



Phénomènes électrostatiques

Risques associés et prévention

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 Cnam, les Carsat, Cramif, 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, instances représentatives du personnel, 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, sites Internet... Les publications de l'INRS sont diffusées par les Carsat. 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 Cnam et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par la Cnam sur le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France 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, instances représentatives du personnel, 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 trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2019.

Conception graphique : Béatrice-Anne Fournier. Illustrations : Francis Metzger, sauf page 47 David Savatier. Photo de couverture : DR.

Phénomènes électrostatiques

Risques associés et prévention

Patrick Moureaux,
Jean-Louis Poyard,
INRS



Cette brochure a été élaborée sur la base d'un document INRS intitulé « Électricité statique » (ED 874) qui n'est plus réédité.

Les auteurs remercient Benoît Sallé (INRS) pour ses remarques et avis d'expert.



© DR

L'électricité statique est un phénomène qui est connu depuis très longtemps. En 600 av. J.-C., Thalès de Milet décrit ses effets. L'électricité statique est avant tout connue au quotidien comme un phénomène parasite (étincelles, vêtements qui collent à la peau, cheveux « électriques ») mais est aussi utilisée dans de nombreux procédés : photocopie, peinture, dépoussiérage. Directement liée à la structure atomique de la matière, elle se crée spontanément, dans certaines conditions, au cours d'opérations de fabrication ou de manutention.

L'intérêt qui lui est porté est directement lié à l'utilisation, dans divers domaines, 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 être à l'origine de différents types de problèmes, tels que :

- adhérence de poussières et d'impuretés,
- pannes et dysfonctionnements d'équipements électroniques,
- désagréments et inconfort des travailleurs,
- accidents de personnes comme, par exemple, des chutes de hauteur,
- accidents majeurs comme des incendies, des explosions...

Table des matières

1. Notions de bases	6
1.1. Principes généraux	8
1.1.1. La charge électrique	8
1.1.2. L'électricité statique	8
1.1.3. Conducteurs et isolants	9
1.1.3.1. Les solides	9
1.1.3.2. Les liquides	10
1.1.3.3. Les gaz	10
1.1.4. Mesures et détection de grandeurs électrostatiques	10
1.2. Phénomènes d'électrisation	11
1.2.1. Mécanismes d'apparition de charges	11
1.2.1.1. Entre solides	11
1.2.1.2. Entre liquide et solide	12
1.2.2. Électrisation par frottement	13
1.2.3. Électrisation par transfert	13
1.2.4. Électrisation par influence	14
1.2.5. Électrisation par effet de couronne	14
1.2.6. Électrisation par écoulement d'un liquide	15
1.3. Accumulation et dissipation des charges	15
1.3.1. Notions générales	15
1.3.2. Cas des solides	16
1.3.2. Cas des matériaux granulaires	16
1.3.4. Cas des liquides	17
1.3.5. Cas des gaz	18
1.4. Phénomènes disruptifs	18
1.4.1. Loi de Paschen	18
1.4.2. Cas des gaz rares	19
1.4.3. Les mécanismes de la décharge disruptive	19
1.4.4. Décharges d'origine électrostatique	19
1.4.4.1. Les différents types de décharges	19
1.4.4.2. Décharge étincelle	19
1.4.4.3. Décharge en aigrette	21
1.4.4.4. Décharge glissante de surface	21
1.4.4.5. Décharge de cône	23
1.4.4.6. Décharge type « foudre »	23
2. Accidents d'origine électrostatique	24
2.1. Principales causes d'accidents	26
2.2. Exemples d'accidents	26

