuer la pression entre les rouleaux ou dépolir légèrement leur surface.

#### 3.2.5.2. Mise à la terre

La **figure 3.32** page suivante illustre le risque d'apparition d'une décharge par absence de mise à la terre des éléments conducteurs.

On peut distinguer deux possibilités de mise à la terre.

##### Mise à la terre de fait

Un élément conducteur ou dissipateur (appareil, machine, récipient, etc.) est dit **électrostatiquement** à la terre lorsque sa résistance de fuite ou d'écoulement des charges ne dépasse pas  $10^6$  ohms, sachant que cette résistance est mesurée entre la terre et n'importe quel point de l'élément considéré.

Pour une telle valeur, il ne semble pas qu'il y ait à craindre la formation de charges électriques importantes et l'on peut considérer que la mise à la terre est réalisée de fait.

##### Mise à la terre directe

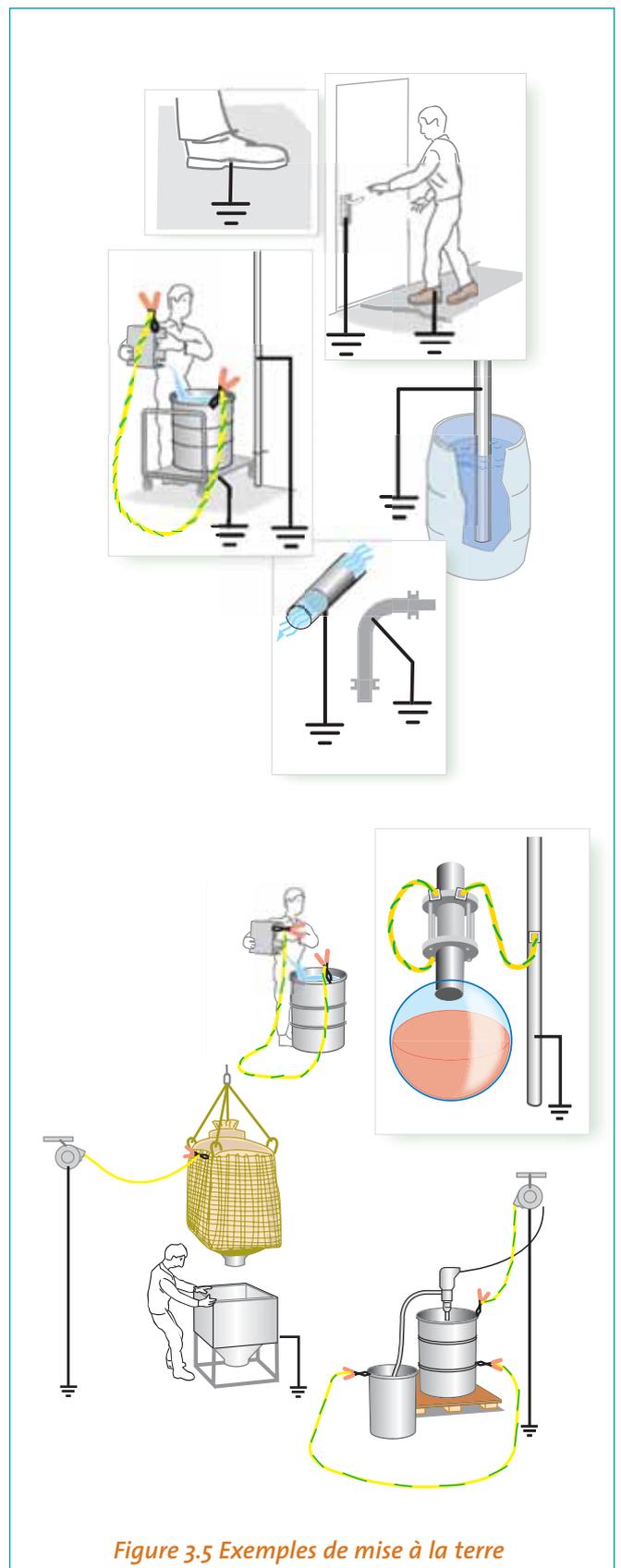
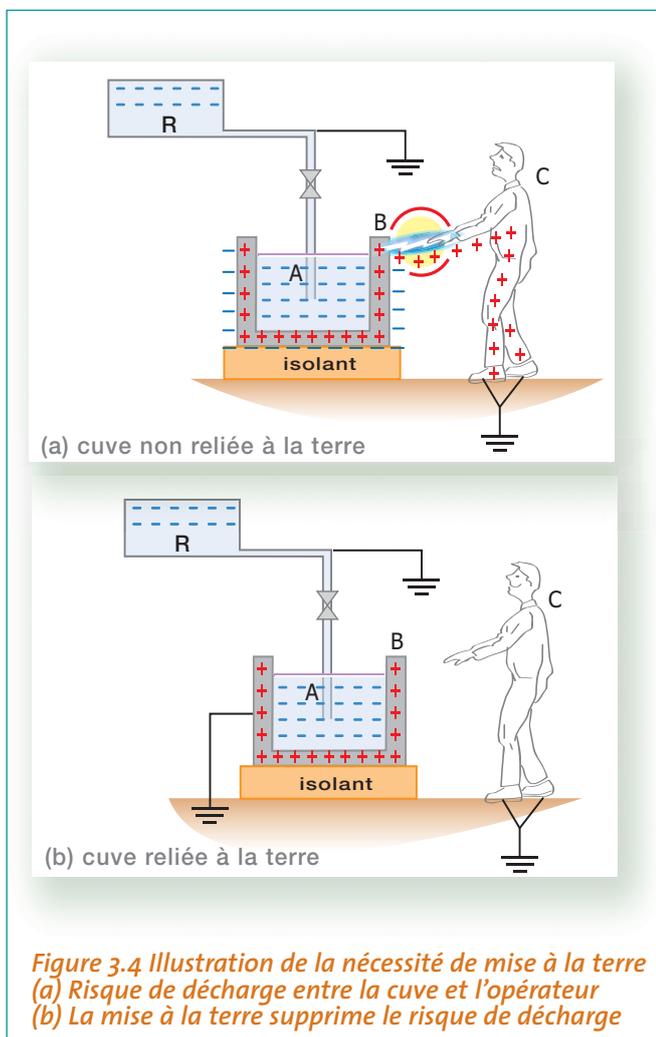
Lorsque la mise à la terre de fait n'existe pas ou que sa résistance est trop élevée (c'est-à-dire supérieure à  $10^6$  ohms), une mise à la terre directe doit être réalisée.



Pour cela, une liaison doit être assurée au moyen d'un conducteur métallique (tresse de cuivre, "câblette" de cuivre, câble électrique unipolaire de coloration vert et jaune, etc.) de résistance mécanique suffisante pour supporter les efforts auxquels il est soumis en cours d'exploitation. Elle doit être établie entre l'élément considéré et le circuit d'équipotentialité général de mise à la terre de l'établissement (prise de terre, charpente métallique, conducteur principal de protection, etc.).

Si cet élément est par exemple le bâti d'une machine, le conducteur métallique sera fixé par soudure, par brasure ou par raccord vissé et bloqué.

La continuité avec la terre sera vérifiée lors de la mise en service et des vérifications périodiques permettront de s'assurer qu'elle n'est pas compromise par la corrosion ou par une cause mécanique.



*Figure 3.5 Exemples de mise à la terre*



Photo 3.1 Industrie chimique - Mise à la terre d'un "big bag" contenant des produits pulvérisants.

### 3.2.5.3. Augmentation de la conductivité des corps isolants

La conductivité du cuir, du carton, du caoutchouc, des textiles ou matières similaires, des plastiques, des liquides, peut être augmentée dans la masse ou superficiellement par addition ou application de produits dits "antistatiques".

Certains polyols, des composés organiques soufrés tels que les sulfonates, azotés tels que les amines, les sels d'ammonium quaternaires, les amides, etc., ainsi que certains dérivés de l'acide phosphorique et de l'acide phosphoreux, qui sont tous des produits à conduction ionique, augmentent la conductibilité du corps traité en liaison avec l'eau absorbée. À l'inverse, les métaux, le noir de fumée, le graphite, agissent par conduction électronique et leur efficacité est indépendante du degré hygrométrique de l'atmosphère ambiante.

Certains produits, appliqués en général sous forme d'aérosol, ont une durée de vie limitée et l'application doit être renouvelée à intervalles réguliers.

### 3.2.5.4. Humidification de l'atmosphère

Une humidité relative de l'air voisine de 70 % empêche souvent les charges électrostatiques de prendre naissance.

Cette propriété est due à la très mince pellicule d'eau suffisamment conductrice qui se forme à la surface des corps non hydrofuges et non pas à une diminution de la rigidité diélectrique de l'air. Cette humidité relative de l'air augmente également la conductibilité de produits absorbants, tels que le papier, le coton, la laine, etc.

Lorsque les opérations de fabrication ou de manutention le permettent, l'humidification de l'atmosphère s'avère une mesure fiable pour prévenir les risques ou les inconvénients liés à l'accumulation de charges électriques.



Photo 3.2 Shunts électriques assurant la continuité électrostatique d'une canalisation dans laquelle circule un solvant.



Dans un volume limité à quelques mètres cubes, un récipient quelconque rempli d'eau, disposé sur un appareil de chauffage, suffit en général pour obtenir l'effet désiré.

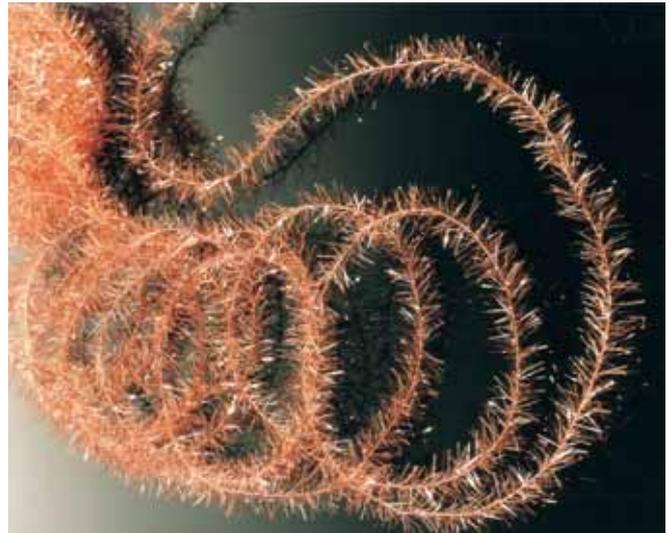
Toutefois, dans certains cas particuliers il est recommandé de contrôler la teneur en humidité de l'air ambiant au moyen d'un dispositif avertisseur automatique et de signaler que celle-ci atteint le niveau inférieur admissible propre au matériau.

Il faut remarquer qu'au cas où des étincelles se produiraient malgré les mesures prises, à partir d'isolants chargés, leur énergie serait accrue par suite, précisément, d'une diminution de la résistivité superficielle de ces isolants.

### 3.2.5.5. Neutralisation des charges engendrées sur les corps non conducteurs (éliminateurs)

Les gaz (partiellement ionisés) ne sont pas des isolants parfaits et des expériences d'électrostatique ont permis d'observer que l'écoulement des charges ne se produit pas uniquement par le support de l'élément chargé et que le gaz qui l'entoure peut avoir une action sur cet écoulement.

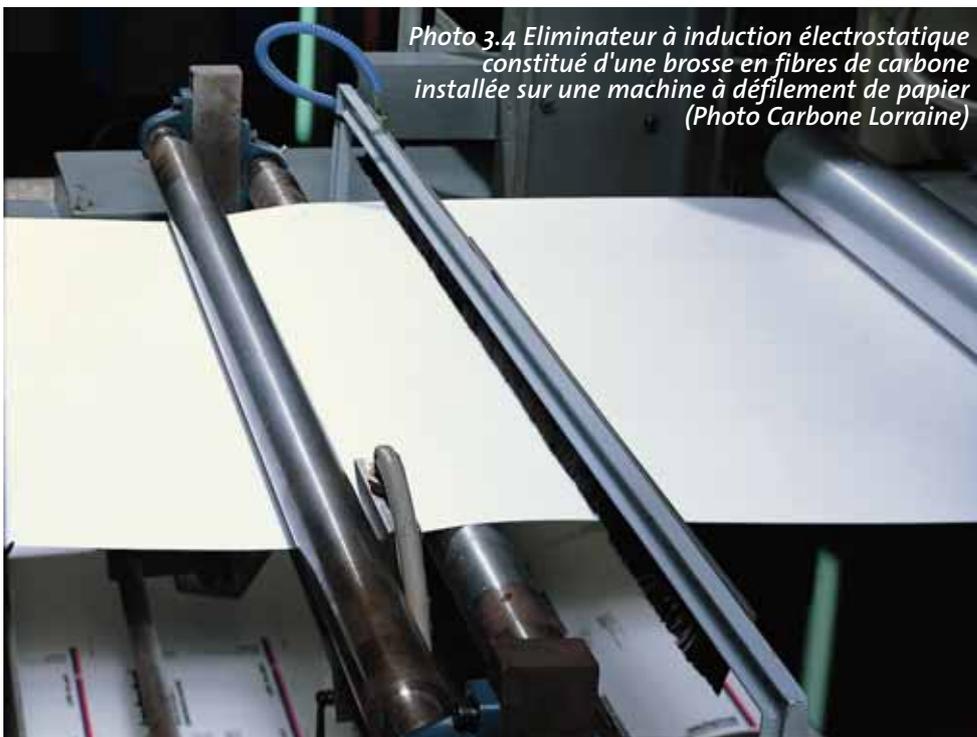
Pour mettre en évidence le phénomène il s'agit de rendre, à proximité de la charge, le gaz beaucoup plus conducteur qu'il ne l'est naturellement, et parmi les causes susceptibles de produire cet effet, on peut citer les propriétés ionisantes de certains rayonnements électromagné-



*Photo 3.3 Éliminateur à induction électrostatique (Attention à ne pas confondre avec une guirlande de Noël) en plastique métallisé avec âme non conductrice dont l'efficacité est tout à fait illusoire. (Photo Boussey Control)*

tiques et corpusculaires et des champs électriques très intenses créés au voisinage des pointes, soit par influence soit par un générateur de tension électrique.

Dans cet air ionisé se forment des charges positives (ions positifs) et des charges négatives (ions négatifs). Les éliminateurs industriels utilisent ce phénomène pour créer, au voisinage des systèmes ou substances à neutraliser, un grand nombre de charges positives et négatives.



*Photo 3.4 Éliminateur à induction électrostatique constitué d'une brosse en fibres de carbone installée sur une machine à défillement de papier (Photo Carbone Lorraine)*

Lorsque le processus de formation des charges est continu et que l'ionisation est permanente et suffisante, la neutralisation peut être totale et le risque de décharge disruptive évité puisque les charges sont éliminées au fur et à mesure de leur formation.

Les différents types d'éliminateurs rencontrés dans la pratique sont les suivants.

#### **Éliminateurs inductifs**

Il s'agit du type d'éliminateur le plus simple et est constitué d'un fil métallique fin, ou d'une barre présentant une arête vive, ou d'une tige munie de pointes ou garnie de clinquants.

### Éliminateurs électriques

Dans les éliminateurs électriques, l'ionisation de l'air est entretenue artificiellement au moyen d'un générateur de tension alternative ou continue.

### Éliminateurs radioactifs (pour mémoire)

Ce type de matériel n'est plus fabriqué en France, mais est encore distribué par quelques sociétés (annexe 4).

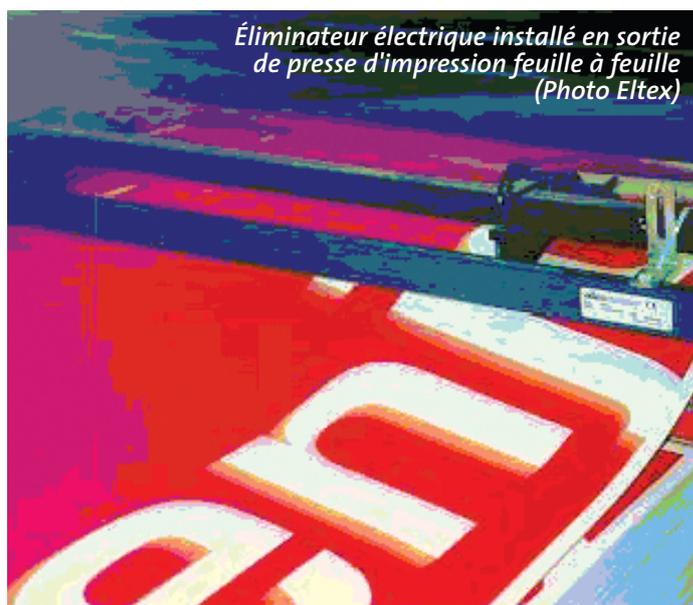
### 3.2.5.6. Générateurs d'ions négatifs

Les générateurs d'ions négatifs (ou ioniseurs d'air) n'ont pas fonction d'être des éliminateurs d'électricité statique, même si leur principe de fonctionnement en est similaire.

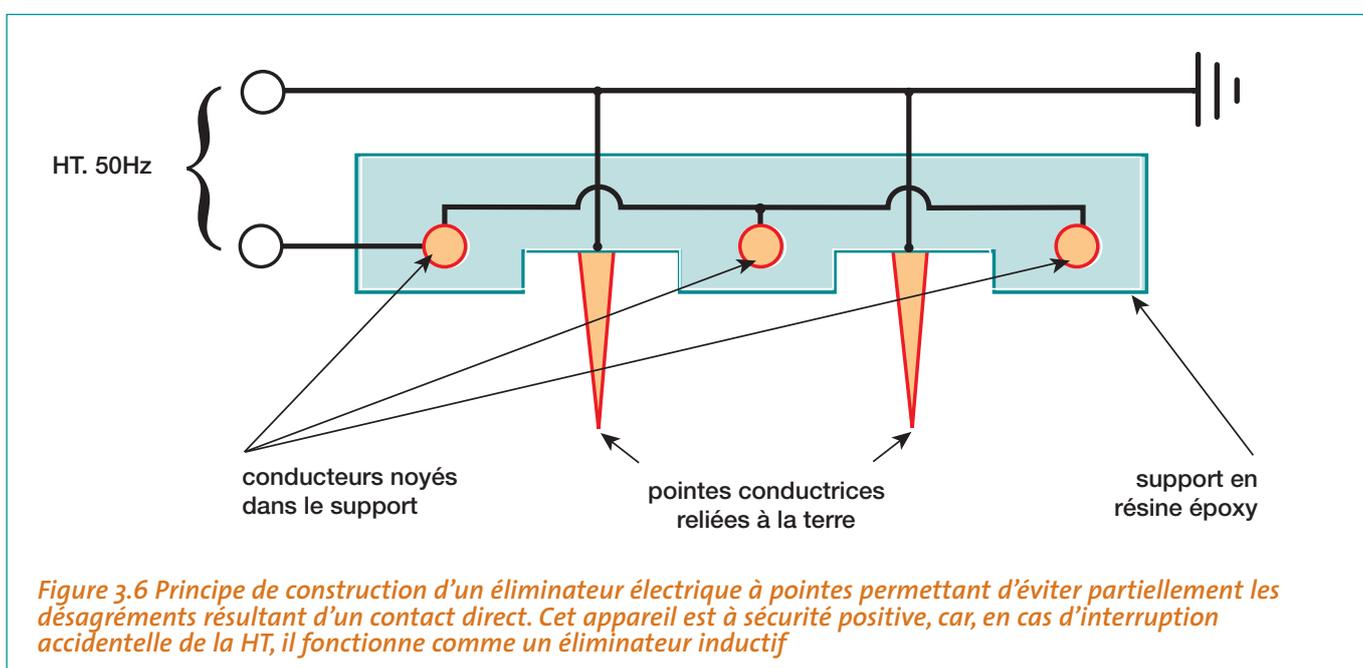
Ils sont conçus pour "fabriquer" des ions négatifs qui sont censés améliorer la santé de l'individu.

La question de savoir si les ions négatifs sont bénéfiques ou néfastes à la santé de l'homme est sujette à débat.

L'INRS a réalisé une préétude exploratoire en conditions réelles sur le terrain afin d'élaborer une méthodologie susceptible de mettre en évidence d'éventuels effets physiologiques et psychophysiologiques de l'ionisation atmosphérique de l'air. Dans les conditions de l'expérimentation et pour l'ensemble des sujets, il n'a pas été constaté d'effets significatifs liés à la mise en place et au fonctionnement d'ioniseurs d'air.



Ultérieurement, le Conseil supérieur d'hygiène publique de France a été amené à émettre un avis sur ce point [avis du Conseil supérieur d'hygiène public de France (Section évaluation des risques de l'environnement sur la santé, NOR/SANP9210383V, séance du 25 novembre 1992)].





### 3.2.6. Efficacité et fiabilité des équipements de prévention contre l'électricité statique (certification NF EL-STAT)

Après une analyse des risques, divers équipements sont mis en place pour lutter contre l'électricité statique. Pour juger de l'efficacité et de la fiabilité de ces équipements, l'utilisateur peut s'appuyer sur la marque NF EL-STAT développée par le LCIE mandaté par l'Afnor.

Par exemple, certaines normes existantes, comme la CEI 61340-5-1 pour la protection des systèmes électroniques, prévoient que les moyens de lutte contre l'électricité statique fassent l'objet d'une procédure de qualification.

La certification des équipements garantit leur conformité aux normes grâce aux essais initiaux et aux contrôles périodiques, à la validation et au suivi des systèmes qualité, à la maîtrise des procédures et au contrôle des fabricants.

Cette certification ne dispense pas de la vérification du maintien des caractéristiques des équipements tout au long de leur durée de vie dans leurs conditions réelles d'utilisation pour apprécier la pérennité de leur efficacité.

Parmi les équipements de prévention relevant de la marque NF EL-STAT, on peut citer les :

- ☀ sols
- ☀ bracelets, chaussures, gants, vêtements
- ☀ plans de travail, éléments de stockage, sièges
- ☀ emballages pour produits sensibles
- ☀ ioniseurs
- ☀ outils.



**LCIE  
EL-STAT**



Dans ce chapitre, sont étudiés :

- ✿ un cas général d'analyse de risques (exemple pris dans l'industrie chimique) ;
- ✿ les mesures de prévention spécifiques à certains secteurs d'activité.

## 4.1. Exemple d'analyse de risque

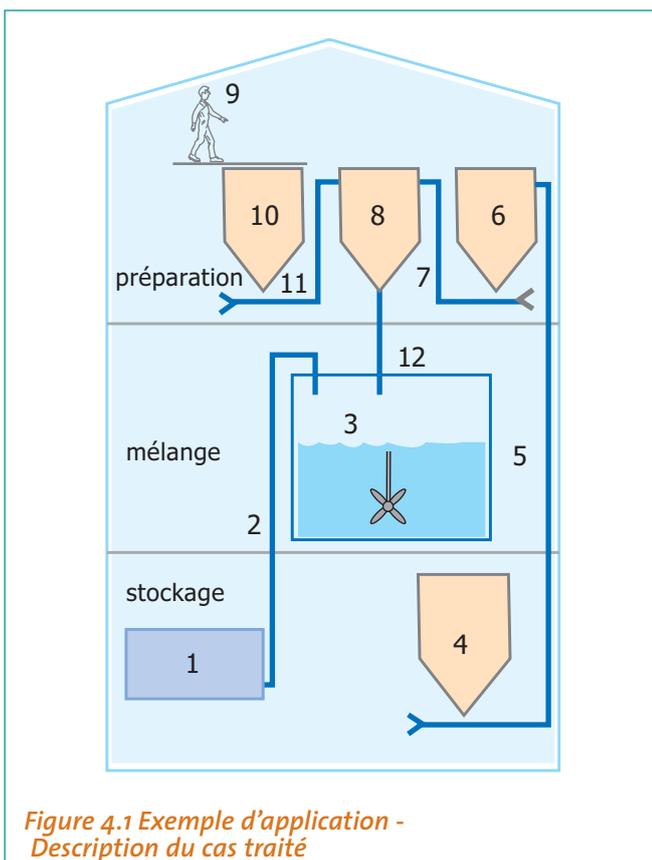
### 4.1.1. Présentation du cas

Nous proposons un cas général destiné à expliciter la méthode d'analyse du risque électrostatique.

Cet exemple est volontairement fictif.

Nous avons imaginé une installation, telle qu'indiquée sur la figure ci-dessous, comportant trois ateliers :

- ✿ stockage ;
- ✿ mélange ;
- ✿ préparation.



Plusieurs types de produits sont utilisés :

- ✿ un liquide stocké dans un réservoir (1) sous azote et transporté dans une canalisation (2) ;
- ✿ un premier pulvérulent stocké dans les trémies (4) et (6) et véhiculé par transport pneumatique dans les canalisations (5) et (7) ;
- ✿ un second pulvérulent déversé manuellement en (9) dans une trémie (10) sans précaution particulière et véhiculé par transport pneumatique dans la canalisation (11).

La trémie (8) est utilisée pour homogénéiser le pulvérulent venant de (6), dans une proportion de 80 % et celui venant de (10), pour les 20 % restant.

Le liquide est inflammable et sa vapeur à une énergie minimale d'inflammation de 1 mJ. Le premier pulvérulent (4, 5, 6, 7) a une EMI de 1 100 mJ. Le second pulvérulent (9, 10, 11) a une EMI de 5 mJ.

L'ensemble de l'installation est métallique à l'exception de la canalisation (5) qui est un tuyau composite, face extérieure conductrice, face intérieure isolante.

### 4.1.2. Étape 1 : identification de l'atmosphère explosible

Le premier travail à effectuer est d'identifier l'atmosphère explosive en termes de :

- ✿ localisation géographique ;
- ✿ énergie d'inflammation.

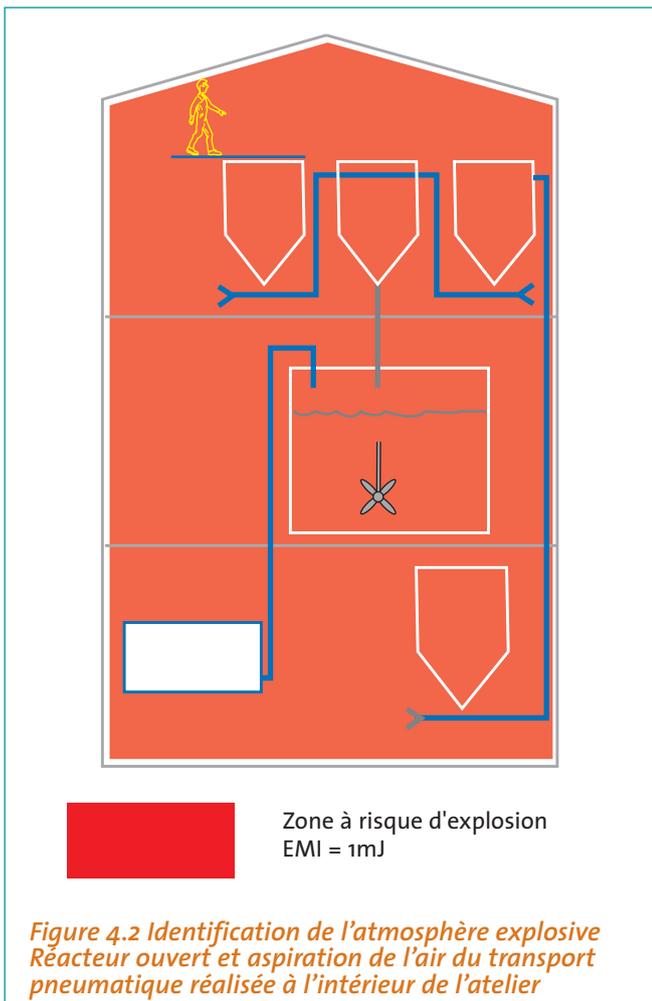
Pour une simplification de cette présentation, les zones telles que décrites dans la réglementation (cf. chapitre 3.1) n'ont pas été prises en compte.

Dans cet exemple, l'installation électrique est réalisée en totalité en matériel certifié II-B, T4, donc adaptée aux atmosphères gazeuses explosibles.



Ce choix a été fait pour permettre de s'affranchir du problème de variations de pression à l'intérieur du réacteur (que l'on a laissé "respirer" en ouvrant partiellement le couvercle) et de l'installation de stockage et de transport de liquide qui ne donne pas entièrement satisfaction (problèmes de fuites).

L'identification de l'atmosphère explosible se présente comme celle de la **figure 4.2** ci-après.



En effet, dans cet exemple, suite à une erreur de conception (aspiration de l'air du transport pneumatique dans la zone où du gaz explosible, venant du réacteur fuyant, est présent) :

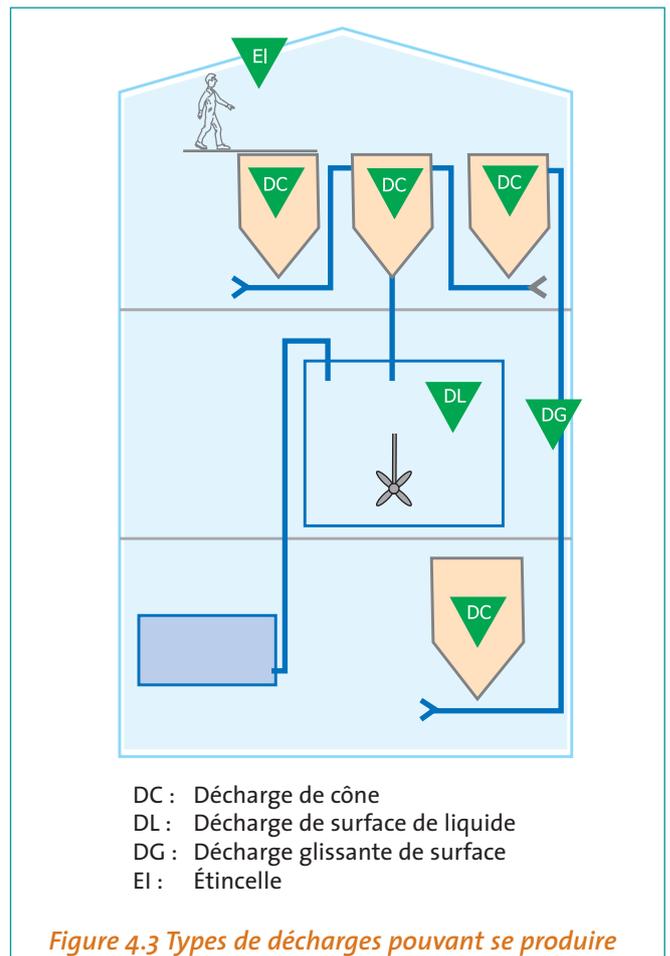
- la localisation géographique de l'atmosphère explosible correspond à l'ensemble des trois ateliers ;
- l'atmosphère explosible est une atmosphère gazeuse d'EMI = 1 mJ.

Une solution mieux adaptée aurait été de conserver le réacteur étanche et d'aspirer l'air du transport pneumatique à l'extérieur du bâtiment (hors atmosphère explosive). Dans ce cas, l'atmosphère explosive aurait été localisée comme suit :

- une atmosphère explosive d'EMI = 1 mJ dans le réacteur (3) ;
- une atmosphère explosive d'EMI = 5 mJ au poste de versement (9), dans les trémies (10) et (8), dans les canalisations (11) et (12) ;
- une atmosphère explosive d'EMI = 1 100 mJ dans les trémies (4) et (6), dans les canalisations (5) et (7).

### 4.1.3. Étape 2 : identification des types de décharges possibles

Les différents types de décharges pouvant se produire sont représentés sur le schéma ci-après.



### 4.1.4. Étape 3 : évaluation du risque

Le risque d'incendie explosion dû à l'électricité statique est évalué en :

- ☀️ identifiant l'atmosphère explosible et son EMI (cf. chapitre 1.5) ;
- ☀️ en identifiant les types de décharges possibles (cf. chapitre 1.4.4) et leur énergie maximale ;
- ☀️ en examinant si cette énergie est supérieure à l'EMI de l'atmosphère ; dans ce cas, une situation de risque est présente.

Cette démarche est représentée dans les deux tableaux 4.1 et 4.2 ci-après :

- ☀️ le premier correspond au premier cas où le réacteur n'est pas étanche et où l'air pour le transport pneumatique est prélevé à l'intérieur de l'atelier (Tableau 4.1) ;
- ☀️ le second correspond au second cas où le réacteur est étanche et où l'air pour le transport pneumatique est prélevé à l'extérieur de l'atelier (Tableau 4.2).

Équipement	Réf. sur schéma	Étape 1 EMI en mJ de l'atmosphère	Étape 2 Type de décharge	Étape 3 Risque d'inflammation	Observations
Réservoir	1	Néant	Néant	Non	Pas d'atmosphère inflammable (N <sub>2</sub> )
Canalisations	2	Néant	Néant	Non	Pas d'atmosphère inflammable (liquide)
Réacteur	3	1	Aigrette (décharge de surface de liquide) (< qq mJ)	Oui	
Trémie	4	1	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Canalisations	5	1	Glissante de surface (> qq J)	Oui	
Trémie	6	1	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Canalisations	7	1	Néant	Non	
Trémie	8	1	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Déversement	9	1	Étincelle (de qq µJ à qq J)	Oui	
Trémie	10	1	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Canalisations	11	1	Néant	Non	
Canalisations	12	1	Néant	Non	

Tableau 4.1 Cas du réacteur ouvert et de la prise d'air à l'intérieur de l'atelier



Équipement	Réf. schéma	Étape 1 EMI en mJ de l'atmosphère	Étape 2 Type de décharge	Étape 3 Risque d'inflammation	Observations
Réservoir	1	Néant	Néant	Non	Pas d'atmosphère inflammable (N <sub>2</sub> )
Canalisations	2	Néant	Néant	Non	Pas d'atmosphère inflammable (liquide)
Réacteur	3	1	Aigrette (décharge de surface de liquide) (< qq mJ)	Oui	
Trémie	4	1100	Cône (< qq 100 mJ)	Non	
Canalisations	5	1100	Glissante de surface (> qq J)	Oui	
Trémie	6	1100	Cône (< qq 100 mJ)	Non	
Canalisations	7	1100	Néant	Non	
Trémie	8	5	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Déversement	9	5	Étincelle (de qq µJ à qq J)	Oui	
Trémie	10	5	Cône (< qq 100 mJ)	Oui	
Canalisations	11	5	Néant	Non	
Canalisations	11	5	Néant	Non	

Tableau 4.2 Cas du réacteur étanche et de la prise d'air à l'extérieur de l'atelier

#### 4.1.5. Exemples de mesures de prévention

Les mesures de prévention pourront être prises au niveau des procédés (par exemple modification d'un débit, etc.), des matériels (par exemple remplacement d'une canalisation isolante par une autre conductrice, etc.), ou des procédures (consignes particulières, etc.). Dans l'exemple décrit ci-dessus, les mesures de prévention à mettre en œuvre pourraient être les suivantes :

##### Limitation de l'atmosphère explosible :

- ☛ amélioration de l'étanchéité du réacteur (critères sur les procédés),
- ☛ prise d'air du transport pneumatique à l'extérieur du bâtiment (critères sur les procédés),
- ☛ modification du poste de chargement par interposition d'une trémie tampon, d'une vanne d'étanchéité et inertage de la trémie n°10 (critères sur les procédés) ;

##### Limitation des décharges disruptives :

- ☛ remplacement des canalisations présentant un risque de décharge glissante de surface par des canalisations conductrices homogènes (critères sur les matériels) cf. chapitre 1.4.4.5 ;

##### Limitation des mécanismes de génération et d'accumulation de charges :

- ☛ installation d'un sol conducteur et utilisation de chaussures conductrices (critères sur les matériels),
- ☛ consignes de vérification des mises à la terre et de l'équipotentialité (critères sur les procédures),
- ☛ consignes spécifiques de mise à la terre des containers métalliques mobiles au poste de chargement n°9,
- ☛ introduction du liquide dans le réacteur par le bas (critère sur les procédés).

##### Limitation des effets de l'explosion :

- ☛ protection des enceintes par événements d'explosion.

## 4.2 Exemples de mesures de prévention particulières

### 4.2.1. Introduction

Dans ce chapitre figurent les mesures de prévention particulières à certains secteurs industriels.

Cependant, dans chaque cas, une analyse spécifique de risques doit être réalisée.

### 4.2.2. Machines à imprimer

Les charges électrostatiques, et par conséquent la possibilité de formation d'étincelles, peuvent être réduites :

- ✱ en utilisant des matières humides et conditionnées ;
- ✱ en évitant le frottement supplémentaire entre la nappe et les éléments de guidage au démarrage et lors des variations de vitesse ;
- ✱ en utilisant un revêtement de caoutchouc conducteur sur le presseur ;

- ✱ en assurant la conductibilité des encres des solvants et des lubrifiants (cf. chapitre 1.3.4).

Si un risque de décharges dangereuses subsiste, les charges formées doivent être dissipées ou neutralisées par :

- ✱ la mise à la terre des parties tournantes telles que tambours et cylindres à proximité des bacs à encre ;
- ✱ l'utilisation d'un plancher conducteur ;
- ✱ la mise à la terre des récipients, entonnoirs et pompes servant à la manipulation des solvants et des encres ;
- ✱ le port de chaussures conductrices et, le cas échéant, éviter le port de vêtements en fibres synthétiques non conductrices ;
- ✱ l'ionisation de l'air.

Quant aux éliminateurs inductifs (cf. chapitre 3.2.5.5), même correctement installés, leur caractère antidéflagrant n'est pas toujours évident.

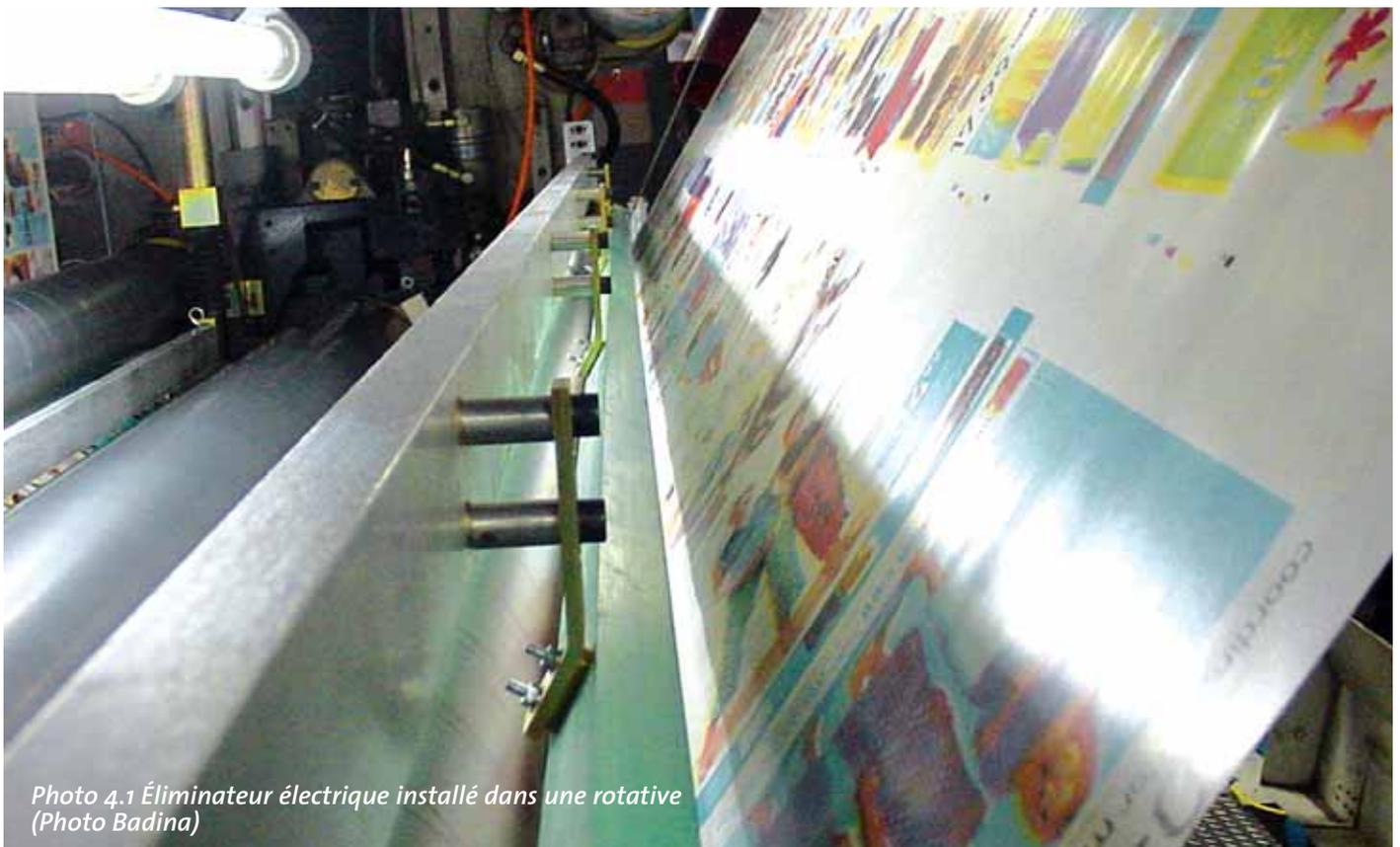


Photo 4.1 Éliminateur électrique installé dans une rotative  
(Photo Badina)



### 4.2.3. Machines à enduire

Les charges apparaissent lorsque l'enduit de caoutchouc ou de plastique se sépare du rouleau transporteur ou d'une autre couche de tissu. Pour éviter les risques d'incendie ou d'explosion, on peut adopter les mesures suivantes :

- ✶ mise à la terre de toutes les parties métalliques ;
- ✶ ionisation de l'air transversalement à la nappe ;
- ✶ aspiration des vapeurs de solvants, avec arrivée d'air en excès ;
- ✶ éventuellement placer tout l'appareillage sous azote.

### 4.2.4. Fabrication de films photographiques

Sur une bande de film, les charges prennent naissance lorsque l'on décolle celle-ci du support de coulée, du cylindre des bobines enrouleuses, etc. Il en résulte que toutes les parties métalliques des machines à cylindres doivent être mises à la terre. De plus, à sa sortie de la machine, le film doit être soumis à une pulvérisation d'eau ou recueilli dans un bain d'eau. La charge développée lors de l'enroulement du film sec doit être neutralisée par un éliminateur à pointes ou à clinquants relié à la terre.

Il en est de même pour les bobineuses et les enrouleuses où la vitesse de bobinage ne devrait pas dépasser 10 m/min.

Pour éviter l'adhérence des poussières lors du séchage des films ou négatifs photographiques, les éliminateurs à projection d'ions sont particulièrement indiqués.

Lors du traitement des chutes de films et avant de mettre les chutes dans le mélangeur, il est indiqué de les humecter d'un solvant conducteur.

Il est également nécessaire de réunir toutes les parties conductrices à la terre et de maintenir si possible une humidité relative de l'air à un degré voisin de 70 %. Cette précaution est indispensable lorsqu'il s'agit de chutes de nitrocellulose.