3. Analyse du risque électrostatique et prévention	28
3.1. Mesures générales de prévention et de protection	28
3.1.1. Organisation	30
3.1.1.1. Acteurs	30
3.1.1.2. Intégration de la sécurité	30
3.1.1.3. Formation	30
3.1.1.4. Vérifications périodiques	30
3.1.2. Risque d'incendie et d'explosion	30
3.1.2.1. Mécanismes	30
3.1.2.2. Énergie minimale d'inflammation	30
3.1.2.3. Méthode d'analyse	31
3.1.3. Prévention des décharges disruptives	32
3.1.4. Mesures pour prévenir la production et l'accumulation de charges	32
3.1.4.1. Réduction des frottements	32
3.1.4.2. Mise à la terre	32
3.1.4.3. Augmentation de la conductivité des corps isolants	33
3.1.4.4. Humidification de l'atmosphère	34
3.1.4.5. Neutralisation des charges	34
4. Exemples de situations à risque	36
4.1. Machines à imprimer	38
4.2. Machines à enduire	38
4.3. Fabrication de films photographiques	38
4.4. Machines textiles et industrie du papier	38
4.5. Stockage et manutention de liquides inflammables	39
4.6. Remplissage et dépotage de citernes routières	39
4.7. Détente de gaz comprimés ou liquéfiés	40
4.8. Nettoyage au jet de vapeur	40
4.9. Peinture au pistolet	41
4.10. Opération de traitement et de manutention de particules solides	41
4.11. Outils à main	41
4.12. Tuyaux et canalisations	41
4.13. Courroies de transmission et systèmes similaires	42
4.14. Hôpitaux	42
5. Autres nuisances de l'électricité statique	44
5.1. Bureaux et salles de réunion	46
5.2. Industries électroniques	46
5.3. Exemples de mesures sur site industriel	48
Conclusions	50
Glossaire - bibliographie	53



1



Notions de bases

Ce chapitre rappelle les principes généraux nécessaires à la compréhension des phénomènes développés dans la suite de cette brochure.

1.1. Principes généraux

1.1.1. La charge électrique

L'ensemble des phénomènes électriques, dont l'électrostatisme, s'explique à l'aide de théories qui sont toutes basées sur la structure atomique de la matière. La notion de charge électrique occupe une place importante dans ces théories.

Les études expérimentales faites sur la matière à la fin du 19^e siècle, début du 20^e siècle, ont permis d'établir que la matière était constituée principalement de trois particules, plus ou moins grosses, et regroupées de façon ordonnée dans des entités appelées atomes.

Ces trois particules sont :

- les protons, chargés positivement,
- les neutrons, électriquement neutres,
- les électrons, chargés négativement.

Les atomes sont tous composés d'un noyau constitué de protons et de neutrons, et d'un nuage, autour de celui-ci, constitué d'électrons.

C'est grâce à ces différentes charges électriques que l'on explique l'ensemble des phénomènes de l'électricité.

Le noyau est donc de charge positive, et le nuage d'électrons est de charge négative. À l'état « naturel », un atome est globalement électriquement neutre car le nombre d'électrons est toujours égal à celui des protons du noyau (figure 1).

Si les particules du noyau forment un ensemble très soudé et sont donc difficilement séparables,

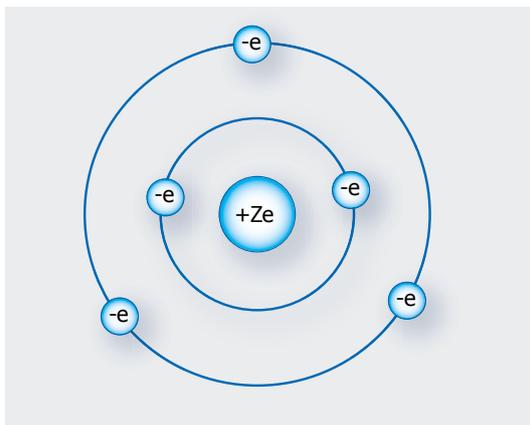


Figure 1. Représentation de l'atome

les électrons sont, pour ceux situés les plus loin du noyau (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).

Un atome peut donc perdre ou gagner un ou plusieurs électrons, ces électrons étant cédés ou captés par les atomes environnants. Dans ce cas, le nombre de protons dans le noyau n'est plus égal au nombre d'électrons autour du noyau. La charge électrique de l'atome est alors positive ou négative. Il devient alors un ion. Dans le cas d'un gain d'électron, c'est un anion, un ion chargé négativement, et dans le cas d'une perte d'électron, c'est un cation, un ion chargé positivement.

Ce sont les électrons périphériques qui entrent 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.

1.1.2. L'électricité statique

L'électricité statique met en jeu un très grand nombre d'atomes.