### 4.2.5. Machines textiles et industrie du papier

Dans l'industrie du textile ou du papier, les nappes isolantes, arrivant au contact de rouleaux qui les guident à travers divers organes des machines, engendrent des charges

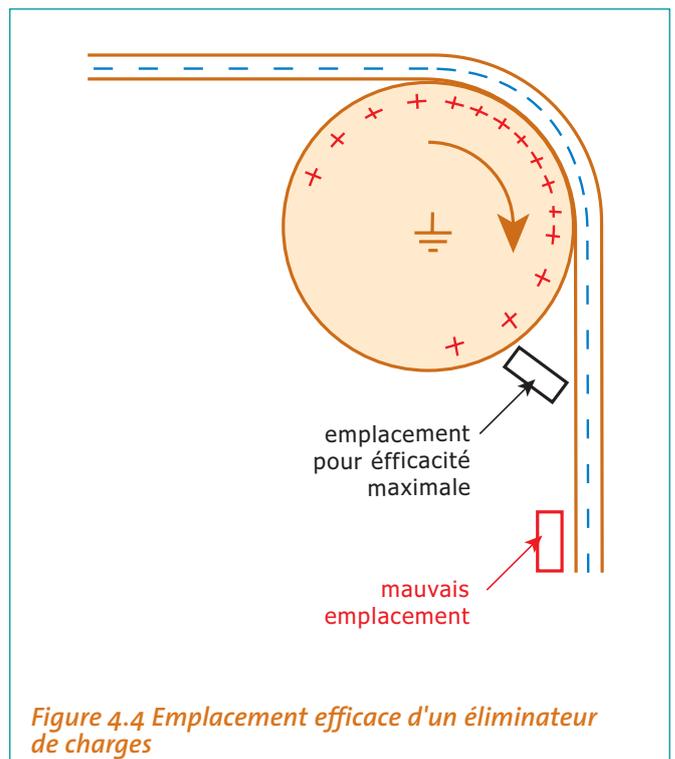


Figure 4.4 Emplacement efficace d'un éliminateur de charges

électriques qui occasionnent des inconvénients préjudiciables à la fabrication ainsi qu'à la sécurité des personnes si les matériaux sont eux-mêmes combustibles.

Dans la fabrication des textiles, pour pallier ces inconvénients, la méthode classique consiste à augmenter la teneur en humidité de l'air, malheureusement celle-ci peut être incompatible avec la fabrication, notamment quand il s'agit de fibres synthétiques.

Dans le cas présent, la meilleure solution consiste à rendre l'air conducteur au moyen de dispositifs éliminateurs électriques ou inductifs à condition que leur emplacement soit judicieusement choisi.

Dans la fabrication du papier, l'emploi d'éliminateurs électriques peut, suivant leur forme géométrique, s'avérer d'un usage peu pratique car les emplacements appropriés sont rarement prévus là où leur efficacité serait maximale.

Ces problèmes d'ordre technologique peuvent cependant être résolus en utilisant soit des barres à faible encombrement (à plusieurs rangées de pointes), soit des dispositifs à projection de charges ; ces derniers sont particulièrement recommandés lorsqu'on a plusieurs plans à neutraliser.

Quand il s'agit d'éliminer des charges importantes ou que les surfaces à neutraliser défilent à grande vitesse, il est conseillé d'utiliser des éliminateurs hybrides.

Enfin, il faut souligner que l'implantation d'éliminateurs inductifs sur ces machines ne pose pas de problème particulier ; cependant leur efficacité peut être remise en cause quand il s'agit d'installation de fortune exécutée avec du matériel improvisé.

### 4.2.6. Stockage et manutention de liquides inflammables

L'électrisation des liquides inflammables peut engendrer des risques d'explosion si des transferts de charges accompagnées d'étincelles d'énergie suffisante sont rendus possibles sur la surface de ces liquides ou dans l'atmosphère explosive qui entoure cette surface.

De telles étincelles peuvent jaillir spontanément :

- ⚡ entre des parties conductrices de l'installation réunies à la terre et des éléments chargés par frottement (écoulement des liquides) ou par influence ;
- ⚡ entre des éléments conducteurs isolés ou reliés à la terre et le liquide (canne plongeuse ou entonnoir) ;
- ⚡ entre deux points de la surface du liquide ;
- ⚡ entre la surface du liquide et les parois du récipient.

Il est évident que, si la mise à la terre permet de neutraliser les charges de frottement dans les canalisations de remplissage, elle ne permet pas pour autant de supprimer les risques précités, notamment ceux qui résultent de l'accumulation des charges électriques par le liquide inflammable.

Cet inconvénient explique d'ailleurs l'origine des explosions qui se sont produites au moment où l'on introduisait dans les récipients contenant le liquide des cannes plongieuses ou des sondes réunies à la terre.

Pour provoquer l'explosion, il suffisait que la tension disruptive  $V_d$  d'amorçage soit atteinte et que l'énergie libérée

$$W = 1/2 CV^2$$

soit au moins égale à l'énergie minimale d'inflammation (EMI) du mélange air-gaz.

Quant à la réalisation d'un ensemble équipotentiel, celui-ci ne peut être assuré qu'à la condition que tous les composants soient conducteurs, tout au moins au sens électrostatique du terme ; d'où l'intérêt d'éviter les organes non conducteurs et plus particulièrement les récipients et les canalisations.

Lors de son écoulement, pour limiter l'accumulation des charges au sein du liquide, on veillera particulièrement à éviter des vitesses élevées d'écoulement, dont la valeur limite peut être déterminée, pour les produits pétroliers, à l'aide de la formule :

$$v^2 \cdot d = 0,64$$

dans laquelle  $v$  est la vitesse d'écoulement en mètres par seconde et  $d$  le diamètre, exprimé en mètres, de la conduite.

Si des impératifs de construction ou des conditions particulières d'installations ne permettent pas d'éviter des réductions locales de section, la charge statique engendrée dans ces étranglements peut être dissipée partiellement dans des tronçons de relaxation, disposés en aval (conduite de section plus forte avec raccord ne provoquant pas de turbulence du flux, du genre ajoutage de Venturi, par exemple).

La longueur minimale du tronçon sera :

$$L = 3 v$$

$L$  étant exprimé en mètres et  $v$ , la vitesse d'écoulement, étant exprimée en mètres par seconde.

Les parois intérieures des canalisations doivent être lisses et exemptes de souillures. (Pour l'éther, avec des diamètres de canalisations jusqu'à 12 mm, et le sulfure de carbone avec des diamètres jusqu'à 24 mm, des vitesses maximales de 1 à 1,5 m par seconde ont donné des résultats satisfaisants. Pour les esters, les cétones, les alcools, une vitesse maximale de 9 à 10 mètres par seconde s'est avérée suffisamment sûre.)

La tuyauterie sera de préférence métallique ou éventuellement en caoutchouc conducteur.

La résistance électrique entre les deux extrémités du tuyau ne devra jamais excéder  $10^6$  ohms malgré les liaisons, les déformations ou les contraintes mécaniques éventuelles. L'équipotentialité devra être assurée entre chaque tronçon.

### 4.2.7. Remplissage et dépotage de citernes routières

Le chargement, le transport et la manutention des hydrocarbures liquides font l'objet d'un certain nombre de règlements, de prescriptions et de recommandations (cf. chapitre 3.1.3.3).



Pour mémoire, la circulaire Tr. 22/49 du 15 novembre 1949 du ministère du Travail précise à l'article 1-3 :

*"Lorsque des charges statiques proviennent du transvasement ou de l'écoulement de liquides inflammables, on doit réunir entre eux et à la terre les objets métalliques qui se trouvent au contact du liquide. En particulier, ces mesures doivent être prises lors du transvasement des hydrocarbures d'un réservoir dans un camion-citerne ou réciproquement. Les masses métalliques des deux appareils doivent être reliées l'une à l'autre et, de plus, être mises à la terre."*

Au moment de l'opération de dépotage, si la continuité électrique est assurée entre la citerne et le châssis du véhicule ( $R < 10^6$  ohms), l'évacuation (2) des charges s'opère de deux façons :

- ✶ naturellement, par les pneus suivant une constante de temps qui dépend de la capacité du véhicule, de la résistance des pneus et de la résistance du sol. Cette constante de temps est considérablement diminuée chaque fois qu'une résistance, qui peut être le chauffeur, assure un contact entre le véhicule et le sol ou que l'humidité relative de l'air dépasse 65 % ;

- ✶ volontairement, en assurant la mise à la terre au moyen d'un conducteur électrique reliant le véhicule à une prise de terre prévue à cet effet. Cette mise à la terre doit être effectuée avant toute autre opération, notamment le raccordement du tuyau de dépotage.

En ce qui concerne le remplissage des automobiles, la liaison conductrice entre cette dernière et le tuyau d'alimentation est suffisamment assurée quand le contact entre la douille du tuyau d'alimentation et la tubulure du réservoir est établi.

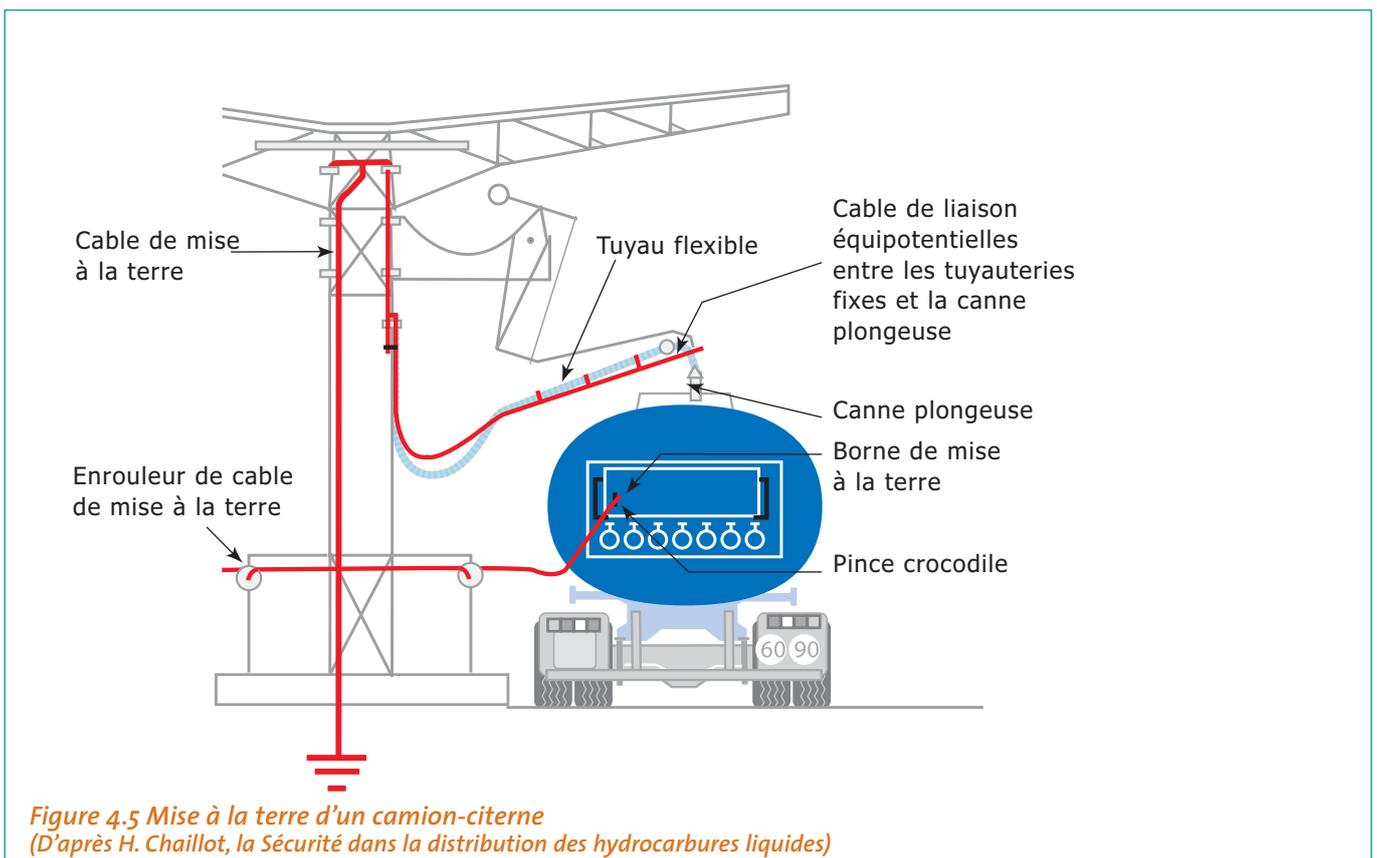
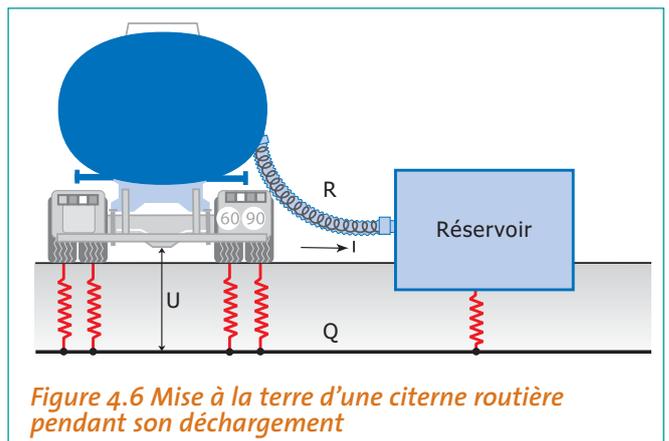




Photo 4.2 Mise à la terre d'une citerne routière

Système de mise à la terre avec voyant de confirmation de continuité électrique

Patte de mise à la terre



Manchette de chargement

Photo 4.3 Le transvasement de produits pulvérisants nécessite aussi une mise à la terre soignée.



#### 4.2.8. Détente de gaz comprimés ou liquéfiés

Lors de la détente des gaz comprimés ou liquéfiés, il y a lieu de prendre les mesures de sécurité suivantes :

- ⚠ éviter la formation de mélanges explosibles ;
- ⚠ utiliser des gaz de la plus grande pureté possible ;
- ⚠ prévenir les condensations en réduisant la vitesse d'écoulement ;
- ⚠ humidifier l'atmosphère si c'est possible ;
- ⚠ dissiper la charge électrostatique par la mise à la terre de l'ajutage d'échappement et des autres appareils, mais tenir compte de ce que les filtres ou les toiles métalliques intercalées dans le circuit du gaz augmentent la turbulence du flux et, par conséquent, la charge statique. Des conducteurs isolés, qui se chargeraient par frottement ou par influence, ne doivent pas se trouver dans le jet de gaz ou à proximité.

#### 4.2.9. Nettoyage au jet de vapeur

La projection à grande vitesse d'un jet de vapeur dans une canalisation peut engendrer des charges électriques importantes et l'utilisation de ce procédé pour nettoyer des réservoirs ou récipients ayant contenu des produits inflammables peut présenter des risques d'explosion.

Pour limiter le risque, il est nécessaire de prendre les précautions suivantes :

- ⚠ assurer l'équipotentialité du tuyau souple, des conduits de vapeurs, et du récipient ;
- ⚠ aucun objet conducteur isolé ne doit se trouver à l'intérieur du récipient pendant le nettoyage ;
- ⚠ au début de l'opération, limiter la vitesse d'éjection jusqu'à ce que la plus grande partie de l'air contenu dans le réservoir soit remplacée par la vapeur ;
- ⚠ augmenter le débit progressivement jusqu'à la vitesse désirée.

#### 4.2.10. Peinture au pistolet

Les risques électrostatiques lors des opérations de peinture au pistolet sont principalement de deux natures :

- ⚠ les risques dus à la charge du matériau pulvérisé.

Cette charge peut être soit obtenue par la fragmentation de la peinture elle-même (pistolet pneumatique), soit communiquée aux particules de peinture par effet couronne (pistolet électrostatique). Les règles de protection sont alors celles décrites au chapitre 4.2. Toutes les pièces doivent être reliées électriquement ensemble et à la prise de terre générale selon les règles déjà décrites dans cet ouvrage ;

- ⚠ les risques dus au pistolet (et des appareils correspondants) lui-même dans le cas des équipements de projection électrostatique. Ces risques peuvent être prévenus en utilisant des appareils conformes aux normes correspondantes (voir annexe 2).

#### 4.2.11. Opérations de traitement et de manutention de particules solides

Lorsqu'on procède au broyage ou au mélange de particules solides, il est recommandé, suivant les possibilités, d'augmenter la conductibilité de la substance au moyen d'additifs conducteurs pour dissiper les charges.

Tous les appareils qui entrent dans le processus de fabrication seront réunis entre eux et mis à la terre.

Lors du transvasement de produits pulvérulents, limiter la hauteur de chute et empêcher que ceux-ci ne s'accumulent en forme de cône dans le récepteur.

Les récipients ou les emballages utilisés pour la manutention ou le transport seront de préférence conducteurs (chemisage en tôle, paniers à larges mailles en fil ou ruban, fils métalliques incorporés dans les sacs, par exemple).

Le transport pneumatique par canalisation implique de respecter les mesures générales déjà mentionnées (cf. chapitre 4.2), notamment l'utilisation de canalisations conductrices homogènes et leur mise à la terre.

Il convient d'éviter, lorsque c'est compatible avec le processus mis en œuvre, comme pour les liquides, des vitesses de flux trop importantes, des changements de direction trop accentués.

#### 4.2.12. Outils à main

Le principal risque encouru lors de l'utilisation d'outils métalliques en atmosphère explosible est la production d'étincelles à la suite de frottements ou de chocs subis par l'outil.

Une solution connue pour réduire ce risque est d'appliquer sur les outils un revêtement qui protège la partie métallique contre d'éventuels chocs ou frottements sous réserve de s'assurer que ce revêtement n'est pas lui-même générateur d'étincelles dangereuses du fait de phénomènes électrostatiques, de chocs ou de frottements.

Il est donc recommandé d'utiliser, lors d'une utilisation en atmosphère explosible, des outils à main répondant aux exigences de la norme NF E 74-400 (janvier 1998).

### 4.2.13. Tuyaux et canalisations

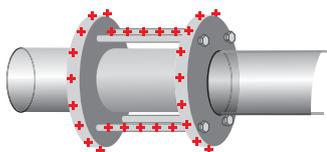
#### 4.2.13.1. Canalisations métalliques

Tous les récipients conducteurs, les canalisations, les buses, les filtres ou les tamis, etc., fixes ou mobiles, entrant en contact avec une substance susceptible d'accumuler des charges électriques au cours d'un processus de fabrication, de stockage, de transvasement, etc., doivent être réunis entre eux pour assurer leur équipotentialité et mis à la terre.

Il sera particulièrement important de vérifier la continuité électrique entre les différents éléments pouvant être inopinément isolés (joints, salissure, etc.).



Tube avec joints isolants



Bride métallique sur un tube en verre

Figure 4.7  
Exemples d'accumulation de charges sur des parties conductrices isolées électriquement de la terre

#### 4.2.13.2. Canalisations non métalliques

L'utilisation de canalisations non métalliques en zone à risque d'explosion devra être déterminée en fonction de la nature et de la localisation de l'atmosphère explosible.

Dans le cas du transport pneumatique de pulvérulent, il y aura lieu de prendre en considération particulièrement les risques présentés par les décharges glissantes de surface.

### 4.2.14. Courroies de transmission et systèmes similaires

Les courroies de transmission en mouvement autour de poulies et, en général, tous les systèmes similaires dans lesquels une bande sans fin défile sur des rouleaux, développent, sous l'effet des contacts et des ruptures de contact, des charges électrostatiques dont l'importance dépend notamment de la nature et des dimensions des matériaux utilisés, de la vitesse de défilement, du glissement.

Des décharges disruptives ont été constatées entre les courroies et les bâtis métalliques des machines qu'elles entraînent.

Sur les bandes de convoyeurs, des charges sont également générées par le frottement des matières transportées. Des potentiels, atteignant jusqu'à 45 kV par rapport à la terre, ont été relevés sur des bandes de convoyeurs transportant des céréales à la vitesse de 3,80 m/s ; sur des courroies en cuir animées d'une vitesse de 14 m/s, les potentiels relevés par rapport à la terre variaient de 13 à 50 kV.

Pour éviter ces phénomènes :

- ✦ il faut tout d'abord assurer l'écoulement de la charge prenant naissance sur les poulies. À cet effet, celles-ci seront en matière conductrice et mises à la terre ;
- ✦ quant aux courroies elles-mêmes, la méthode la plus efficace est d'employer à leur confection des matières conductrices et d'éviter des raccords non conducteurs. Elles devront être conformes aux normes en vigueur (cf. annexe 2) ;
- ✦ il faut également noter que, si l'application d'une couche de résine sur la face interne de la courroie augmente son adhérence, elle augmente également sa résistance de fuite et, par conséquent, les risques d'accumulation des charges. Si, pour des raisons de



fabrication, l'humidité relative de l'air ambiant ne peut être portée à une valeur voisine de 65 %, on peut augmenter la conductibilité des courroies mauvaises conductrices en les enduisant de solutions ou mélanges conducteurs à raison d'une application hebdomadaire, en moyenne ;

- ✶ enfin, on peut utiliser des appareils éliminateurs placés à 10 ou 15 mm en aval de la poulie sur la face interne de la courroie ;
- ✶ quant aux protecteurs de courroies, ils seront réalisés en matière conductrice et reliés à la terre.

#### 4.2.15. Hôpitaux

Pour diminuer la probabilité d'apparition de charges électrostatiques, le caoutchouc non conducteur, les matiè-



res plastiques, la laine et la plupart des tissus en fibres synthétiques sont à proscrire dans les salles d'opération.

Ces mesures de prévention sont à considérer tant pour les équipements que pour les chaussures, les survêtements, les vêtements et les sous-vêtements utilisés par le personnel appelé à pénétrer dans ces salles.

Pour compléter ces prescriptions essentielles, mais non suffisantes, il est nécessaire de prévoir également l'écoulement des charges lorsqu'elles apparaissent en dépit des précautions prises pour les éviter.

Ces mesures font l'objet de dispositions contenues dans le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public.

En ce qui concerne les établissements existants assujettis à l'arrêté du 23 mars 1965, l'article U 59 suivant est à appliquer.

##### Article U 59

§ 3 – *Le sol doit comporter un grillage métallique relié par un conducteur de protection à l'ensemble équipotentiel. La résistance du sol mesurée dans les conditions précisées par arrêté interministériel doit être inférieure à 500 000 ohms.*

§ 4 – *Pour permettre l'écoulement des charges d'électricité statique, les chaussures du personnel, les coussins de table d'opération, les roulettes des chariots et appareils mobiles, les masques et autres parties non métalliques des appareils d'anesthésie et, d'une façon générale, toutes les surfaces accessibles des équipements et des appareils doivent être constitués par un matériau présentant une conductibilité électrique suffisante, c'est-à-dire que, pour chacun de ces éléments, la résistance mesurée dans les conditions précisées par arrêté interministériel doit être inférieure à 500 000 ohms.*

En ce qui concerne les établissements assujettis à l'arrêté du 25 juin 1980 ou ceux à construire, il est prévu à l'article U30 de l'arrêté du 25 mai 1989 que les installations électriques doivent être conformes à la norme N F C 15-211.

Cette norme prévoit en particulier à l'article 14.1.3 que, dans les locaux où sont stockés ou utilisés des produits anesthésiques inflammables et comportant des zones de risque (salles d'opération, d'anesthésie et de réveil), la résistance des sols doit être inférieure à 25 mégohms (sols conducteurs).

# Autres nuisances de l'électricité statique

En dehors des risques d'incendie et d'explosion, l'électricité statique peut provoquer des nuisances telles que les effets physiologiques sur l'être humain, la dégradation de la qualité et de la fiabilité de composants ou de systèmes électroniques, l'augmentation de l'empoussièremment de certains produits, etc. Dans ce chapitre seront traités le cas des bureaux et des industries électroniques avec, pour ce dernier cas, des exemples de mesures sur site.

## 5.1. Bureaux et salles de réunion

Si le désagrément ressenti par une personne lors d'une décharge électrostatique n'est pas dangereux en soi en raison des faibles énergies mises en jeu de quelques millijoules (mJ), il peut être pénible par sa répétition dans les locaux de bureau ou avoir des conséquences graves s'il est à l'origine de chutes.

Contrairement aux idées reçues, l'origine de ce phénomène provient de la charge acquise par les personnes. Il est communément admis qu'une décharge due à un potentiel inférieur à 2 kV n'est généralement pas ressentie par la personne.

Les deux principales sources de génération de charge sont :

- ✶ la marche sur un sol ;
- ✶ le frottement sur les sièges.

Les sols et les sièges doivent donc être caractérisés, du point de vue du risque physiologique, par des mesurages spécifiques.

Le mesurage le mieux adapté est celui dit "du potentiel d'opérateur".

Les méthodes d'essai actuellement en vigueur sont décrites dans les documents ISO/TR 6356 et EN 1815 et concernent les revêtements de sol.

Pour les autres cas (sièges), le potentiel d'opérateur est mesuré conformément aux documents précédents, mais la génération de charge par frottement est adaptée aux cas pratiques.

Dans tous les cas, la valeur mesurée du potentiel de l'opérateur par rapport à la terre devra être inférieure à 2 kV.

De préférence, les conditions d'environnement lors des essais devront être assez sévères (humidité faible, par exemple 25 % HR) pour que l'objet puisse être utilisé dans une majorité de cas pratiques.

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 conducteur relié à la terre, par l'intermédiaire d'un objet en métal tenu à la main (clé, outil, etc.) ;
- ✶ 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, etc.).

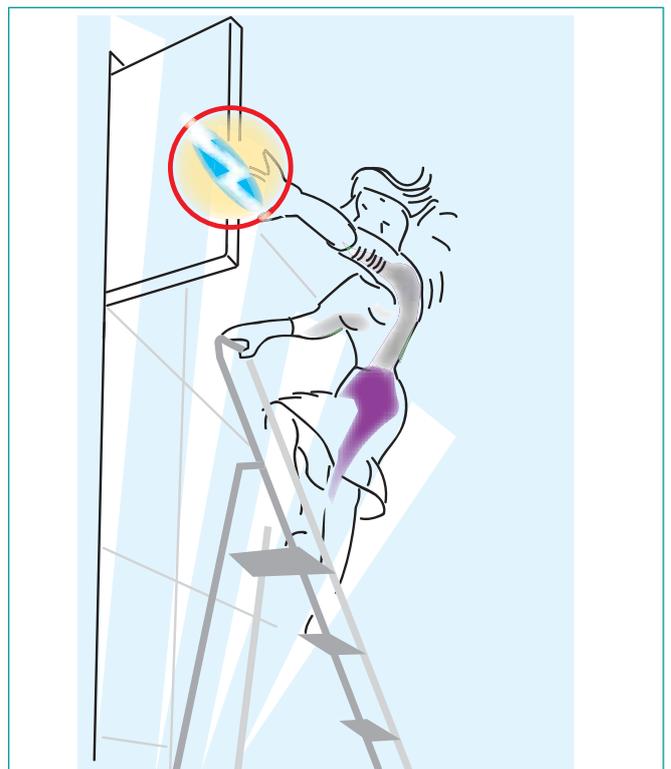


Figure 5.1 Accident résultant indirectement d'une décharge électrostatique



Pratiquement, les moyens les plus répandus pour se prémunir du risque physiologique sont :

- ☀ le maintien d'une humidité relative élevée : celle-ci ne devra pas être inférieure à 50 %, voire 65 % dans certains cas ;
- ☀ l'utilisation de matériaux antistatiques ou dissipateurs (sols, chaussures, etc.) ;

☀ certains produits, commercialisés sous forme d'aérosol, peuvent être appliqués sur les surfaces pour les rendre antistatiques ou dissipatrices. Cependant, leur efficacité est limitée dans le temps et, par conséquent, leur application devra être renouvelée fréquemment pour en conserver les avantages.

## 5.2. Industries électroniques

Dans la technologie actuelle, les composants électroniques sont de plus en plus sensibles à l'électricité statique. Par exemple dans les composants MOS, des tensions aussi faibles que quelques dizaines de volts peuvent conduire au claquage de la couche d'oxyde. Ainsi des décharges d'origine électrostatique (DES) de très faibles énergies peuvent détruire un composant en provoquant un cratère dans les couches isolantes (figure 5.2 ci-après et photos 5.1). 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 ;
- ☀ 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.

Les équipements électroniques peuvent aussi être perturbés par une décharge électrostatique (DES) et occasionner par exemple une perte de données dans un système informatique.

Par exemple, les têtes magnéto-résistives des disques durs actuels sont sensibles à des niveaux de tension variant de 6 V à 20 V.

Le seuil de sensibilité des composants dépend de leur type. Les méthodes de protection, les matériaux à utiliser sont donc à adapter. S'il s'agit d'un VMOS, qui peut avoir un seuil de sensibilité de 30 V, ou de diodes Schottky qui, pour certaines, peuvent être sensibles à des tensions supérieures à 2 500 V, les mesures de protection seront différentes.

D'autre part, sur une chaîne de montage, le niveau de protection peut être augmenté au fur et à mesure des stades de fabrication (emballage des composants, etc.).

Une zone protégée contre les DES doit être considérée comme un lieu où tout est mis en œuvre pour minimiser les risques liés à l'électricité statique. À l'extérieur de ces zones, soit les risques de décharges électrostatiques sont inexistantes, soit les objets sensibles doivent être correctement protégés, par exemple, par un emballage adéquat (sachet de blindage pour un composant électronique). Ces zones protégées doivent être repérées par un marquage approprié.

Une zone protégée peut être un simple tapis pour dépannage ponctuel, un plan de travail, une salle, un atelier, toute l'entreprise.

Tout objet à l'intérieur d'une zone de sécurité électrostatique doit impérativement posséder de bonnes caractéristiques électrostatiques et bien évidemment être utilisé correctement. De même le personnel doit être équipé de matériel de protection (bracelet, chaussures, vêtements, etc.). Pour cela, il est impératif de répertorier tous les objets nécessaires et suffisants au processus de travail. Tout autre objet est donc à proscrire.

Comme déjà exposé, le principe de lutte contre l'électricité statique se résume dans les deux points suivants :

- ☀ éviter la génération de charges ;
- ☀ permettre la dissipation des charges.

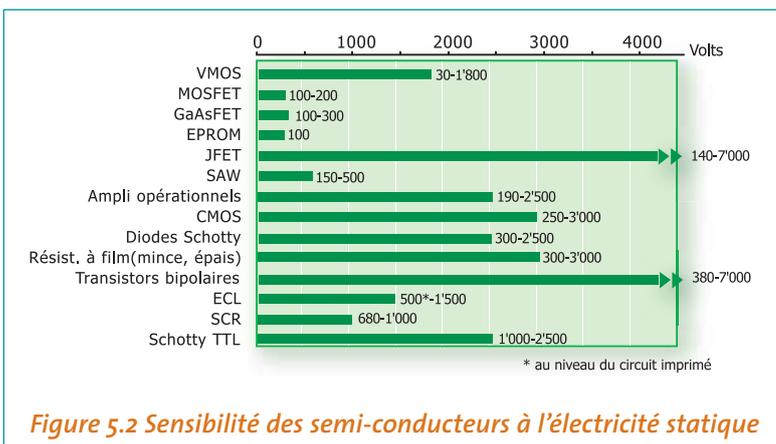
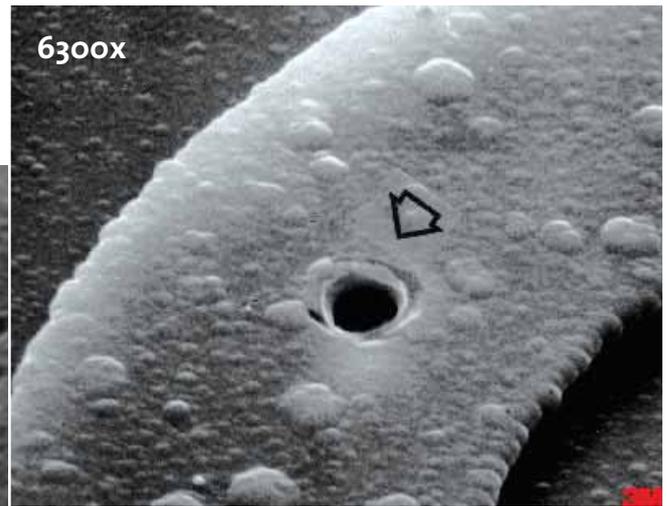
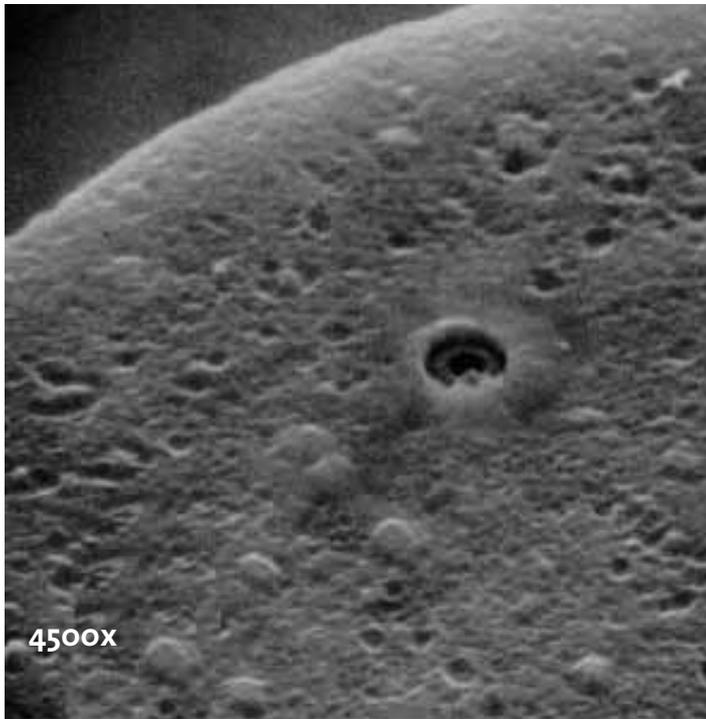


Figure 5.2 Sensibilité des semi-conducteurs à l'électricité statique



Photos 5.1 Dommages causés par les décharges électrostatiques sur les composants électroniques (Photos 3M)

Selon le processus de travail et les objets présents dans la zone protégée, il est important de définir la façon de mettre en œuvre les moyens pour respecter les deux points précédents. Ceci conditionnera la définition des matériels de protection et leur efficacité.

Les exemples ci-dessous résument des cas fréquemment rencontrés :

- ☀ opérateur à poste fixe : mise à la terre par un bracelet ;
- ☀ opérateur devant se déplacer : mise à la terre par le sol via les chaussures ;
- ☀ matériels conducteurs ou dissipateurs : mise à la terre ;

- ☀ matériel roulant : mise à la terre par le sol via les roues ;
- ☀ limiter la génération de charge : emploi de matériaux antistatiques, sinon emploi d'éliminateurs.

Les rapports techniques CEI 61340-5-1 et CEI 61340-5-2 constituent les documents de référence publiés pour la protection contre l'électricité statique dans l'industrie électronique. Le premier donne les prescriptions générales, le second est un guide d'utilisateur.

Dans ces documents, on trouvera toutes les spécifications concernant les différents matériels et les méthodes d'essai correspondantes, les contrôles à réaliser et leur périodicité, les recommandations concernant l'assurance qualité et la formation du personnel. Le tableau ci-après donne des exemples de ces spécifications.



Élément	Remarque	Méthode d'essai	Spécification
Plan de travail (surface d'étagère, etc.), chariot	Ce peut être le plan de travail lui-même ou un tapis posé sur ce plan de travail ; il doit être <b>dissipateur</b> .	CEI 61340-4-1. Résistance de surface ( $R_s$ ) et résistance à la terre ( $R_g$ ).	$1.10^4 \Omega < R_s < 1.10^{10} \Omega$ $7,5.10^5 \Omega < R_g < 10^9 \Omega$
Bracelet	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ Le bracelet en tissu ou en métal (salle blanche) doit assurer un bon contact avec le poignet. Les parties extérieures du bracelet et du cordon doivent être en matériau isolant.</li> <li>⚡ Le cordon doit contenir une résistance de limitation du courant.</li> <li>⚡ Le point de connexion ne doit pas être compatible avec un système de connexion autre que la mise à la terre.</li> </ul>	<p>Mesure du bracelet seul : résistance à la terre (<math>R_g</math>).</p> <p>Mesure du cordon seul : résistance entre extrémités (<math>R_c</math>).</p> <p>Mesure du bracelet porté.</p>	<p><math>R_g &lt; 1.10^5 \Omega</math></p> <p><math>7,5.10^5 \Omega &lt; R_c &lt; 5.10^6 \Omega</math> <math>7,5.10^5 \Omega &lt; R_g &lt; 3,5.10^7 \Omega</math></p>
Gants		Résistance à un point de terre du gant porté.	$7,5.10^5 \Omega < R_g < 1.10^{12} \Omega^*$
Vêtements		Résistance de point à point ( $R_p$ ).	$R_p < 1.10^{12} \Omega^*$
Outil		Résistance à la terre ( $R_g$ ).	$R_g < 1.10^{12} \Omega^*$
Sol/chaussure	Lorsqu'il n'est pas possible de relier le personnel à la terre par un bracelet (magasin, etc.), la mise à la terre peut se faire par le sol et les chaussures. Le sol et les chaussures doivent être dissipateurs ou conducteurs.	<p>Mesure du sol. Résistance à un point de terre. CEI 61340-4-1.</p> <p>Mesure des chaussures portées.</p>	<p><math>R_g &lt; 1.10^9 \Omega</math></p> <p><math>5.10^4 \Omega &lt; R &lt; 1.10^8 \Omega</math></p>
Siège	Toutes les parties du siège doivent être dissipatrices (tissu, roues, etc.).	Résistance à la terre. CEI 61340-4-1.	$R_g < 1.10^{10} \Omega$
Chariot	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ Roues dissipatrices.</li> <li>⚡ Plateau utilisé comme plan de travail.</li> </ul>	Résistance à la terre. CEI 61340-4-1.	$7,5.10^5 \Omega < R_g < 10^9 \Omega$

\* Si la résistance est supérieure à  $10^{12}\Omega$ , il faut mesurer le temps de décharge pour atteindre 10 % de la charge initiale. Celui-ci doit être inférieur à 2s.

Tableau 5.1 Exemples de spécifications pour matériels

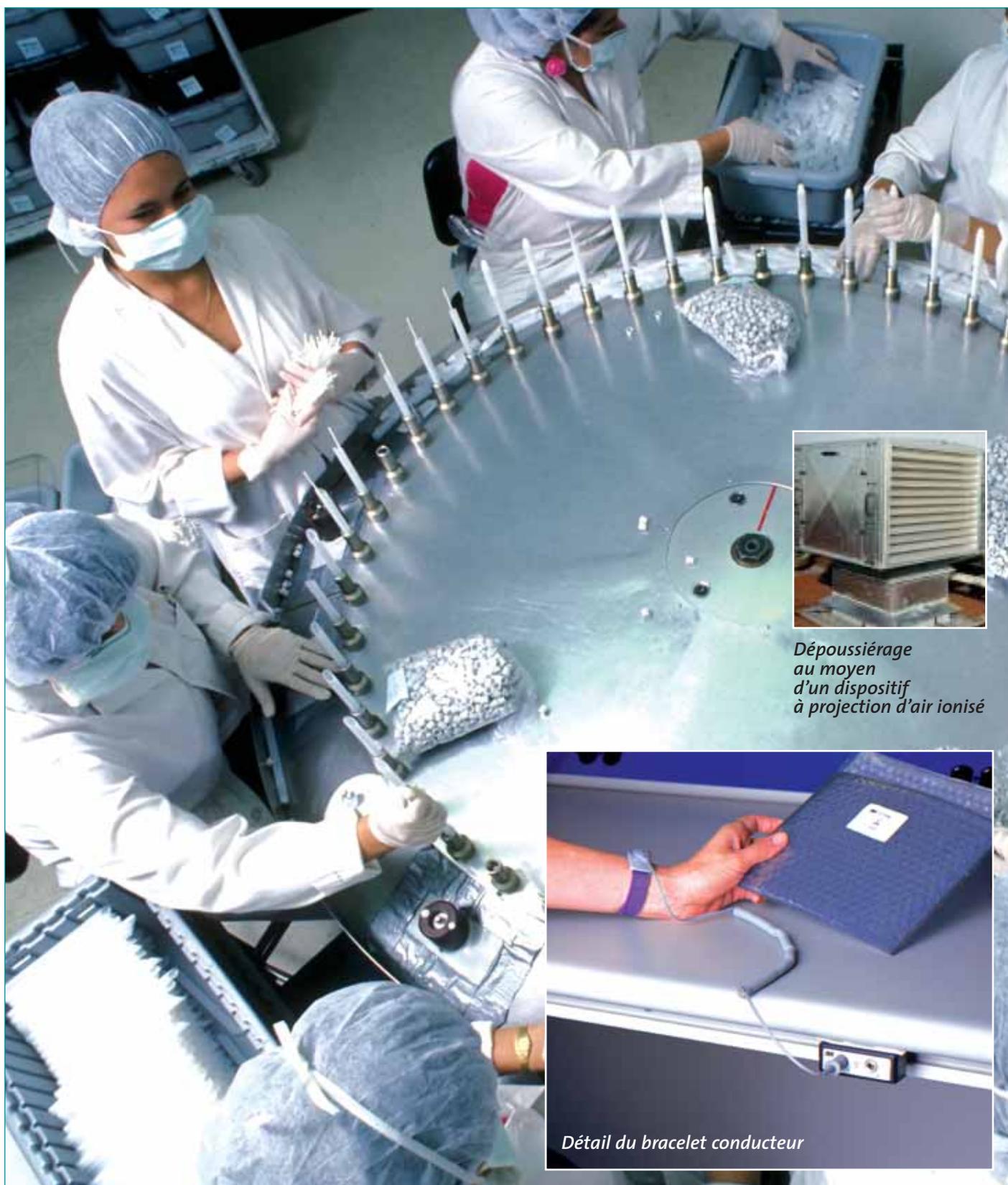


Photo 5.2 Détail d'un poste de travail protégé contre les décharges électrostatiques



## 5.3. Exemples de mesures sur site industriel

Le contrôle des équipements de protection vis-à-vis de l'électricité statique est d'importance capitale. Cependant, la conformité de ces équipements pris individuellement est insuffisante, il faut en outre que, une fois assemblés et installés sur un site industriel, ils remplissent pleinement leur fonction de protection. La vérification des installations est donc importante. Ce chapitre donne un exemple réel de vérification d'un site complet dans l'industrie électronique pour la protection des composants.

Le rapport de contrôle correspondant est présenté ci-après.

**Déjà livré à :** ElectroFREE-ESD  
Route des Décharges  
61340-5-1 STATIC CEDEX

**Objet :**  
Essai effectué : diagnostic électrostatique ;  
Document de référence : rapport technique  
CEI 61340-5-1 de décembre 1998 ;  
Lieu des essais : locaux de la société  
ElectroFREE-ESD.

**Date des essais :** 2003  
Ce document comporte xx pages  
Responsable de la prestation : M. ESD  
Le responsable technique

**Objet des essais**  
Les essais avaient pour objet d'établir un diagnostic électrostatique de plusieurs zones en effectuant des mesures sur des matériaux ou matériels situés dans ces zones.  
Ces mesures visaient à caractériser soit l'aptitude à la charge de l'élément soumis à l'essai (mesure du potentiel et du champ électrostatique après frottement) soit son aptitude à l'écoulement des charges (détermination de résistances d'isolement).

**Déroulement des essais**  
Les mesures ont été effectuées en 2003 dans les locaux de la société ElectroFREE-ESD par les soins d'un représentant du LCIE en présence d'un représentant de la société ElectroFREE-ESD.