Les corps sont constitués d'un très grand nombre d'atomes. En effet l'atome est le plus petit élément indivisible qui compose la matière. Les atomes reliés entre eux forment les molécules, les molécules reliées entre elles forment les cellules, les cellules reliées entre elles forment les tissus... Parmi tous ces atomes, certains réagiront à des sollicitations externes pour donner lieu au phénomène de l'électricité statique.

Reprenons une des expériences de base de l'électrostatique qui 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 puis est accrochée à un étrier suspendu à un fil (figure 2).

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

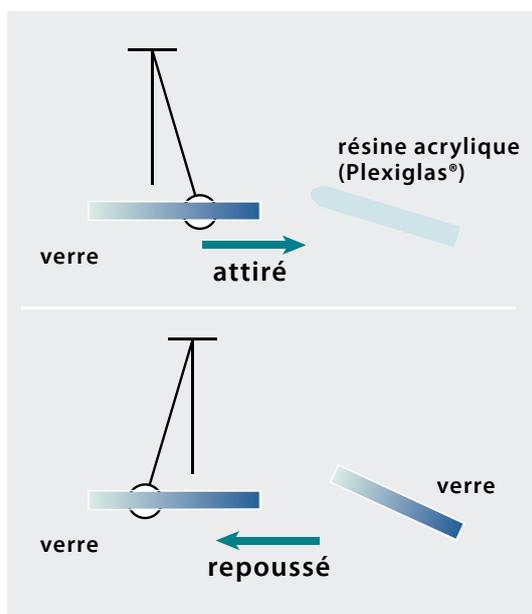


Figure 2. Expérience de base de l'électrostatique

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.

Dans la première partie de notre expérience, la baguette de verre et le bâton de résine acrylique possèdent chacun une même charge électrique mais de signe contraire alors qu'initialement ils étaient tous les deux électriquement neutres. Dans la deuxième partie de l'expérience, les deux baguettes se repoussent car, toutes deux en verre, elles portent des charges de même signe.

Deux particules chargées, exercent l'une sur l'autre des forces. Elles sont répulsives si les charges sont de même signe et attractives si elles sont de signe contraire.

Le frottement de deux matériaux l'un contre l'autre, va, en fonction des caractéristiques de ces matériaux, créer des charges sur chacun d'eux au niveau de la zone de frottement. Les charges restent en place une fois les matériaux séparés.

1.1.3. Conducteurs et isolants

Tout phénomène électrostatique est dû à la présence de charges électriques qui n'existent pas indépendamment d'un support matériel ; même la charge élémentaire portée par un électron l'est par une particule matérielle.

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 et se présentera sous forme solide, liquide ou gazeuse.

1.1.3.1. Les solides

L'état solide de la matière est caractérisé d'une part, par la présence d'atomes ou de molécules fortement liés les uns aux autres et d'autre part, par un volume et une forme déterminés, constants en l'absence de toute force extérieure.

Isolants

Dans un matériau isolant, le nuage électronique (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. 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 (polytétrafluoroéthène) plus connu sous l'appellation commerciale Téflon, le PE (polyéthylène), le PVC (polychlorure de vinyle), sont des exemples typiques d'isolants.

Conducteurs

Dans un matériau conducteur, l'organisation des atomes se révèle être celle d'un réseau d'ions positifs rigidement liés entre eux et baignant dans un nuage d'électrons délocalisés qui n'appartiennent pas 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 de la matière sous l'action de forces électriques extérieures même faibles, du fait par exemple de la présence de charges positives ou négatives extérieures alors que les ions positifs du réseau sont, eux, immobiles.

Les métaux comme l'or, l'argent, le cuivre, l'aluminium et le fer sont des exemples typiques de conducteurs.

Conductivité et résistivité

La conductivité électrique est un paramètre qui caractérise l'aptitude des matériaux à laisser les charges électriques se déplacer librement. Son symbole est σ et son unité s'exprime en Siemens par mètre ($S.m^{-1}$) (voir figure 3, page suivante).

À l'inverse, la résistivité caractérise la capacité du matériau à s'opposer au passage des charges électriques. Son symbole est ρ et son unité s'exprime en ohm mètre ($\Omega.m$).