**Nature des essais**  
Les essais réalisés sur matériaux ou matériels ont été les suivants :

- ❗ détermination de la résistance d'isolement entre l'objet et la terre électrique (voir chapitre 3.1) ;
- ❗ détermination de la résistance transversale d'isolement (voir chapitre 3.2) ;
- ❗ mesures du potentiel des opérateurs - essai dit du "marcheur" (voir chapitre 3.3) ;
- ❗ mesure du champ électrostatique (voir chapitre 3.4) ;
- ❗ contrôle du fonctionnement des testeurs de chaussures (voir chapitre 3.5) ;
- ❗ détermination de la résistance de surface pour les emballages (voir chapitre 3.6).

**Modalités d'exécution des essais**  
**Résistance d'isolement à la terre : Rg**  
Détermination de la résistance d'isolement suivant les prescriptions du rapport technique CEI 61340-5-1 de décembre 1998.  
L'essai était effectué au moyen d'un appareil référencé ISOSOL 8 qui a été réalisé sous licence CNET.  
Cet appareil est constitué d'une électrode de mesure, de masse 5 kg et de surface 20 cm<sup>2</sup>, qui était posée sur le revêtement soumis à l'essai. L'appareil était relié à un mégohmmètre qui mesurait la résistance d'isolement entre la sonde à laquelle la tension continue était appliquée et un point de terre arbitrairement choisi dans la même pièce.  
La mesure de la résistance était réalisée après une durée de mise sous tension de la sonde d'environ 15 secondes. La tension appliquée était de 10, 100 ou 500 V.

**Recommandation** : dans une zone protégée, les matériaux utilisés doivent être dissipateurs ( $R_g < 10^9 \Omega$ ) ou antistatiques (ne générant pas de charges importantes, inférieures à  $100 \text{ pC/cm}^2$ ).

### Mesure de résistance transversale : $R_t$

Une tension continue était appliquée entre l'électrode définie au chapitre 3.1 qui était posée sur l'échantillon et une plaque métallique (de dimensions supérieures à celles de l'échantillon) sur laquelle l'échantillon était posé. La mesure de la résistance était réalisée après une durée de mise sous tension de la sonde d'environ 15 secondes. La tension appliquée était de 10, 100 ou 500 V.

### Essais dits " du marcheur "

L'opérateur tenait une électrode manuelle conforme à la norme EN 1815 (1998), qui permettait de mesurer son potentiel au moyen d'un diviseur capacitif. L'opérateur marchait sur le sol essayé et son potentiel était enregistré. À partir du diagramme enregistré, on déterminait la valeur maximale du potentiel. La valeur du potentiel est exprimée en volts (V). Les différentes configurations de chaussures d'opérateur étudiées sont données dans les tableaux de résultats.

### Mesure de champ électrostatique

La mesure est réalisée à l'aide d'un moulin à champ. L'appareil relié à la terre électrique est approché à environ 10 cm de l'élément essayé. La valeur du champ électrostatique créé par l'élément soumis à l'essai est indiquée sur l'appareil en kilovolts par mètre (kV/m).

Recommandation : dans une zone protégée, aucun matériel ne doit générer de champ électrique continu supérieur à 10 kV/m. Des valeurs mesurées supérieures à 100 kV/m à 10 cm ou 1 000 kV/m à 1 cm sont considérées à risque.

### Contrôle du fonctionnement des testeurs de chaussures

Une résistance variable était insérée dans le circuit de détection du testeur et l'indication affichée par le testeur relevé. L'appareil doit répondre aux exigences spécifiées pour les chaussures (tableau 1-CEI 61340-5-1) :

$$1.10^5 \leq R \leq 1.10^8 \Omega.$$

### Mesure de la résistance de surface des emballages : $R_s$

L'essai était effectué selon les modalités du rapport technique 61340-5-1 de décembre 1998. Une tension continue était appliquée entre deux électrodes concentriques. Ces

électrodes étaient constituées l'une, sous forme d'un disque de diamètre 30 mm et l'autre, sous forme d'un anneau de largeur 3 mm et de diamètre intérieur 57 mm. La mesure était relevée après un temps d'électrisation d'environ 15 secondes.

### Résultats

Les mesures réalisées ainsi que les résultats correspondants et les conditions de température et d'humidité au moment des essais sont donnés dans les tableaux ci-après. Pour chaque résultat, un statut est donné qui indique si ce résultat satisfait ou non aux exigences du rapport technique CEI 61340-5-1 de décembre 1998 : "Électrostatique – Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Prescriptions générales". Pour chaque résultat non conforme un numéro de recommandation (n° rec.) est donné.

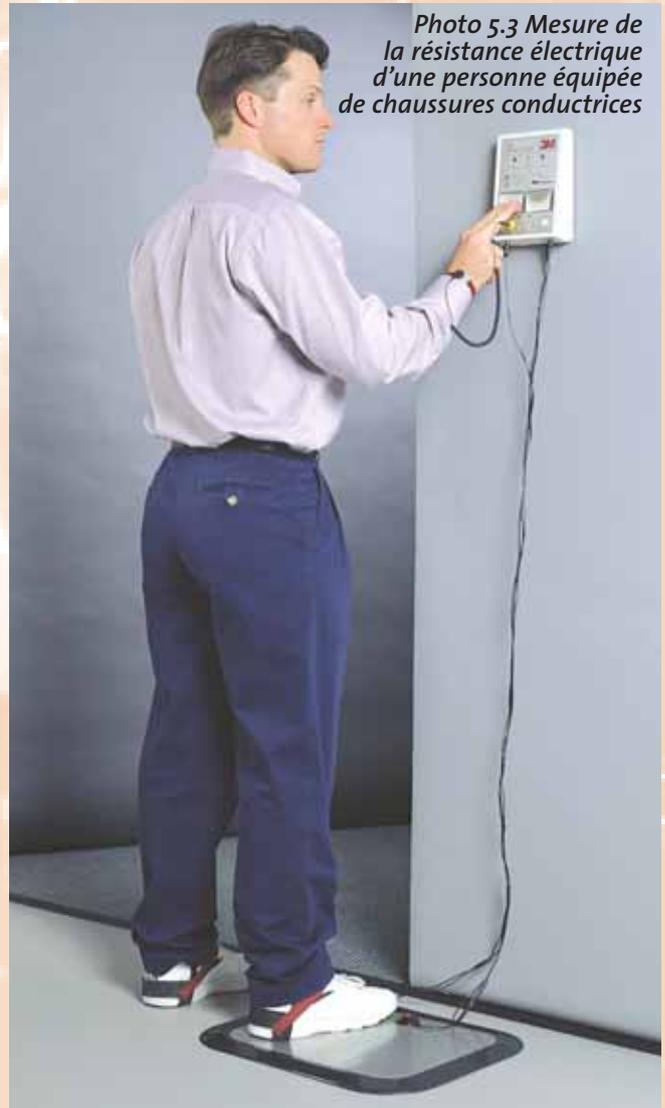


Photo 5.3 Mesure de la résistance électrique d'une personne équipée de chaussures conductrices



## Diagnostic électrostatique des installations

Salle : magasin

Date : 2003

Température : 20°C

Humidité relative : 55 % HR

Identification du poste	Élément contrôlé	Mesure Essai réalisé	Résultat	Statut*	N° rec.
	<b>Observations :</b>				
	<b>Mise à la terre des opérateurs :</b> Les chaussures et le sol ont été choisis comme principal moyen de mise à la terre. Le port de bracelet s'effectue lors du travail sur stockeurs-opérateurs en position debout.			S	/
	<b>Bracelets :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• bracelets et cordons ne sont pas personnels ;</li><li>• aucun contrôle n'est effectué ;</li><li>• les points de connexion de masse ne sont pas identifiés.</li></ul>			PS3	1 b
	<b>Chaussures :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• un contrôle hebdomadaire des chaussures est effectué et enregistré ;</li><li>• la procédure de contrôle (chaque chaussure doit être testée séparément - un pied puis l'autre) ne semble pas être correctement assimilée par le personnel.</li></ul>			PS3	1 a
	<b>Visiteurs :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• des talonnettes sont à leur disposition.</li></ul>			S	/
Salle	<b>Signalisation et délimitation de la zone :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• la zone protégée est constituée de l'ensemble de la salle (climatisée) et est signalée à l'entrée.</li></ul>			S	/

\* Statut

S = satisfaisant ; PS = pas satisfaisant (PS1 = critique ; PS2 = majeur ; PS3 = mineur)

### Diagnostic électrostatique des installations

Salle : magasin (suite)

Date : 2003

Température : 20°C

Humidité relative : 55 % HR

Identification du poste	Élément contrôlé	Mesure Essai réalisé	Résultat	Statut*	N° rec.	
	Tapis de table long		1,8.10 <sup>6</sup> Ω			
	Tapis de table court	Rg (100 V)	2,5.10 <sup>7</sup> Ω	S	/	
Stockeur S10	Scotch 2 bracelets	Champ électrostatique Rg (9 V)	100 kV/m à 10 cm 1,3.10 <sup>6</sup> Ω	PS3 S	3 /	
Chariot bleu		Rg (100 V)	4,5.10 <sup>10</sup> ΩΩ	PS2	2	
Élément de stockage inox		Rg (100 V)	1,5.10 <sup>9</sup> ΩΩ	PS3	2	
Poste de travail	Tapis de table long	Rg (100 V)	1,8.10 <sup>6</sup> ΩΩ	S	/	
	Repose-pieds	Rg (100 V)	5.10 <sup>11</sup> Ω	PS2	1	
	Sol		Rg (100 V)	9,0.10 <sup>8</sup> ΩΩ		
				1,2.10 <sup>7</sup> ΩΩ		
				2,5.10 <sup>8</sup> Ω Ω		
			1,8.10 <sup>8</sup> Ω	S	/	
Sol (gris marbré) situé près des stockeurs	Opérateurs portant des chaussures conductrices de marque : BROGA OTTER	"Marcheur"	40 V max. 70 V max.	À titre informatif	/	
Testeur de chaussure	Gamme de détection	Une résistance variable est mise en série avec le système de détection	Le testeur indique correct pour R = 1,0.10 <sup>6</sup> ΩΩ et incorrect pour R < 7,11.10 <sup>5</sup> Ω Ω et R ≥ 3,7.10 <sup>7</sup> Ω Ω	S	/	
Emballages pour cartes ou composants	• sachet plastique métallisé marque Plastopil	Rs (100 V)				
		Face extérieure	1,1.10 <sup>9</sup> ΩΩ	S		
		Face extérieure	2,2.10 <sup>9</sup> ΩΩ	S	/	
	• sachet plastique rose	Face intérieure	1,5.10 <sup>4</sup> ΩΩ	S		
		Face extérieure	1,7.10 <sup>12</sup> ΩΩ	S		
• les trois emballages ci-dessus		Champ électrostatique après frottement avec du nylon	<10 kV/m à 10 cm	S	/	

**Observation :** Les sachets plastiques roses (pink poly) sont, dans certains cas, utilisés comme emballage lors d'un transport hors zone protégée.

PS1

4



## Diagnostic électrostatique des installations

Société : ElectroFREE-ESD

### N° rec. | Recommandations CEI 61340-5-1

#### 1 | Mise à la terre des opérateurs

Les chaussures et le sol ont été choisis comme principal moyen de mise à la terre des opérateurs. Les zones protégées sont les zones dont le sol a une résistance à la terre inférieure à  $10^9 \Omega$ . Les chaussures (portées sur une plaque métallique) doivent avoir une résistance comprise entre  $5.10^4 \Omega$  (ou  $1.10^5 \Omega$  par chaussure) et  $1.10^8 \Omega$ .

Les sièges doivent avoir une résistance à la terre  $R_g < 1.10^{10} \Omega$ .

Le port du bracelet est recommandé :

- ✘ pour un poste fixe (opérateur assis) ;
- ✘ pour les composants très sensibles (potentiel opérateur  $< 10 \text{ V}$ ) ;
- ✘ équiper les opérateurs handicapés sur chaise roulante de bracelet ;
- ✘ supprimer les repose-pieds, escabeaux, tabourets isolés ou isolants (ou équiper les opérateurs de bracelets).

#### 1 a | Testeur de chaussure :

- ✘ il doit répondre aux exigences spécifiées :  $1.10^5 \Omega < R < 1.10^8 \Omega$  ;
- ✘ chaque chaussure doit être testée séparément ;
- ✘ le contrôle des chaussures doit être journalier et consigné.

#### 1 b | Bracelet :

- ✘ sa résistance à la terre doit être comprise entre  $7,5.10^5 \Omega$  et  $3,5.10^7 \Omega$  ;
- ✘ bracelet et cordon de raccordement sont personnels et ne doivent pas être laissés sur un poste de travail ;
- ✘ un contrôle journalier du bracelet associé à son cordon de raccordement doit être effectué et consigné ;
- ✘ les points de connexion de masse doivent être identifiés ;
- ✘ les points de connexion ne doivent être compatibles avec aucun autre système non conçu pour le branchement de la terre de la zone protégée.

Même si la mise à la terre du personnel est effectuée par le système sol/chaussure, ces recommandations doivent, pour le principe, être observées.

#### 2 | Mise à la terre des surfaces de travail, éléments de stockage, chariots et tables roulantes

Tout élément sensible non emballé doit être manipulé ou stocké sur un poste de travail dont la surface est dissipatrice ou conductrice ( $10^4 \Omega < R_s < 10^{10} \Omega$ ) et reliée à la terre électrique ( $7,5.10^5 \Omega < R_g < 10^9 \Omega$ ) :

- ✘ équiper tous les plans de travail et les surfaces de stockage dont la résistance  $R_g$  est  $> 1.10^9 \Omega$  de tapis dissipateurs reliés à la terre ;
- ✘ équiper les chariots de roues conductrices ;
- ✘ vérifier régulièrement la mise à la terre des chariots équipés d'une chaîne.

## Diagnostic électrostatique des installations

Société : ElectroFREE\_ESD

N° rec. | Recommandations CEI 61340-5-1

### 3 | Aucun élément générateur de champ électrostatique ne doit être présent à proximité des éléments sensibles

Les champs générés doivent être  $< 10 \text{ kV/m}$  à 1 m ou  $< 100 \text{ kV/m}$  à 10 cm :

- ✘ éliminer des postes de travail tous les matériels en plastique ordinaire (bulle-pack) ;
- ✘ mettre dans les zones protégées des écrans non générateurs ou placer sur les écrans des écrans de protection ;
- ✘ utiliser des outils antistatiques ou dissipateurs ;
- ✘ utiliser de préférence du ruban adhésif ou des étiquettes non générateurs.

### 4 | Transport et stockage de produits sensibles hors zone protégée – emballages de protection

Hors zone protégée, les produits sensibles aux décharges électrostatiques doivent être complètement protégés :

- ✘ l'emballage utilisé constitue alors une nouvelle zone protégée ;
- ✘ l'utilisation de chariots isolés n'est pas nuisante dans ce cas ;
- ✘ les matériaux d'emballages doivent être marqués et identifiés ;
- ✘ le matériau d'emballage en contact direct avec le produit sensible doit être antistatique et avoir une résistivité de surface comprise entre  $10^2$  et  $10^{11} \Omega$  ;
- ✘ les sacs en boîtes doivent être complètement fermés ;
- ✘ hors zone protégée, l'emballage doit assurer le blindage contre les décharges électrostatiques (champ nul vu par le composant en cas de décharge à l'extérieur de l'emballage) ;
- ✘ pour cela, les sachets plastiques métallisés ne doivent pas être usagés ;
- ✘ les sachets plastiques roses (pink poly) ne doivent pas être utilisés seuls (ceux-ci n'assurant pas de blindage) mais placés à l'intérieur d'un emballage conducteur assurant le blindage électrostatique.



## 6. Conclusion

La présence éventuelle de charges électrostatiques sur les lieux de travail est à prendre en considération car elle risque de compromettre la sécurité du personnel, du matériel et le bon déroulement des opérations de fabrication ou de manutention.

Pour prévenir le risque incendie/explosion d'origine électrostatique, il faut identifier les atmosphères explosibles susceptibles d'apparaître, les types de décharges pouvant se produire, et évaluer leur pouvoir d'inflammation.

Cette analyse étant faite, on choisira d'adopter des mesures de prévention compatibles avec le milieu de travail et l'activité. Leur efficacité et leur fiabilité devront être contrôlées.

En matière de prévention des accidents d'origine électrostatique, il n'existe pas de solution type mais un ensemble de solutions possibles qui ne peuvent être choisies qu'en fonction de la connaissance de tous les éléments impliqués dans le fonctionnement de l'installation provoquant la génération des charges et des risques ou des inconvénients qui s'y rattachent :

- ☀ nature de l'activité de l'entreprise ;
- ☀ matières premières utilisées ;
- ☀ conception et implantation du matériel de fabrication et de manutention ;
- ☀ atmosphère environnante ;
- ☀ etc.

Parmi les mesures de prévention qui peuvent être engagées, soit séparément soit simultanément, on peut envisager et choisir en fonction de l'analyse de risque :

- ☀ l'action sur le milieu de travail : dans une atmosphère explosive, augmenter le débit ou l'efficacité de la ventilation afin que la concentration air-gaz ou air-poussières n'atteigne en aucun cas la limite d'explosivité. Humidification de l'atmosphère si la fabrication le permet ;
- ☀ l'action sur les sols : pas de sols ni de revêtements de sols non conducteurs ;
- ☀ l'action sur l'habillement du personnel : les chaussures conductrices, éventuellement les vêtements "conducteurs" ;

- ☀ l'action sur les produits chimiques utilisés : par exemple remplacer un solvant inflammable par un solvant ininflammable ou possédant un point éclair plus élevé. Addition de produits antistatiques pour diminuer la résistivité trop importante de certains liquides inflammables ;

- ☀ l'action sur les moyens de production et de manutention : remplacement des éléments isolants par des éléments conducteurs, au sens électrostatique. Travail en enceinte fermée et atmosphère inerte (sous azote). Limiter si possible la vitesse d'écoulement des liquides et des matières pulvérulentes en augmentant la section des canalisations qui seront réalisées sans coudes brusques ni saillies internes superflues. Limiter la hauteur de la chute dans l'alimentation gravitaire. Limiter la pression et les frottements sur les guides et les rouleaux d'entraînement qui seront légèrement dépolis (textiles, papiers). Bandes transporteuses, courroies et tuyaux réalisés avec des matériaux conducteurs ;

- ☀ l'action sur les conducteurs : équipotentialité et mise à la terre de tous les éléments conducteurs ;

- ☀ l'action sur les isolants : utilisation d'éliminateurs inductifs ou électriques, humidification de l'atmosphère, produits antistatiques ;

- ☀ formation du personnel : les phénomènes électrostatiques sont généralement ignorés ou mal compris. Une première sensibilisation peut se faire par l'étude de la présente brochure et celle des ouvrages cités en référence bibliographique.

À noter que le chef d'établissement, qui s'estimerait insuffisamment armé pour procéder lui-même à l'analyse de risques et éprouverait quelques difficultés à adopter l'une ou l'autre des solutions possibles, peut éventuellement consulter les organismes qui traitent des problèmes d'électrostatique nuisible et parmi ceux-ci :

- ☀ l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), BP n°2, 60550 Verneuil-en-Halatte, qui traite spécifiquement des problèmes d'électrostatique lorsqu'ils entrent dans le cadre de la prévention des risques d'incendie ou d'explosion ;

- ❁ l'INRS qui diffuse gratuitement l'information qu'il possède sur le sujet mais ne peut procéder sur place à l'analyse de la situation que sur la demande des Caisses régionales d'assurance maladie et à condition que le problème posé présente un intérêt pour l'ensemble du monde industriel ou qu'il revête une valeur exemplaire ;
- ❁ le LCIE (Laboratoire central des industries électriques), 33, av. du Général-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses, société de services spécialisée dans les applications électriques et électroniques et les technologies connexes, avec pour principales activités l'évaluation de la conformité des produits (essais et certification), la métrologie et l'assistance technique ;
- ❁ le LEA (Laboratoire d'études aérodynamiques), université de Poitiers, BP 30179, 86962 Futuroscope-Chasseneuil, dont l'équipe Electrofluidodynamique peut contribuer à la prévention des risques électrostatiques en entreprise au cours de la conception des systèmes susceptibles d'accumuler des charges électrostatiques, ou sur les systèmes existants ayant présenté des problèmes d'origine électrostatique. L'élaboration de la solution se fait à partir d'une étude en laboratoire, complétée éventuellement par des mesures in situ ;
- ❁ Rhoditech, 24, avenue Jean-Jaurès, 69150 Décines-Charpieu Cedex, qui, par son métier de conception de procédés chimiques et pharmaceutiques, a développé une approche industrielle de la sécurité des procédés et de la lutte contre les sources d'inflammations électrostatiques ou autres. Il travaille sous contrat avec des demandeurs extérieurs à la société ;
- ❁ la SNPE Environnement, rue Lavoisier, 91710 Vert-le-Petit, qui propose aux industriels ses compétences en matière de maîtrise des risques liés à l'électricité statique : audits d'installations industrielles, expertises, formation du personnel.

## Glossaire

**Additif antistatique** : voir **Agent antistatique**.

**Agent antistatique** : Substance appliquée à la surface ou incorporée au volume d'un matériau isolant, destinée à empêcher l'apparition de charges électrostatiques ou à les éliminer [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-04-14 (1990)].

**Analyse du risque** : analyse de l'état de danger, fonction de la probabilité de l'événement considéré et de la gravité de ses effets. Pour ce qui concerne les machines au sens de la directive 89/392/CEE, la norme NF EN 1050 précise que :

- ✶ l'analyse du risque doit comprendre :
  - la détermination des limites de la machine,
  - l'identification des phénomènes dangereux,
  - l'estimation du risque ;
- ✶ que l'analyse du risque fournit l'information nécessaire à l'évaluation du risque qui permet ensuite de rendre des jugements sur la sécurité de la machine.

Une démarche équivalente peut être utilisée, dans le cas d'une installation industrielle, pour l'analyse des risques dus à l'électricité statique.