1. Notions de bases

Ces deux notions se déduisent simplement l'une de l'autre par : $\sigma = 1/\rho$.

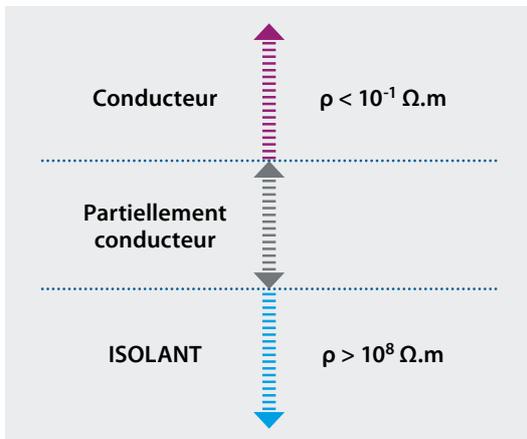


Figure 3. Résistivité conducteur / isolant

Il n'existe pas d'isolant ou de conducteur parfait, ni de frontière définie entre les matériaux isolants et conducteurs ; tout corps est plus ou moins bon conducteur ou plus ou moins bon isolant.

On considère qu'un matériau est antistatique lorsque sa résistivité est comprise entre $10^4 \Omega.m$ et $10^{12} \Omega.m$ environ.

1.1.3.2. Les liquides

Un liquide est constitué en général d'un mélange de molécules neutres et de molécules ionisées et, contrairement au solide, toutes ces molécules n'ont pas de place fixe dans l'espace. Un liquide est électriquement neutre car il contient autant d'ions positifs que d'ions négatifs.

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

Une faible sollicitation électrique extérieure, par la présence d'une paroi chargée par exemple, s 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, nous aurons un liquide plus ou moins conducteur. La conduction ici est ionique.

En résumé, les charges électrostatiques peuvent se former dans les liquides en mouvement au contact de solides (parois, canalisations, récipient.) ou entre liquides non miscibles. La concentration des charges va dépendre de la conductivité de ces liquides. Le risque augmente lorsque la conductivité est faible.

Quelques ordres de grandeur de conductivité des liquides :

- Conductivité élevée : $> 1\,000 \text{ pS/m}$ (alcool, huile vierge, eau pure),
- Conductivité moyenne : entre 50 pS/m et $1\,000 \text{ pS/m}$ (fuel lourd),
- Conductivité faible : $< 50 \text{ pS/m}$ (essence, huile, paraffine).

$\text{pS/m} = \text{picosiemens par mètre} = 10^{-12} \text{ siemens par mètre}$.

1.1.3.3. Les gaz

Un gaz est un ensemble de molécules libres 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.

Une force électrique extérieure d'intensité normale n'aura pas de résultat sur ces molécules neutres. Il n'y aura donc pas de séparation de charges positives ou de 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. Mesures et détection de grandeurs électrostatiques

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la valeur d'une charge électrostatique, certaines étant réservées à des pratiques de laboratoire.

En laboratoire, il est possible de réaliser cette mesure 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 ».

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 disponibles sur le marché, parmi ceux-ci nous mentionnerons deux modèles de conception totalement différente :



Figure 4. Exemple de mesureur de champ électrique



Figure 5. Exemple de mesureur de champ électrique (moulin à champ)

- l'un, de type électronique, utilise les propriétés des transistors à effet de champ (figure 4),
- 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 (figure 5).

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 relativement 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 figure 6 conduirait à affirmer qu'il n'existe aucune charge sur la bande isolante.

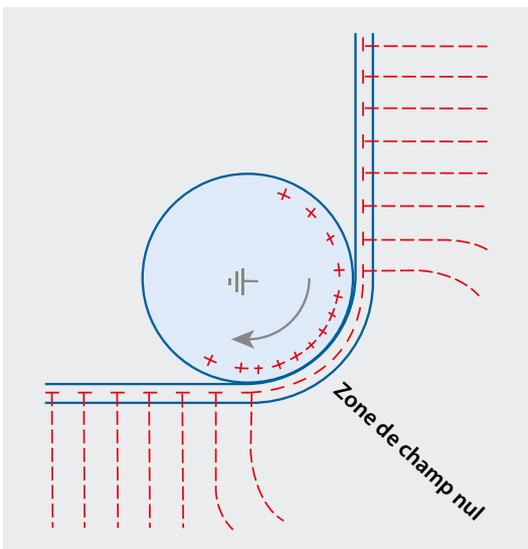


Figure 6. Mesurage d'un champ électrique

1.2. Phénomènes d'électrisation

La séparation entre les charges négatives et les charges positives, au sein de la matière, peut se produire de différentes manières comme, par frottement, par transfert, par influence, par effet de couronne et par écoulement dans une conduite.

1.2.1. Mécanismes d'apparition de charges

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.

1.2.1.1. Entre solides

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. 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. 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.

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.

1. Notions de bases

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 7).

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 recombiner. 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 au moins des matériaux est isolant, 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.

1.2.1.2. Entre liquide et solide

Lorsqu'un liquide au repos est mis en contact avec une paroi solide, un ensemble de réactions se développe à l'interface du liquide et du solide

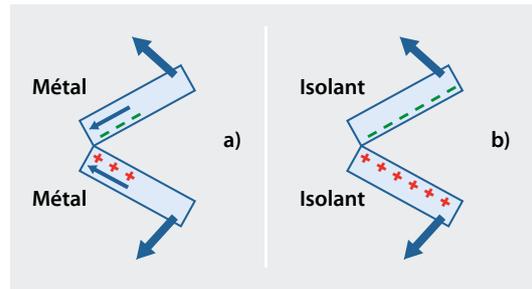


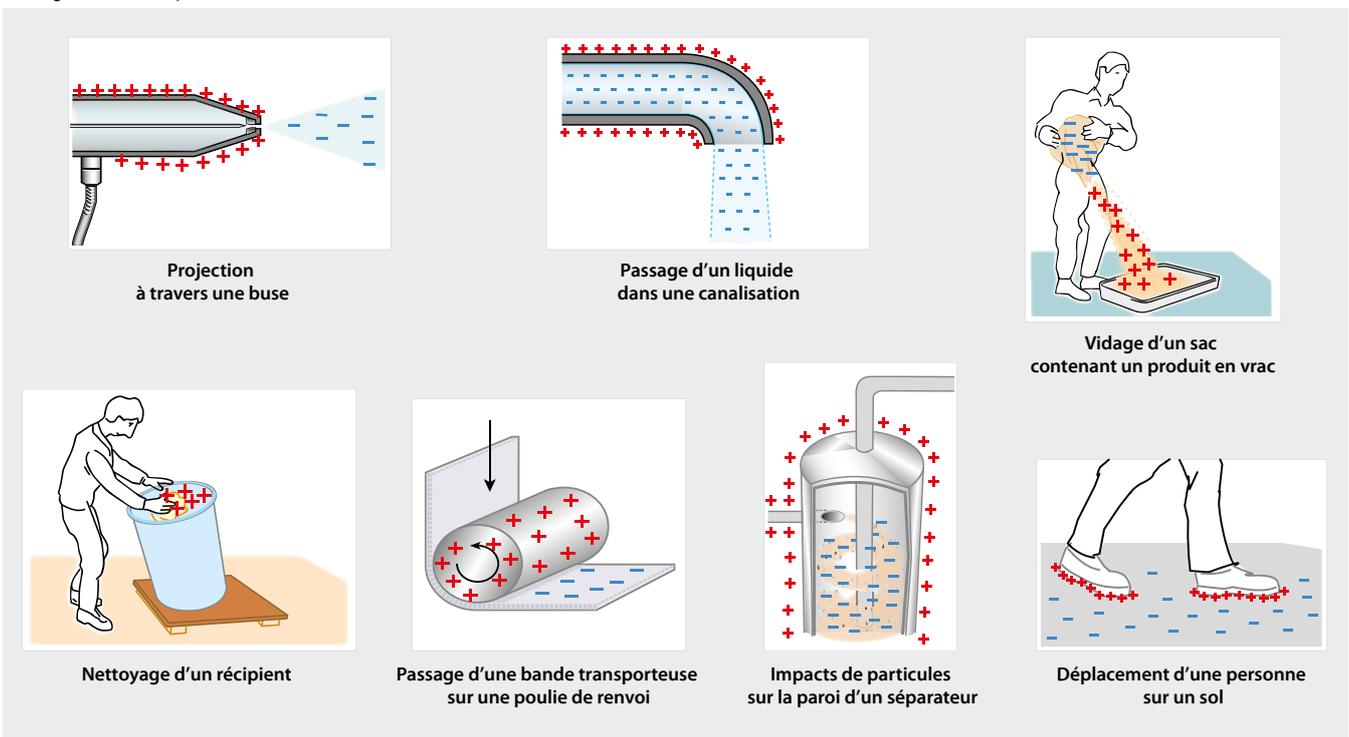
Figure 7. Charge totale après séparation