**Antistatique (matériau ou traitement)** : Matériau ou traitement qui permet une migration facile des charges électriques (de telle manière que, lorsqu'il est relié à la terre, le matériau n'accumule pas de charges électrostatiques) ou qui ne se charge pas facilement par contact [selon projet de document CEI 61340-1-2 (2000)]. On trouve également les termes : **conducteur, dissipatif ou astatique**, ces termes renvoyant à des méthodes d'essais, comme :

- ✶ pour conducteur, mesure de **résistivité volumique** ou de **résistivité superficielle** ;
- ✶ pour dissipatif, détermination du **temps de relaxation** ;
- ✶ pour astatique, test d'aptitude à la charge par frottement.

**Arc (électrique)** : Conduction gazeuse autonome dans laquelle la plupart des porteurs de charge sont des électrons (Dictionnaire multilingue CEI de l'électricité).

**Astistique (matériau)** : Matériau ayant une faible aptitude à la charge par mécanisme de contact-séparation (ou par frottement) avec d'autres matériaux [selon document CEI-61340-1-2 (1998)]. À noter que cette terminologie ne fait pas l'unanimité entre les experts, notamment dans certains pays anglo-saxons. Le mot a été retiré de la version 2000 du document CEI.

**Atmosphère explosible** : voir **Explosible**.

**Capacité** : rapport entre la charge Q et le potentiel V d'un corps conducteur électriquement isolé. L'unité SI est le farad

(symbole F), 1 F = 1 coulomb/1 volt. La capacité d'un corps isolé dans l'espace, également appelée capacité électrique propre, ne dépend que de la forme et des dimensions du corps.

**Champ électrostatique** : propriété de l'espace due à l'action à distance de charges électrostatiques, que l'on caractérise par une grandeur vectorielle notée

$$\vec{E}_s$$

Dans le cas de deux charges ponctuelles q et q', l'intensité de l'action réciproque des deux charges est donnée par la loi de Coulomb :

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{q \cdot q'}{d^2}$$

Nous pouvons distinguer deux ensembles de paramètres, un premier réduit à un seul élément q et un second contenant tout le reste, qui aura pour valeur

$$\frac{q'}{4\pi\epsilon d^2}$$

Le produit des deux mesure l'intensité de la force avec laquelle q' agit sur q ; du point de vue de la particule q, ce qui lui est extérieur,

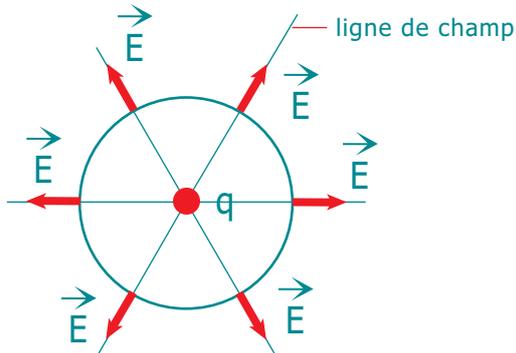
$$\frac{q'}{4\pi\epsilon d^2}$$

est considéré comme la cause de l'attraction qu'elle subit. C'est ce qu'on appelle le champ électrostatique développé par q'.

Le champ électrostatique créé par la charge q seule est un champ vectoriel que l'on va écrire :

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_r$$

Dans cette formule,  $\vec{u}_r$  est un vecteur unitaire porté par une demi-droite quelconque partant du point où est située la charge, et r est la distance à la charge q du point où l'on évalue le champ électrostatique. Sur la figure ci-après, l'ensemble des demi-droites partant de la charge ponctuelle forme un réseau de courbes (une droite est un cas particulier de courbe) que l'on appelle lignes de champ (cf. figure page suivante). Dans le cas de plusieurs charges ponctuelles (voir **Distribution de charges**), le champ électrostatique en un point quelconque de l'espace est égal à la somme vectorielle de tous les champs développés par chacune des charges prises individuellement. Le champ est dit uniforme s'il est constant (en grandeur et en direction) en tout point de l'espace. Il est dit divergent dans le cas contraire.



Lignes de champ d'une charge ponctuelle

**Charges électriques** : caractéristique de la matière associée à certaines particules élémentaires. Il existe des charges négatives et des charges positives qui sont toujours multiples d'une même charge élémentaire  $e = 1,602189 \cdot 10^{-19}$  C, négative pour l'électron, positive pour le proton. L'unité SI de charge électrique ou de quantité d'électricité est le coulomb, dont le symbole est C. Un corps dans lequel les charges positives et négatives sont égales en valeur absolue est dit électriquement neutre, sinon il est électrisé. Un atome à l'état normal est neutre, la charge négative de ses Z électrons étant égale à la charge positive Ze de son noyau. L'électrisation d'un corps peut résulter d'actions mécaniques (frottements), chimiques, thermiques, de l'action d'un rayonnement, etc., ces actions produisant un défaut ou un excès d'électrons.

**Claquage** : Annihilation, au moins temporaire, des propriétés isolantes d'un milieu isolant sous contrainte électrique [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-29 (1990)]. Ce terme est utilisé dans le domaine de l'électricité pour qualifier les phénomènes disruptifs survenant lors de l'augmentation de potentiel d'un élément d'un dispositif électrique. En effet, on ne peut pas augmenter indéfiniment la différence de potentiel (entre deux plaques parallèles par exemple) sans s'exposer à des phénomènes de claquage.

Cela s'applique, bien sûr, aux condensateurs et l'énergie W maximale libérée par un condensateur de capacité C lors d'un claquage est :

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} Q \cdot V = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

**Condensateur** : ensemble de deux conducteurs  $A_1$  et  $A_2$  (armatures) séparés par le vide, l'air, ou un isolant. Lorsque  $A_2$  entoure pratiquement complètement  $A_1$ , le condensateur est dit fermé ou à influence totale.

Soit Q la charge de l'armature interne, quand les potentiels de  $A_1$  et  $A_2$  sont respectivement  $V_1$  et  $V_2$ , le quotient

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2}$$

est appelé "capacité d'un condensateur".

✶ Pour un condensateur plan d'épaisseur diélectrique uniforme e et de permittivité  $\epsilon$ , elle vaut

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{e}$$

S étant la surface de  $A_1$ .

✶ Pour un condensateur cylindrique, c'est-à-dire composé de deux surfaces cylindriques coaxiales, elle vaut :

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

où l est la longueur des cylindres,  $R_2$  le rayon le plus grand et  $R_1$ , l'autre.

✶ Pour un condensateur sphérique, c'est-à-dire composé de deux surfaces sphériques concentriques, on a

$$C = 4\pi\epsilon \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1}$$

où  $R_2$  est le rayon le plus grand et  $R_1$ , l'autre.

**Conducteur** : qualifie un matériau incapable de conserver une charge électrostatique significative, en dehors de tout phénomène électrique extérieur, lorsqu'il est en contact avec la terre.

**Conductivité** : inverse de la résistivité. La résistivité étant notée " $\rho$ ", la conductivité qui s'exprime en siemens/mètre (S.m) et qui a pour symbole " $\sigma$ ", s'écrit :

$$\sigma = 1 / \rho$$

Noter que ces symboles ne sont pas à confondre avec ceux utilisés pour exprimer les densités volumiques et surfaciques de charges.

**Constante diélectrique** : voir **Permittivité**.

**Contact-séparation** :

Cas des matériaux conducteurs

Dans un mécanisme de type contact-séparation, lorsque la rupture de contact est simultanée en tout point de la surface commune aux deux matériaux, et si ceux-ci restent, après séparation, isolés de la terre, la charge transférée (donc la charge présente sur chacun des matériaux) est proportionnelle

à la différence de potentiel de contact  $\Delta V$ .  
Elle est donnée par la formule suivante :

$$Q = K \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e} = K \Delta V$$

où  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  représentent le **travail d'extraction** des corps considérés. Cette relation est vraie pour le contact métal-métal.

$K$  est un facteur qui dépend de l'aire de la surface de contact et des conditions expérimentales.

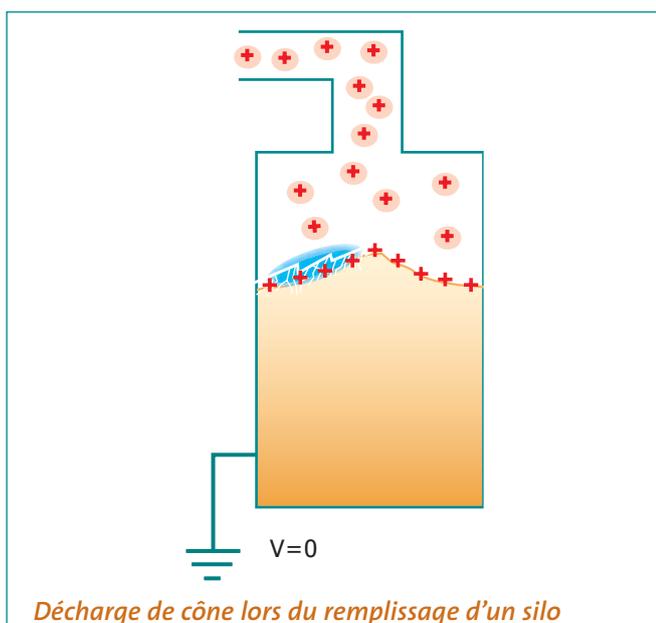
#### Cas des matériaux isolants

Pour les isolants, un raisonnement similaire peut être effectué sous réserve d'avoir à l'esprit que les phénomènes pratiques suivent souvent très mal ces hypothèses théoriques.

**Couronne** : voir **Effet de couronne**.

**Décharge** : voir **Décharge électrique**.

**Décharge de cône** (terminologie anglo-saxonne : "**cone discharge**") : phénomène disruptif pouvant se produire lors du remplissage de silos par des produits pulvérulents chargés. Ce type de décharges, illustré par le schéma ci-après, a été pour la première fois mis en évidence sur des installations industrielles par des experts allemands et suisses.



**Décharge disruptive** : ensemble des phénomènes accompagnant la rupture diélectrique d'un isolant solide, liquide ou gaz, lorsque la différence de potentiel entre deux conducteurs, séparés par cet isolant, dépasse une certaine limite. Dans le cas d'un gaz (air par exemple), lorsque la tension  $V$  croît au-delà d'une valeur  $V_d$  dite tension disruptive, le courant  $I$  croît considérablement,

les ions et les électrons acquérant une vitesse suffisante pour produire une avalanche d'ionisations par chocs des molécules du gaz. La tension disruptive (ou potentiel disruptif) varie en fonction de la pression du gaz et de la distance entre les conducteurs suivant la loi de Paschen. La décharge est accompagnée de phénomènes lumineux dus à l'excitation électronique des ions et des molécules.

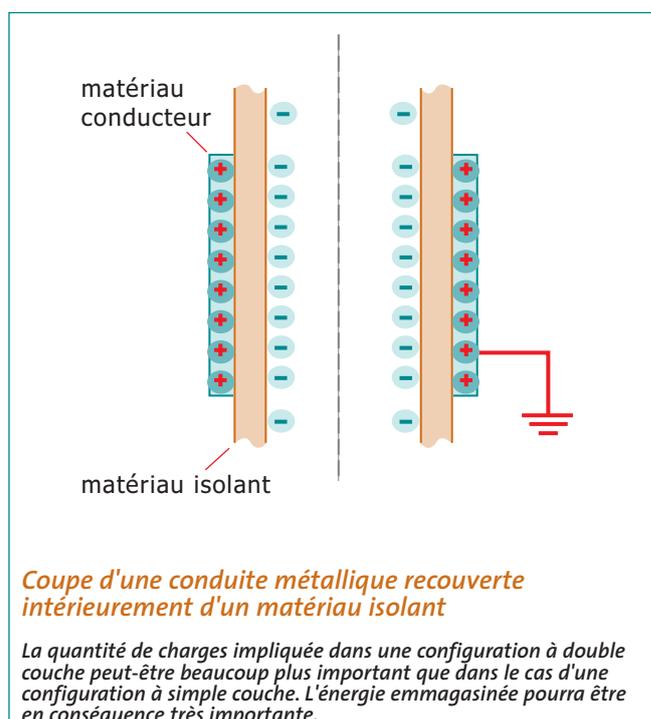
**Décharge électrique** : *Mouvement discontinu de charges électriques à travers un milieu isolant, amorcé par des avalanches électroniques et accentué par des processus secondaires* [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-33 (1990)].

**Décharge en aigrette** (terminologie anglo-saxonne : "**brush discharge**") : phénomène disruptif pouvant se produire entre une surface en matériau isolant chargée d'électricité statique et une autre surface portée à un potentiel différent (par exemple : élément conducteur mis à la terre).

**Décharge étincelle** : voir **Étincelle**.

**Décharge glissante de surface** (terminologie anglo-saxonne : "**propagating brush discharge**") : phénomène disruptif pouvant se produire entre une surface en matériau isolant formant condensateur avec une surface métallique généralement reliée à la terre (voir schéma ci-après).

L'énergie libérée dans ce type de décharge peut être considérable et de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à l'énergie libérée dans une décharge en aigrette.





**Décharge partielle** : décharge dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'isolation entre des conducteurs. Elle peut se produire au sein même de l'isolation, ou à partir d'un conducteur.

Note : Le terme "ionisation" désigne tout processus produisant des ions et ne doit pas être utilisé pour désigner les décharges partielles [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-34 (1990)].

**Diélectrique** : milieu matériel dans lequel peut exister à l'état stationnaire un champ électrique.

**Dissipatif (matériau)** : matériau qui permet à la charge de migrer sur sa surface et/ou à travers son volume en un temps qui est court comparé à l'échelle de temps des actions créant la charge ou la période de temps dans laquelle cette charge cause un problème électrostatique (d'après la CEI 61340-2-1 de 2002).

**Distribution de charges** : le champ électrostatique en un point de l'espace est la somme vectorielle des champs électrostatiques créés par chacune des charges ponctuelles d'un ensemble (somme discrète) ou par chacune des charges élémentaires d'une charge étendue (somme continue). La distribution linéique, surfacique ou volumique sera modélisée par une fonction continue d'une, deux ou trois variables. Cette fonction sera :

- ☀ une densité linéique ( $\lambda$ ) de charge ;
- ☀ une densité surfacique ( $\sigma$ ) de charge ;
- ☀ ou une densité volumique ( $\rho$ ) de charge.

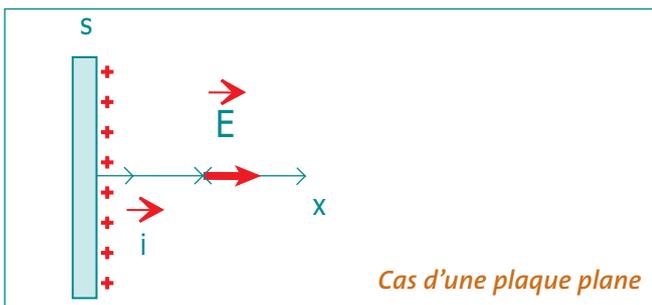
La charge totale sera exprimée selon le cas par :

$$Q = \int \lambda dl, Q = \iint \sigma ds, Q = \iiint \rho dv$$

L'expression du champ électrostatique se transformera en :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \vec{u} \frac{\lambda dl}{r^2}, \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \vec{u} \frac{\sigma ds}{r^2}, \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint \vec{u} \frac{\rho dv}{r^2}$$

### Charge étendue sur une plaque



Le potentiel et le champ électriques développés par une plaque plane A, de grande étendue S (géométrie plane infinie) portant

une charge totale Q définie par une densité superficielle  $\sigma$

$$Q = \iint_s \sigma ds$$

se détermine à l'aide du théorème de Gauss.

En travaillant dans le vide et en considérant  $\sigma$  uniforme, on obtient, pour le champ électrique,

$$\vec{E}(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon} \vec{u}$$

et pour le potentiel, où  $V_0$  est le potentiel de la surface :

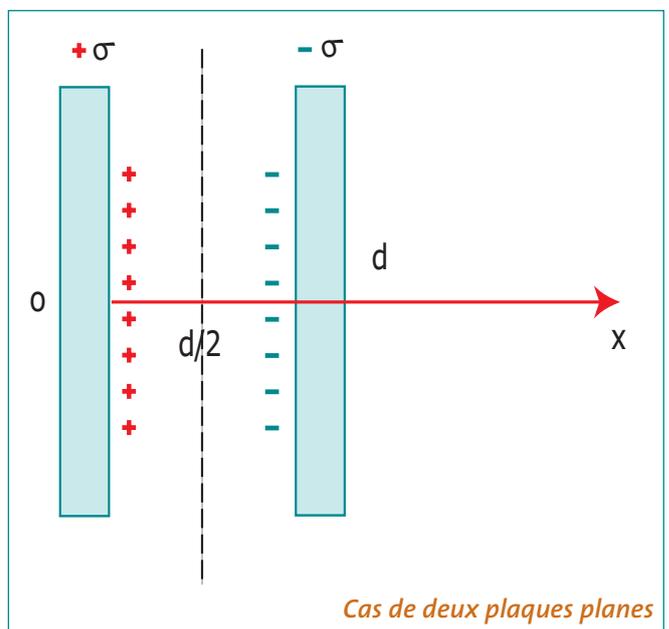
$$V = V_0 - \frac{\sigma}{2\epsilon} x$$

### Charges étendues sur deux plaques

Considérons un ensemble de deux plaques planes parallèles  $A_0$  et  $A_1$ , dont les dimensions sont grandes par rapport à la distance d qui les sépare. Elles sont séparées par le vide.  $A_0$  porte une charge Q positive de densité  $\sigma$  (son potentiel est  $V_0$ ),  $A_1$  porte une charge -Q de densité  $-\sigma$  (son potentiel est  $V_1$ ). Le potentiel et le champ électrique en tout point du domaine situé entre les plaques se calculent selon la méthode explicitée précédemment et s'expriment par :  $V_0$  est le potentiel de la surface en  $x = 0$ .

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \vec{u}$$

$$V = V_0 - \frac{\sigma}{\epsilon} x$$



**Effet de couronne** (terminologie anglo-saxonne : "corona") : *Décharges partielles dans un gaz autour d'un conducteur à fort rayon de courbure, nu ou légèrement isolé, qui crée un champ très divergent éloigné de tout autre conducteur. L'effet de couronne produit habituellement de la lumière et du bruit [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-33 (1990)].*

**Effet de pointes** : ensemble des phénomènes électrostatiques dus à l'augmentation du champ électrique au voisinage des pointes (en relation avec une augmentation de la densité superficielle des charges). Ces phénomènes apparaissent lorsque le potentiel est assez élevé et que le champ est assez intense pour produire l'excitation et l'ionisation des molécules de l'air avoisinant (**effet de couronne**, feu de Saint-Elme). Des applications telles que les éliminateurs électrostatiques, les paratonnerres, etc., utilisent ces phénomènes.

**Électricité** : branche de la physique qui étudie les actions exercées et subies par les charges électriques en repos et en mouvement.

**Électrisation** : développement de charges électriques dans un milieu.

**Électrostatique ou électricité statique** : ensemble des phénomènes et des lois relatifs aux propriétés et aux actions mutuelles des charges électriques immobiles dans un référentiel d'inertie donné.

**Étincelle** (terminologie anglo-saxonne "spark" ou "spark discharge") : décharge disruptive entre deux conducteurs à des potentiels électriques différents qui tendent ainsi à se décharger. Pour ce qui concerne les phénomènes d'origine électrostatique, les décharges par étincelle sont principalement dues à la charge électrique acquise par des parties d'équipement conductrices isolées électriquement (la notion de parties d'équipement conductrices est à prendre au sens large c'est-à-dire incluant la personne humaine, les poudres et liquides à faible résistivité, etc.). Leur énergie peut être de l'ordre du joule, voire du kilojoule.

**Étude des dangers** : étude réalisée pour satisfaire aux obligations de la réglementation des installations classées (pour les installations soumises à autorisation). L'étude des dangers entre dans le cadre d'une politique globale de prévention des risques technologiques organisée autour de quatre axes principaux :

- ☀ réduction du risque à la source ;
- ☀ amélioration des secours ;
- ☀ information du public ;
- ☀ maîtrise de l'urbanisation.

Elle expose les dangers que peuvent présenter les installations en cas d'accident (dérive de fonctionnement) et justifie les mesures propres à en réduire la probabilité d'occurrence et les effets ; elle comporte notamment :

- ☀ une analyse des dérives fonctionnelles ;
- ☀ une étude des conséquences de ces dérives sur l'environnement ;
- ☀ une détermination des moyens de prévention et de lutte.

**Explosible (atmosphère)** : *Atmosphère susceptible de devenir explosive par suite de conditions locales et opérationnelles (directive 94/9/CE, chapitre 1, article 1).*

**Explosion** : *Réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression ou les deux simultanément (normes EN 1127-1, 1997 et ISO 8421-1, 1987-03-01-1.12).*

**Explosive (atmosphère)** : *Mélange avec l'air, dans les conditions atmosphériques, de substances inflammables, sous forme de gaz, de vapeurs, de brouillards ou de poussières dans lequel, après que l'inflammation s'est produite, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé (norme EN 1127-1, 1997 et la directive 94/9/CE, chapitre 1, article 1).*

**Gallon** (abréviation : gal) : unité anglo-saxonne de volume (GB : 1 gal = 4,549 litres ; États-Unis : 1 gal = 3,7854 litres ; Canada : 1 gal = 2,272 litres).

**Gauss (théorème de)** : relation entre le flux du vecteur champ électrostatique et les charges électriques situées dans un volume délimité.

Le théorème de Gauss s'écrit sous la forme intégrale suivante :

$$\iint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon}$$

Il s'énonce : "le flux du vecteur champ électrostatique à travers toute surface fermée est égal à la somme Q de toutes les charges situées dans le volume délimité par la surface, divisé par la permittivité du milieu".