et aboutit à la présence d'une 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, ayant une épaisseur de quelques angströms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$), et ceux répartis au sein du liquide forment une couche dite diffuse qui, elle, 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 (création d'une étincelle par exemple). La figure 8 illustre quelques exemples d'électrisation.

Figure 8. Exemples d'électrisation



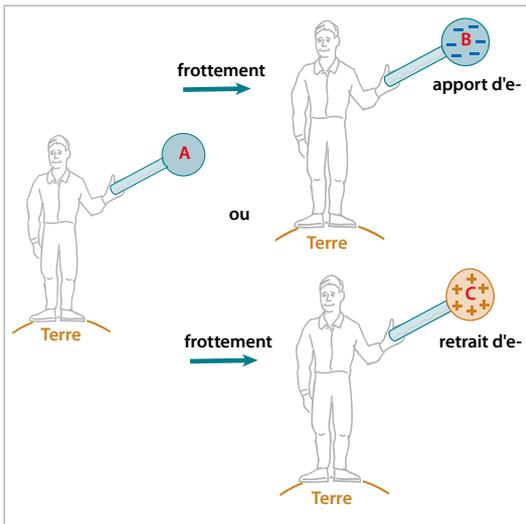


Figure 9. Électrification d'une boule métallique par frottement (avec manchon isolant)

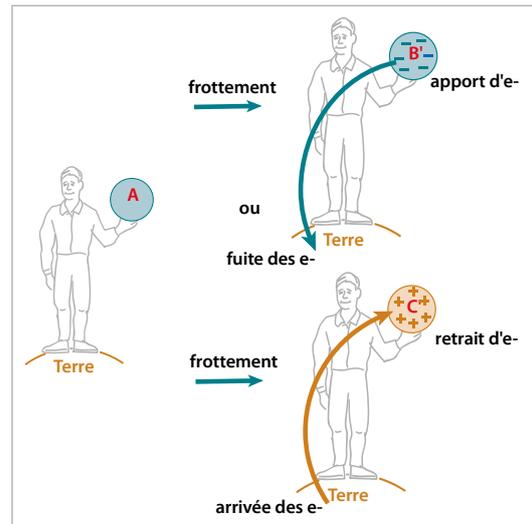


Figure 10. Électrification d'une boule métallique par frottement (sans manchon isolant)

1.2.2. Électrification par frottement

Tout corps frotté est le siège de phénomènes d'électrification. Pour schématiser, on peut dire que le frottement « arrache » des électrons aux deux corps en présence. La séparation des deux corps laissera sur l'un des corps des électrons en excès et, sur l'autre, des électrons en défaut. On sera en présence de deux corps électrisés.

Si l'un est isolant, l'électrification sera faible et restera cantonnée à l'endroit où le frottement a eu lieu. En revanche, s'il est conducteur, l'électrification occupera l'espace du corps en entier, à condition de ne pas le mettre en relation avec la terre par un autre conducteur sous peine de voir l'électrification disparaître.

Si en frottant une boule métallique électriquement neutre avec un chiffon (figure 9), 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 de la boule, 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'électrification. En effet, s'il avait tenu les corps frottés à mains nues (figure 10), 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'électrification 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.

1.2.3. Électrification par transfert

L'électrification par transfert se réalise en mettant en contact deux corps conducteurs : l'un électrisé et l'autre électriquement neutre.

Comme représenté en figure 11, approchons le corps B électriquement neutre du corps A électrisé et mettons-les en contact. La charge positive de A est Q . L'ensemble des deux conducteurs ne forme désormais qu'un seul conducteur sur lequel se répartit la charge Q .