Comme exemple choisissons une sphère quelconque de rayon r et formons le produit "surface de la sphère" multiplié par "intensité du champ électrostatique sur cette sphère", nous obtenons :

$$4\pi r^2 \frac{q}{4\pi \epsilon r^2} = \frac{q}{\epsilon}$$

Le produit que nous avons formé s'appelle le flux du vecteur champ électrostatique à travers toute la sphère. Il est égal au quotient de la charge située dans la sphère par la permittivité  $\epsilon$  du milieu.

**Hybride (mélange)** : *Mélange avec l'air de substances inflammables dans des états physiques différents. Des exemples de mélanges hybrides sont les mélanges de méthane et de poussières de charbon avec l'air et les mélanges de vapeur d'essence et de gouttelettes d'essence avec l'air (d'après la norme*



EN 1127-1, 1997). Ces mélanges sont généralement constitués de gaz et de pulvérulents ou de gaz et d'aérosols liquides. Ils peuvent présenter des risques supérieurs à chacun des constituants pris séparément.

**Influence** : l'influence électrostatique est définie comme l'action électromagnétique à distance provoquant le déplacement des charges électriques d'un conducteur placé dans le champ électrostatique créé par d'autres corps chargés. Le mécanisme a pour effet d'aboutir à l'annulation du champ à l'intérieur du conducteur.

**Isolant** : substance ou corps dont la conductivité est nulle ou, en pratique, très faible.

**Liaison équipotentielle** : Liaison électrique spéciale mettant au même potentiel, ou à des potentiels voisins, des masses et des éléments **conducteurs** (décret n°88-1056 du 14 novembre 1988).

**Machine** : au sens de la directive 89/392/CEE, on entend par "machine" un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et, le cas échéant, d'actionneurs, de circuits de commande et de puissance, etc., réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, notamment pour la transformation, le traitement, le déplacement et le conditionnement d'un matériau.

Est également considéré comme "machine" un ensemble de machines qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement.

**Matière plastique** : substance synthétique formée de macromolécules de compositions très variées, pouvant être façonnée ou moulée et possédant une grande diversité de propriétés mécaniques et thermiques et en général une très faible **conductivité** électrique.

**Maxwell** (équations de) : la solution d'un problème électrique passe par la résolution d'un système des quatre équations fondamentales de l'électromagnétisme dites "équations de Maxwell" :

$$\begin{aligned}
 (1) \operatorname{div} \vec{E} &= l/\epsilon \\
 (2) \operatorname{rot} \vec{E} &= \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \\
 (3) \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\
 (4) \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \left[ \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\delta \vec{E}}{\delta t} \right]
 \end{aligned}$$

où  $\vec{E}$  est le champ électrique  
 $\vec{B}$  est le champ magnétique  
 $l$  est la densité volumique de charge  
 $\vec{j}$  est la densité de courant

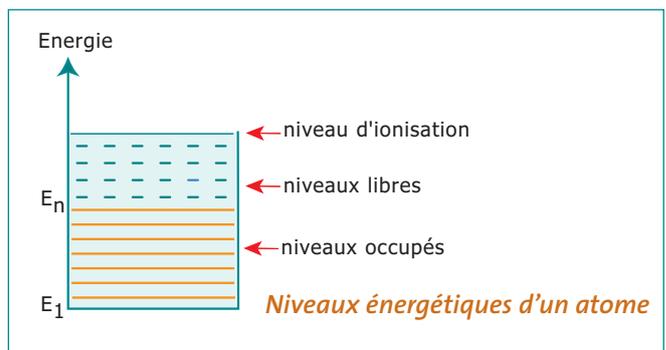
$\epsilon$  est la permittivité relative du milieu  
 $\epsilon_0$  est la permittivité du vide  
 $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide

En électrostatique, le champ magnétique est nul, ce qui permet de simplifier ainsi ces équations :

$$\operatorname{div} \vec{E} = l/\epsilon \text{ et } \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{0}$$

**Mise à la terre** : réalisation d'une liaison équipotentielle entre un corps en matériau conducteur et la terre. Par exemple, dans une installation industrielle, les parties métalliques isolées doivent être reliées à la terre de manière à éviter qu'elles puissent être portées à des potentiels différents, ce qui pourrait provoquer une décharge par **étincelle**.

**Niveaux énergétiques** : les niveaux énergétiques des électrons d'un atome imaginaire ont été représentés sur la figure suivante.



On trouve successivement en trait plein les bas niveaux énergétiques, puis les niveaux plus élevés (de  $E_1$  jusqu'à  $E_n$ ). En pointillés, on a représenté les niveaux accessibles par les électrons jusqu'au niveau maximum qui correspond à l'ionisation de l'atome, c'est-à-dire à celui qui libère l'électron de son appartenance à l'atome.

**Permittivité (ou constante diélectrique)** : grandeur caractérisant la réaction d'un milieu au champ électrique. Dans un milieu isotrope, la permittivité ( $\epsilon$ ) est un scalaire (dans un milieu anisotrope c'est une grandeur tensorielle).

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

La permittivité électrique du vide se note  $\epsilon_0$  et vaut  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m. La permittivité électrique d'un corps quelconque s'exprime par :

$\epsilon_r$  est la permittivité relative du milieu, elle vaut quelques unités pour les corps isolants (environ 2 pour la plupart des isolants) et peut valoir beaucoup plus pour d'autres corps (80 environ pour l'eau, voire plusieurs milliers pour les céramiques).

**Pointes (pouvoir des)** : voir **Effet de pointes**.

**Poisson (équation de)** : cette équation s'obtient en combinant le **théorème de Gauss** et l'équation de définition du potentiel. Elle s'écrit :

$$\operatorname{div}(\vec{\operatorname{grad}}V) = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

avec :

- $\rho$  : densité volumique de charges (en C/m<sup>3</sup>) ;
- $\varepsilon$  : permittivité du milieu (en F/m).

$$\Delta V = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

Cette équation se transforme d'après le calcul vectoriel en

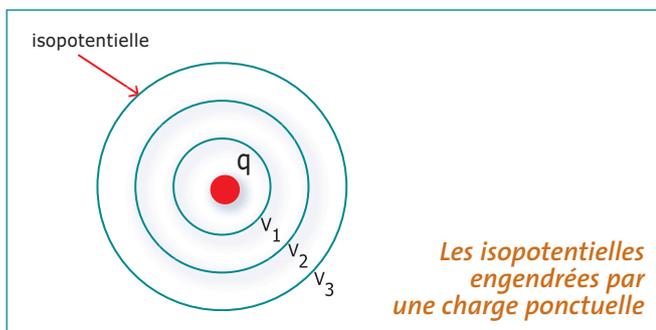
$$\Delta V = 0$$

Dans la mesure où il n'existe pas de distributions de charges dans la zone de l'espace sur laquelle  $V$  a été défini, l'équation précédente se transforme en l'équation de Laplace :

**Potentiel électrostatique** : le potentiel électrostatique en un point  $M$  de l'espace correspond au travail qu'il faut fournir contre les forces électrostatiques pour amener une charge électrique unité de l'infini au point  $M$ .

Il a été pris comme exemple le cas du champ (donc des forces) créé par une charge ponctuelle.

Au réseau des courbes de lignes de champ correspond un réseau de courbes orthogonales qui sont des lignes de potentiel constant (isopotentielles). Ce sont dans ce cas des cercles concentriques centrés sur la charge. En chacun des points de l'une quelconque de ces courbes correspond un vecteur champ électrostatique orthogonal à la courbe.



Pour un chemin quelconque (c'est-à-dire qui n'appartient pas nécessairement à un de ces cercles), la somme des produits scalaires élémentaires en tout point de ce chemin sera, par définition, la circulation du vecteur champ électrostatique qui, tout calcul fait, donne :

$$\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q}{r_1} - \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q}{r_2}$$

$A$  et  $B$  sont les extrémités du chemin parcouru situées respectivement à  $r_1$  et  $r_2$  de  $q$ .

La circulation du champ ne dépend donc que de la valeur en  $A$  et  $B$  d'une fonction appelée potentiel électrostatique  $V$  définie par :

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r}$$

Cette circulation ne dépend pas du chemin choisi (puisque'elle ne dépend que de la position des extrémités du chemin), cela revient à dire mathématiquement que la relation qui lie le champ au potentiel est de la forme :

$$\vec{E} = - \vec{\operatorname{grad}} V$$

Ce qui a été dit dans le cas d'une charge ponctuelle se généralise à une **distribution de charges**.

Le potentiel en un point quelconque est alors la somme des potentiels créés par chacune des charges prises individuellement.

**Résistance d'isolement** : Résistance mesurée, dans des conditions spécifiées, entre deux corps conducteurs séparés par un matériau isolant [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-06 (1990)].

**Résistance superficielle** : Partie de la résistance d'isolement qui est due à la conduction le long de la surface. Notes :

- ☀ la résistance superficielle est en général fortement influencée par l'environnement ;
- ☀ en général, le courant superficiel dépend fortement de la durée d'application de la tension et varie souvent d'une manière erratique. En pratique, la durée d'application de la tension est par convention d'une minute [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-09 (1990)].

**Résistance volumique (ou résistance transversale)** : Partie de la résistance d'isolement qui est due à la conduction à travers le volume, en excluant le courant superficiel [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-07 (1990)].

**Résistivité superficielle** : Résistance superficielle ramenée à une surface de forme carrée. Notes :

- ☀ la résistivité superficielle comprend l'effet d'éventuels phénomènes de polarisation aux électrodes ;
- ☀ la valeur numérique de la résistivité superficielle est indépendante de la taille du carré [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-10 (1990)].

**Résistivité volumique (ou résistivité transversale)** : résistance volumique ramenée au cube de volume unité. Le chapitre 121 du VEI, "Électromagnétisme", définit la "conductivité" comme "grandeur scalaire ou tensorielle dont le produit par le champ électrique est égal à la densité du courant de conduction", et la "résistivité" comme "inverse de la conductivité". La



résistivité volumique est une moyenne de cette grandeur sur les hétérogénéités éventuelles dans le volume incluses dans la mesure, et comprend l'effet d'éventuels phénomènes de polarisation aux électrodes [Vocabulaire électrotechnique international CEI-50-212-01-08 (1990)].

**Superconducteurs ioniques** : corps solides (RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub>, alumine bêta, etc.) dans lesquels des ions peuvent se mouvoir.

**Temps de relaxation (ou constante de temps)** : durée caractéristique d'un système physique, donnant une évaluation quantitative d'un des phénomènes de relaxation qu'il peut présenter. Si le phénomène physique est caractérisé par une grandeur notée "G" qui décroît suivant une loi exponentielle.  $\tau$  est le temps de relaxation ou constante de temps.

$$G = G_0 \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

Il est égal à la durée nécessaire pour que G soit réduit à 1/e (soit 36,8 %) de sa valeur initiale G<sub>0</sub>.

$$\tau = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \rho_v$$

Pour les liquides, la valeur du temps de relaxation des charges électrostatiques peut être déterminée par la formule.

où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide,  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du liquide,  $\rho_v$  est la résistivité volumique du liquide.

Pour les solides divisés, un raisonnement similaire peut être effectué sous réserve d'avoir à l'esprit que les phénomènes pratiques suivent souvent très mal la loi théorique.

**Terre** : masse conductrice de la terre, dont le potentiel électrique en chaque point est considéré comme égal à zéro (selon décret n°88-1056 du 14 novembre 1988).

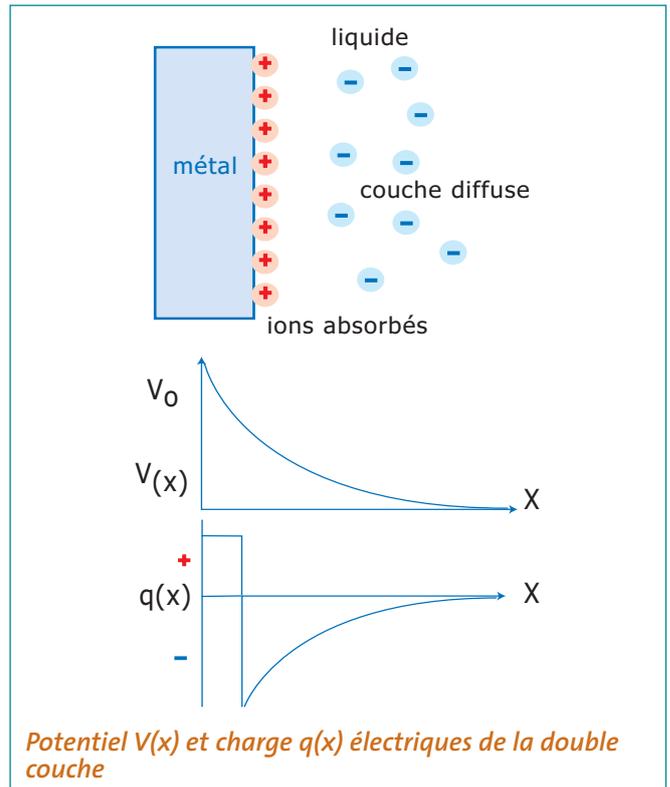
**Théorie de la double couche ionique** : phénomène d'apparition de charges électriques au contact d'un liquide et d'une paroi solide.

Dans les modèles actuels de couche double ionique, on montre que le potentiel au sein de la couche diffuse varie en fonction de l'éloignement x à la paroi suivant la loi suivante :

$$V(x) = V_0 \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \text{ avec } \delta = \left[\frac{\epsilon D}{\sigma}\right]^{1/2}$$

V<sub>0</sub> est le potentiel à la surface du solide (en volts) et  $\delta$  un paramètre qui a la dimension d'une longueur,  $\epsilon$  est la permittivité électrique du liquide, D un coefficient qui caractérise la diffusion des espèces ioniques présentes dans le liquide (la rapidité des ions à occuper le plus grand volume possible en absence de contrainte électrique) et  $\sigma$  la conductivité du liquide.

Sans être l'épaisseur réelle de la couche diffuse, bien qu'il porte ce nom,  $\delta$  donne une idée de son extension spatiale.



À titre d'exemple,  $\delta$  vaut approximativement  $10^{-8}$  mètres pour une solution aqueuse de KCl à  $10^{-3}$  moles par litre et  $10^{-4}$  mètres pour un liquide isolant comme l'essence.

L'extension spatiale de la couche diffuse dans les liquides isolants est donc de l'ordre du millimètre alors que, pour un liquide conducteur comme l'eau,  $\delta$  est de l'ordre du centième de micron.

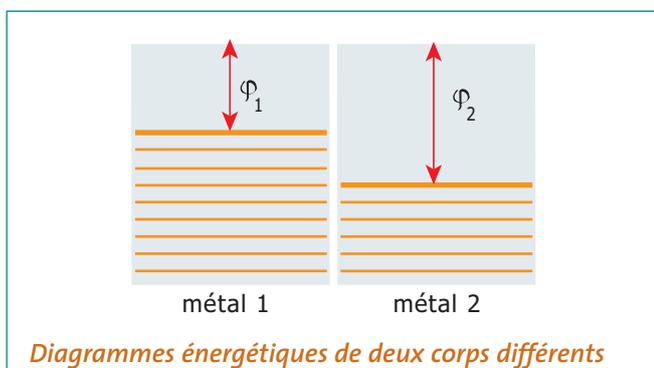
Ceci explique pourquoi les phénomènes d'électrisation apparaissent uniquement avec les liquides isolants.

En effet, la charge électrique de la couche diffuse d'un liquide isolant dans une conduite est convectée par un écoulement car elle est présente dans une zone où la vitesse du fluide n'est pas nulle. En revanche, pour un liquide conducteur, elle est trop proche de la paroi pour pouvoir être affectée par l'écoulement (la vitesse du fluide à la paroi est nulle) et la charge de la couche diffuse, dans ce cas, n'est pas convectée. Si A est l'aire de la paroi sur laquelle s'est développée une couche double alors la charge contenue dans la couche diffuse est donnée par :

$$Q = \left[\frac{\epsilon A}{\delta}\right] \cdot V_0$$

**Travail d'extraction (ou fonction de travail)** : énergie que doit acquérir un électron périphérique pour échapper à l'influence de l'atome (pour devenir libre). C'est une caractéristique importante du métal qui vaut entre 4 et 5eV pour beaucoup de métaux (1 eV est une unité d'énergie qui vaut  $1,6 \cdot 10^{-19}$ J). En effet,

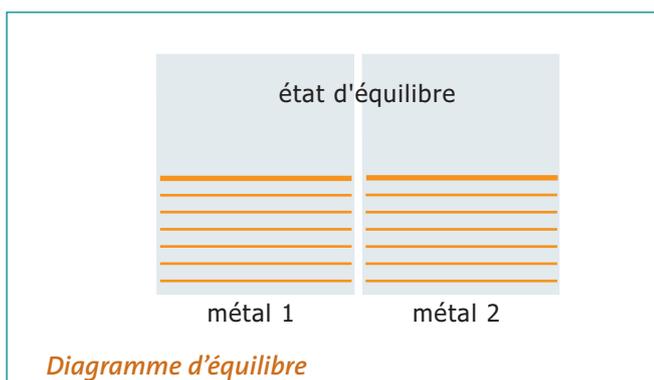
lors du contact entre dsdeux métaux différents, un électron pourra sortir de l'influence de l'atome auquel il appartient s'il acquiert une énergie supérieure à l'énergie dite d'extraction. Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté les fonctions de travail  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  des métaux 1 et 2.



Quand les deux métaux sont éloignés l'un de l'autre, même de quelques millimètres, aucun transfert d'électrons ne peut s'effectuer d'un métal vers l'autre. Si, en revanche, les deux métaux sont en contact à l'endroit de leur interface on va observer d'un côté de l'interface un excès de charges positives et de l'autre un excès de même intensité de charges négatives. Cette polarisation est le résultat d'un transfert d'électrons entre les deux métaux. L'explication de ce transfert réside dans le fait que, dans cette zone de contact, les électrons des métaux 1 et 2 acquièrent facilement une énergie suffisante pour sortir de l'influence du métal auquel ils appartiennent.

Dans ce mouvement incessant des électrons entre les métaux 1 et 2, sachant qu'il est plus facile (qu'il faut moins d'énergie) pour un électron 1 de sortir de 1 que pour un électron 2 de sortir de 2, le bilan global net des échanges fera état d'un nombre supérieur d'électrons en 2 qu'en 1, d'où la polarisation.

L'équilibre aura lieu quand le niveau énergétique maximum occupé par un électron sera identique dans les deux matériaux. Il y aura eu transfert d'électrons de 1 vers 2 donc apparition d'une charge négative sur 2 et positive sur 1.



À l'équilibre, il existe entre les deux matériaux une différence de potentiel  $\Delta V$  égale à

$$\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e}$$

c'est la différence de potentiel de contact.

**Triboélectricité** : ensemble de phénomènes relatifs aux charges électriques séparées par un processus de type **contact-séparation** dont le frottement constitue un cas particulier. On désigne ainsi tout mécanisme au cours duquel sont séparées deux surfaces ayant été, même brièvement, en contact l'une avec l'autre. En effet, lorsque deux surfaces sont en contact, des mécanismes de transfert de charges se produisent. Bien que la charge totale reste inchangée, la redistribution de charges résultant de ce transfert aura pour conséquence la création d'une double couche au niveau de la zone de contact. La séparation des deux surfaces initialement en contact peut conduire (surfaces isolantes par exemple) à une disparité de charges. Une des surfaces est alors chargée positivement et l'autre négativement. L'augmentation de la vitesse de séparation, l'augmentation de la résistivité des corps en présence, l'accroissement du différentiel de leur fonction de travail, sont des facteurs favorisant le mécanisme de charge triboélectrique.

#### Unités du système international utilisées en électrostatique :

Elles se déduisent toutes de :

- ☛ l'unité de charge électrique, le coulomb (symbole C) ;
- ☛ l'unité du potentiel, le volt (symbole V) ;
- ☛ des unités de la mécanique, le mètre (m), la seconde (s) et le kilogramme (kg).

On déduit :

- ☛ l'unité de courant électrique, l'ampère (A).  $1A = 1C/s$  ;
- ☛ l'unité de champ électrique, le volt par mètre (V/m).

D'autres unités seront utiles :

- ☛ l'unité de capacité électrique, le farad (F).  $1F = 1C/V$  ;
- ☛ l'unité de résistance électrique, l'ohm ( $\Omega$ ).  $1\Omega = 1V/A$  ;
- ☛ l'unité de conductance électrique, le siemens (S).  
 $1S = 1A/V = 1\Omega^{-1}$  ;
- ☛ l'unité de conductivité électrique, l' $\Omega^{-1}m^{-1}$ , qui se lit ohm moins un (multiplié par) mètre moins un. La conductivité s'exprime aussi en siemens par mètre (S/m) ;
- ☛ l'unité de résistivité électrique : l'ohm mètre ( $\Omega m$ ).

## Documents normatifs

*Cette liste de normes est à jour à la date de publication du présent ouvrage. Pour des dates postérieures, il convient de vérifier auprès de l'AFNOR ([www.afnor.fr](http://www.afnor.fr)).*

### Normes internationales

**CEI 61000-4-2** (2000) Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2 : Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques (Édition 1 – 1995 consolidée par les amendements 1 – 1998 et 2 – 2000 – Remplace la CEI 61000-4-2 éd. 1.1 (consolidée) – 1999).

**CEI 61340-2-1** (2002) Électrostatique – Partie 2-1 : Méthodes de mesure – Capacité des matériaux et des produits à dissiper des charges électrostatiques (NF C 20-790-2-1-2003).

**CEI 61340-2-2** Rapport technique. Ed. 1.0 (2000) Électrostatique – Partie 2-2 : Méthodes de mesure – Mesure de l'aptitude à la charge.

**CEI 61340-2-3** Ed. 1.0 (2000) Électrostatique – Partie 2-3 : Méthodes d'essais pour la détermination de la résistance et de la résistivité des matériaux plans solides destinés à éviter les charges électrostatiques (NF C 20-790-2-3-2001).

**CEI 61340-3-1** (2002) Électrostatique – Partie 3-1 : Méthodes pour la simulation des effets électrostatiques – Modèle du corps humain (HBM) – Essais de composants.

**CEI 61340-3-2** (2002) Électrostatique – Partie 3-2 : Méthodes pour la simulation des effets électrostatiques – Modèles de machine (MM) – Essais de composants.

**CEI 61340-4-1** (1995) : Électrostatique – Partie 4 : Méthodes d'essai normalisées pour applications spécifiques – Section 1 : Comportement électrostatique des revêtements de sol et des sols finis (NF C 20-790-4-1-1997).

**CEI 61340-4-3** Ed. 1.0 (2001) : Électrostatique – Partie 4-3 : Méthodes d'essai normalisées pour des applications spécifiques – Chaussures.

**CEI 61340-5-1** (1998) : Rapport technique – Électrostatique – Partie 5-1 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Prescriptions générales (+ Corrigendum février 1998 et Corrigendum décembre 2002) (NF C 20-790-5-1-2001).

**CEI 61340-5-2** (1998) : Spécifications techniques – Électrostatique – Partie 5-2 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Guide d'utilisation (NF C 20-790-5-2-2001).

**CEI 61087** (1991) : Guide d'évaluation des décharges provenant d'une surface chargée.

**CEI 61241-2-2** (1993) : Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles – Partie 2 : Méthodes d'essais – Section 2 : Méthode de détermination de la résistivité électrique des couches de poussières.

**ISO 284** (1982) : Courroies transporteuses – Conductivité électrique – Spécification et méthode d'essai.

**ISO 1813** (1998) : Transmissions par courroies – Courroies striées, courroies trapézoïdales simples et jumelées, y compris celles à sections larges et hexagonales – Conductivité électrique des courroies anti-électrostatiques – Spécifications et méthodes d'essai.

**ISO/TR 6356** (1982) : Revêtements de sol textiles – Évaluation de la propension à l'accumulation des charges électrostatiques – Essai du marcheur.

### Normes européennes

**EN 292-1** (1991) : Sécurité des machines – Concepts fondamentaux, principes généraux pour la conception – Partie 1 : Terminologie fondamentale, méthodologie.

**EN 1127-1** (1997) : Atmosphères explosibles – Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion – Partie 1 : Notions fondamentales.

**EN 1149-1** (1998) : Vêtements de protection – Propriétés électrostatiques – Partie 1 : Résistivité de surface (méthode d'essai et exigences).

**EN 1149-2** (1997) : Vêtements de protection – Propriétés électrostatiques – Partie 2 : Méthode d'essai pour le mesurage de la résistance électrique à travers un matériau isolant (résistance transversale).

**EN 1081** (1998) : Revêtement de sol résilients – Détermination de la résistance électrique.

**EN 1815** (1998) : Revêtement de sol résilients et textiles – Évaluation de la propension à l'accumulation de charges électrostatiques.

**Pr EN 12981** (1997) : Installations d'application – Cabines d'application par projection de peinture en poudre organique – Exigences de sécurité.



**EN 13463-1** (2002) : Matériels non électriques pour utilisation en atmosphères explosibles – Partie 1 : Prescriptions et méthode de base.

**EN 20284** (1993) : Courroies transporteuses – Conductivité électrique – Spécification et méthode d'essai.

**EN 50014** (1991) : Matériels électriques pour atmosphères explosibles – Règles générales (+ Corrigendum avril 2003).

**EN 50050** (2002) : Appareillage électrique pour atmosphère explosible – Équipement manuel de projection électrostatique.

**EN 50053-1** (1987) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 1 : Pistolets manuels de projection électrostatique de peinture avec une énergie limite de 0,24 mJ et leur matériel associé.

**EN 50053-2** (1992) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 2 : Pistolets manuels de projection électrostatique de poudre avec une énergie limite de 5 mJ et leur matériel associé.

**EN 50053-3** (1992) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 3 : Pistolets manuels de projection électrostatique de flock avec une énergie limite de 0,24 mJ ou 5 mJ et leur matériel.

**EN 50059** (1993) : Spécifications pour les équipements manuels de projection électrostatique de produits inflammables pour peinture et finition.

**EN 50176** (1998) : Équipements automatiques de projection électrostatique de liquides inflammables.

**EN 50177** (1998) : Installations automatiques de projection électrostatique de poudre de revêtement inflammable.

**Pr EN 50223** (1996) : Équipements automatiques de projection électrostatique de produit flock inflammable.

**EN 50303** (2000) : Appareils du groupe 1 de catégorie M1 destinés à rester en opération dans des atmosphères exposées au grisou et/ou à la poussière de charbon.

**CENELEC Ro44-001** (1999) : Sécurité des machines – Guide pratique – Guide et recommandations pour éviter les risques dus à l'électricité statique.

**EN 50348** (2002) : Matériel de pulvérisation électrostatique automatique pour matériau de pulvérisation liquide non inflammable.

**EN 60255-22-2** (1997) : Relais électriques - Partie 22 : Essais d'influence électrique concernant les relais de mesure et dispositifs de protection - Section 2 : essais de décharges électrostatiques.

**EN 61340-2-1** (2003) : Électrostatique – Partie 2-1 : Méthodes de mesure - Capacité des matériaux et des produits à dissiper des charges électrostatiques.

**EN 61340-2-3** (2001) : Électrostatique – Partie 2-3 : Méthodes d'essais pour la détermination de la résistance et la résistivité des matériaux planaires solides destinés à éviter les charges.

**EN 61340-4-3** (2002) : Électrostatique – Partie 4-3 : Méthodes d'essai normalisées pour des applications spécifiques – Chaussures.

**EN 61340-5-1** (2001) : Électrostatique – Partie 5-1 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Prescriptions générales.

**EN 61340-5-2** (2001) : Électrostatique – Partie 5-2 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Guide d'utilisation.

## Normes françaises

**NF EN 1081** (1998) : Revêtement de sol résilients – Détermination de la résistance électrique.

**NF EN 1149-1** (1996) : Vêtements de protection – Propriétés électrostatiques – Partie 1 : Résistivité de surface (méthodes d'essais et exigences).

**NF EN 1149-2** (1997) : Vêtements de protection – Propriétés électrostatiques – Partie 2 : Méthode d'essai pour le mesurage de la résistance électrique à travers un matériau (résistance verticale).

**NF EN 1815** (1998) : Revêtement de sol résilients et textiles – Évaluation de la propension à l'accumulation de charges électrostatiques.

**NF EN 12882** (2002) : Courroies transporteuses à usage général – Prescriptions de sécurité électrique et protection contre l'inflammabilité.

**NF EN 20284** (1993) : Courroies transporteuses – Conductivité électrique – Spécification et méthode d'essai.

**NF E 74-400** (1998) : Outils à main revêtus pour travail en atmosphères explosibles.

**NF C 20-790-2-1** (2003) : Électrostatique – Partie 2-1 : Méthodes de mesure - Capacité des matériaux et des produits à dissiper des charges électrostatiques.

**NF C 20790-2-3** (2001) : Électrostatique – Partie 2-3 : Méthodes d'essais pour la détermination de la résistance et la résistivité des matériaux planaires solides destinés à éviter les charges.

**NF C 20790-4-1** (1997) : Électrostatique – Partie 4 : Méthodes d'essai normalisées pour applications spécifiques – Section 1 : Comportement électrostatique des revêtements de sol et des sols finis.

**NF C 20790-4-3** (2002) : Électrostatique – Partie 4-3 : Méthodes d'essai normalisées pour des applications spécifiques – Chaussures.

**NF C 20790-5-1** (2001) : Électrostatique – Partie 5-1 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Prescriptions générales.

**NF C 20790-5-2** (2001) : Électrostatique – Partie 5-2 : Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Guide d'utilisation.

**NF C 23-548** (2002) : Matériel de pulvérisation électrostatique automatique pour matériau de pulvérisation liquide non inflammable.

**NF C 23-550** (2002) : Matériel électrique pour atmosphère explosible – Équipement manuel de projection électrostatique.

**NF C 23-553-1** (2002) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 1 : Pistolets manuels de projection électrostatique de peinture avec une énergie limite de 0,24 mJ et leur matériel associé.

**NF C 23-553-2** (1987) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 2 : Pistolets manuels de projection électrostatique de poudre avec une énergie limite de 5 mJ et leur matériel associé.

**NF C 23-553-3** (1992) : Règles de sélection, d'installation et d'utilisation des équipements de projection électrostatique pour produits inflammables – Partie 3 : Pistolets manuels de projection électrostatique de flock avec une énergie limite de 0,24 mJ ou 5 mJ et leur matériel.

**NF C 23-559** (1993) : Spécifications pour les équipements manuels de projection électrostatique de produits inflammables pour peinture et finition.

**NF C 23-5/7/6** (1998) : Équipements automatiques de projection électrostatique de liquides inflammables.

**NF C 45-205-2** (1997) : Relais électriques – Partie 22 : Essais d'influence électrique concernant les relais de mesure et dispositifs de protection - Section 2 : Essais de décharges électrostatiques.

**UTE C 79-138** (1999) : Sécurité des machines – Guide pratique – Guide et recommandations pour éviter les risques dus à l'électricité statique.

# Bibliographie

Les références bibliographiques sont classées par ordre alphabétique dans la succession des chapitres du présent ouvrage.

## Chapitre 1

### Figuier L.

Les merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes, Furne, Jouvet et Cie, 1867.

### King R., Magid J.

Industrial Hazard and Safety handbook, Newnes-Butterworths, 1979.

### Medard L.

Les explosifs occasionnels, vol. 1, Propriétés, 1987.

### Moore A. D.

Electrostatics and its applications, John Wiley & Sons Inc., 1973.

## Chapitre 2

### Bia (Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit)

BIA-Report 12/97, Brenn und Explosionskenngrößen von Stäuben, novembre 1997, ISBN 3-88383-468-8.

### British Standards Institution

BS 5958, Code of practice for control of undesirable static electricity, 1991.

### Bruhat J., Joyal M.

Cours de physique générale, vol. III, Électricité, Masson et Cie, 1948.

### Glor M.

Electrostatic Hazards in Powder Handling, Research Studies Press LTD, John Wiley & Sons Inc., 1988.

### Haase H.

Electrostatic hazards ; their evaluation and control, Verlag-Chemie, 1977.

### Harper W. R.

Contact and Frictional Electrification. Monographs on the Physics and Chemistry of Materials, Clarendon Press, 1967.

### Inrs

Les mélanges explosifs. Partie I. Gaz-vapeurs, INRS, ED 911, 2002.

### Inrs

Réactions chimiques dangereuses, INRS, ED 697, 2003.

### National Bureau of Standards

Table of Dielectric Constants of Pure Liquids, NBS circular N°514, US Department of Commerce, août 1951.

### Movilliat P.

Mesure de l'énergie d'inflammation de mélanges gazeux par décharge capacitive ; inflammation par décharge d'une personne chargée d'électricité statique, Journal of Electrostatics, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979, 6, pp. 307-331.

### Peek F. W.

Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1929.

### Taylor D. M., Secker P. E.

Industrial Electrostatics, Fundamentals and Measurements, John Wiley & Sons Inc., 1994.

### Thumerel M.

L'électricité statique, Comité technique régional de la métallurgie, 1980.

## Chapitre 3

### 2nd World Seminar

on the explosion phenomenon and on the application of explosion protection techniques in practice, Explosion and explosion safety matters, Europex, 4 au 8 mars 1996.

### Hazardous Cargo Bulletin

novembre 1989, p. 77.

### Hazardous Cargo Bulletin

mai 1989, p. 73.

### Hazardous Cargo Bulletin

octobre 1987, pp. 106-109.

### Lüttgens G., Wilson N.

Electrostatic Hazard, Butterworths-Heinemann, 1997.

### Lüttgens G.

Collection of accidents caused by static electricity, Journal of Electrostatics, Elsevier Science Publishers, 1985, 16, pp. 247-255.

### Marris R.

Tanker driver engulfed in flames when loading gas oil, Journal of the association for petroleum and explosives administration, 1994, 32, 1, p. 9.

### National Transportation Safety Board

Marine accident report, Explosion aboard the US barge TTT 103, Pascagoula, NTSB/MAR-87/05, PB87-916405, Reproduced by US Department of Commerce, Mississippi, 31 juillet 1986.

### Silva M.

An assessment of the flammability and explosion potential of transuranic waste, Waste and spent fuel management edited by E.G. Silver, Nuclear safety, avril-juin 1992, 33, 2, pp. 220-228.

### Tabata Y., T. Kodama T., T. Kotoyori T.

Explosion hazards of chlorine drying towers. Journal of Hazardous Materials, Elsevier Science Publishers, 1987, 17, pp. 47-59.

## Chapitre 4

### 3<sup>e</sup> Norm'opinion

Les ions négatifs sont-ils bénéfiques ou néfastes à la santé de l'homme ? Le courrier de 3<sup>e</sup> Normelec, 40, janvier 1990.

### Communautés européennes

Directive 1999/92/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives (quinzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE), Journal officiel des Communautés européennes, 28 janvier 2000, L 23/57 à L 23/64.

**Communautés européennes**

Directive 94/9/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 mars 1994 concernant le rapprochement des législations des États membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles, Journal officiel des Communautés européennes, 19 avril 1994, L 100/1 à L 100/29.

**Communautés européennes**

Directive du Conseil du 14 juin 1989 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux machines, 89/392/CEE, Journal officiel des Communautés européennes, 29 juin 1989, L 183/9 à L 183/32.

**Direction générale de la santé**

Avis relatif aux appareils dits épurateurs autonomes et aéro-ioniseurs, avis du Conseil supérieur d'hygiène public de France, Section évaluation des risques de l'environnement sur la santé, séance du 25 novembre 1992, NOR : SANP9210383V (non paru au Journal officiel).

**Gilet J.-C., Laforest J.-C., Méreau P., Vandevyver B.,**

Ionisation négative de l'air, Synthèse bibliographique et enquête exploratoire en entreprise, *Cahiers de notes documentaires*, INRS, 146, 1<sup>er</sup> trimestre 1992, pp. 15-26.

**Jarry J., Guionnet D.**

Risque électrostatique dans l'industrie chimique et agroalimentaire ; retour d'expérience et cadre réglementaire, Société française d'électrostatique, Poitiers-Futuroscope, 4-6 juillet 1999.

**Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement**

Arrêté du 15 juin 2000 modifiant l'arrêté du 29 juillet 1998 relatif aux silos et aux installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires ou tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables.

**Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement**

Arrêté du 29 juillet 1998 relatif aux silos et aux installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires ou tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables.

**Ministère de l'Industrie**

Arrêté du 4 septembre 1967 (JO du 6 octobre) modifié par l'arrêté du 12 septembre 1973 (JO du 22) modifié par arrêté du 19 novembre 1975 (JONC du 23 janvier 1976) relatif aux règles d'aménagement et d'exploitation des usines de traitement de pétrole brut de ses dérivés et résidus, reproduit dans brochure n°1305, Journal officiel, 26, rue Desaix, 75732 Paris Cedex 15. Décret N°96-1010 du 19 novembre 1996 relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible (JO, 24 novembre 1996, pp. 17141-17151).

**Ministère du Travail**

Circulaire TR 22/49 du 15-11-49 relative à la prévention des dangers de l'électricité statique, Dictionnaire permanent sécurité et conditions de travail, feuillet 33 (25 février 1993).

**Chapitre 5****Blythe A.R., Reddish W.**

Propagating Brush Discharges, *Ins. Of Phys. Conf.*, 48, 1979.

**Chaillot H.**

La sécurité dans la distribution des hydrocarbures liquides, Technip, 1966.

**Gibson N.**

Statistical electrostatic and industrial hazard under control, *Journal of Electrostatics*, Elsevier Science Publishers, 1997, 40-41, pp. 21-30.

**Guionnet D.**

Risque électrostatique dans les silos, Journée d'information "silos et leurs équipements", Ministère de l'Environnement, 13 mars 1997.

**Inrs**

L'électricité statique. INRS, ED 874, 2003.

**Lüttgens G., Wilson N.**

Electrostatic Hazard, Butterworths-Heinemann, 1997.

**Post L., Lüttgens G., Maurer B., Glor M.**

Prévention des risques d'inflammation dus aux charges d'électricité statique lors de la pulvérisation des liquides sous haute pression, traduit de Die Berufsgenossenschaft, traduction INRS 40-83, 1983.

**Touchard G.**

Risque électrostatique dans les procédés industriels, Société française d'électrostatique, 2<sup>e</sup> Conférence sur l'électrostatique, Montpellier, 10 au 11 juillet 2000.

**Chapitre 6****Centurioni L., Coletti G., Torello E.**

Charge decay measurements in insulating polymer films to investigate the degradation due to surface partial discharges, Société française d'électrostatique, 2<sup>e</sup> Conférence sur l'électrostatique, Montpellier, 10 au 11 juillet 2000.

**Greason W.D.**

Effect of discharge electrode and body geometry on the relative probability and severity of the ESD event in electronic system, *Journal of Electrostatics*, Elsevier Science Publishers, 24, 2, 1990.

**Sylvestre A., Mage L., Roux J.-P.**

Caractérisation de revêtements antistatiques pour des applications en micro-électronique, Société française d'électrostatique, 2<sup>e</sup> Conférence sur l'électrostatique, Montpellier, 10 au 11 juillet 2000.



## Liste des fournisseurs connus de l'INRS

### Produits fabriqués

#### Appareils de contrôle et de mesure

3M France  
Boussey control  
Elcowa  
Eltex France  
F. Badina  
Mjb  
Sdep  
Simco  
Sjm Eurostat

#### Blouses

Sdep

#### Chaussures antistatiques

Sdep

#### Détecteurs de charges électriques

3M France  
Boussey control  
Elcowa  
Eltex France  
Mjb  
Sdep  
Simco

#### Éliminateurs électriques

3M France  
Boussey control  
Elcowa  
Eltex France  
F. Badina  
Mjb  
Sdep  
Simco

#### Éliminateurs inductifs

Boussey control  
Carbone lorraine  
Eltex France

#### Emballages

Sdep

#### Injecteurs de charges électrostatiques neutralisantes

Badina F.  
Elcowa  
Sdep  
Simco

#### Instrumentations

Sdep  
Badina F.

#### Nettoyeurs de films, brosses

Elcowa  
Eltex France  
Sdep  
Simco  
3M France  
Boussey control  
Mjb  
Sdep  
Simco  
Sjm Eurostat

#### Produits antistatiques

#### Tapis conducteurs, bracelets

3M France  
Mjb  
Sdep  
Simco  
Sjm Eurostat

#### Revêtements

3M France  
Sdep

#### Sièges

Sdep

#### Signalisation

Sdep

#### Stockage

Sdep  
Sjm Eurostat

## Adresse des fournisseurs

Nom	Adresse	Téléphone	Fax	E-mail/Internet
F. Badina Electrostatic SA	5, rue Pierre-et-Marie-Curie ZA La Vigie 67540 Ostwald	03 88 55 75 00	03 88 55 75 01	info@badina.com
Boussey Control	10, rue d'Abrantès 21500 Montbard	03 80 89 11 10	03 80 92 17 36	boussey.c@wanadoo.fr
Carbone Lorraine	41, rue Jean-Jaurès BP 148 92231 Gennevilliers Cedex	01 41 85 45 08	01 41 85 49 51	www.carbonelorraine.com
Elcowa	27, rue de Ruelisheim BP 2476 68057 Mulhouse Cedex 02	03 89 57 35 73	03 89 57 17 18	info@elcowa.fr
Elcowa Paris	Bâtiment n° 3 Zone industrielle 3, allée des Gurays 91124 Palaiseau Cedex	01 69 30 75 62	01 69 30 75 59	agence.paris@elcowa.fr
Eltex	44, rue Philibert-Caux 76420 Bihorel	02 35 12 11 66	02 35 12 11 67	sales@eltex.de
Mjb	46, rue des Vieilles-Vignes Croissy Beaubourg 77437 Marne-la-Vallée Cedex 2	01 64 62 68 00	01 64 62 14 84	www.mjb.fr
Sjm Eurostat	45, route d'Orgelet 39130 Pont-de-Poitte	03 84 87 02 39	03 84 48 30 00	service.client@ sjm-eurostat.com
Sdep	550, avenue de la Mauldre 78681 Épône Cedex	01 30 90 00 00	01 30 90 09 09	sdepesd@aol.com
Techni industries France	31, rue Louis-Dupré 94100 Saint-Maur-des-Fossés	01 48 89 18 30	01 48 89 56 54	www.technifr.com
3M France	Boulevard de l'Oise 95006 Cergy-Pontoise Cedex	01 30 31 61 61	01 30 31 68 54	www.3m.com



L'électricité statique fait largement partie de notre vie quotidienne : photocopie, peinture, pulvérisation, dépoussiérage, etc.

Directement liée à la structure atomique des matières utilisées ou traitées dans l'industrie, elle se crée spontanément, dans certaines conditions, au cours d'opérations de fabrication ou de manutention. Toutes les entreprises sont visées : invisible, discrète, l'électricité statique se manifeste partout, souvent d'une façon anodine mais toujours insidieuse.

Cette brochure constitue un document de synthèse qui couvre l'ensemble des notions de base et traite ensuite, de manière exhaustive, les accidents d'origine électrostatique, la réglementation, les mesures de prévention et de protection illustrées par de nombreux exemples.

Rédigée par un groupe d'experts, elle est destinée aux responsables chargés de la sécurité des installations, bureaux d'études, services techniques, concepteurs de matériels, équipements et systèmes de prévention.



Institut national de recherche et de sécurité  
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles  
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00  
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr) • e-mail : [info@inrs.fr](mailto:info@inrs.fr)

**Édition INRS ED 874**

2<sup>e</sup> édition • juillet 2004 • 10 000 ex. • ISBN 2-7389-1196-X