Lors de la rupture de contact, le corps B emporte sur sa surface une certaine charge q , tandis que

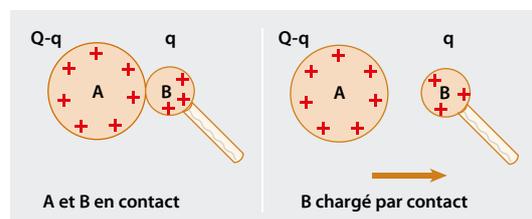


Figure 11. Électrification par transfert

1. Notions de bases

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 et B soient isolés de la terre car, autrement, ils ne conserveraient pas leurs charges.

Si les corps A et B (ou l'un des deux) sont des isolants, cette expérience aurait des résultats moindres, voire nuls, vu la difficulté que présentent les matériaux isolants à conduire les charges.

1.2.4. 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 un corps conducteur A électrisé et de charge positive (figure 12a). 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 sans que A et B soient en contact. 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

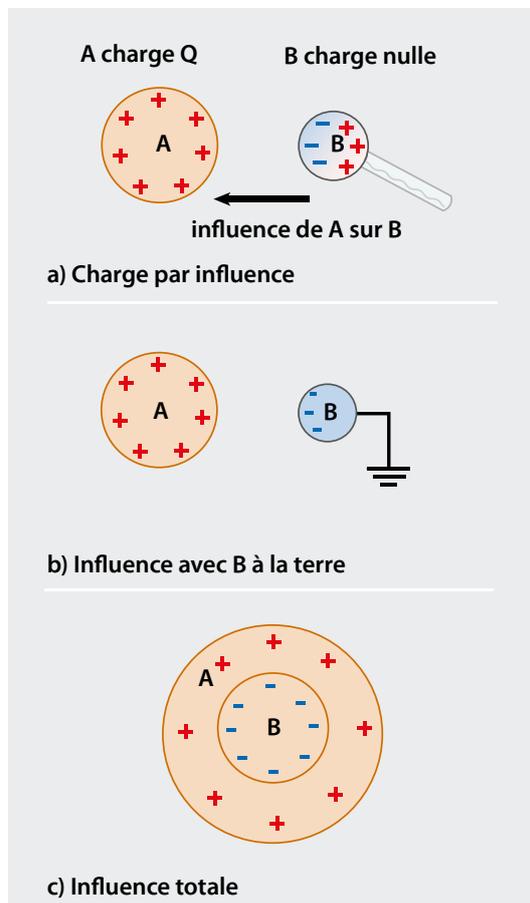


Figure 12. Électrisation par influence

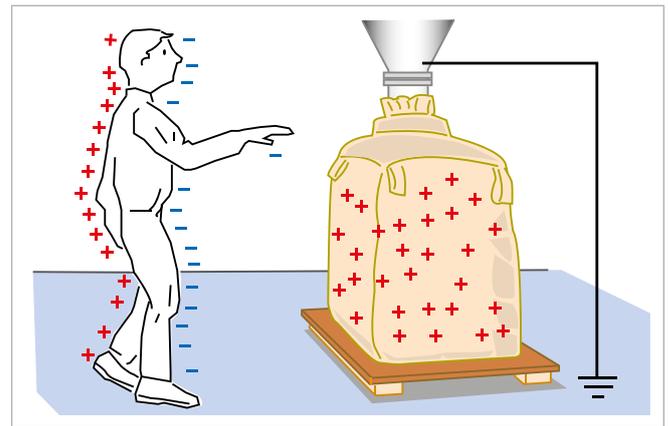


Figure 13. Électrisation par influence d'une personne isolée de la terre (chaussures non conductrices)

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 12b) 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 12c).

De la même façon une personne peut être électrisée par influence lorsqu'elle s'approche d'un corps chargé électriquement (figure 13).

1.2.5. Électrisation par effet de couronne

L'électrisation par effet couronne, appelé également « pouvoir des pointes » a pour origine le phénomène d'ionisation de l'air entourant une pointe.

On dispose une pointe, reliée à un générateur de tension, face à une plaque conductrice plane reliée à la terre (figure 14a). 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.

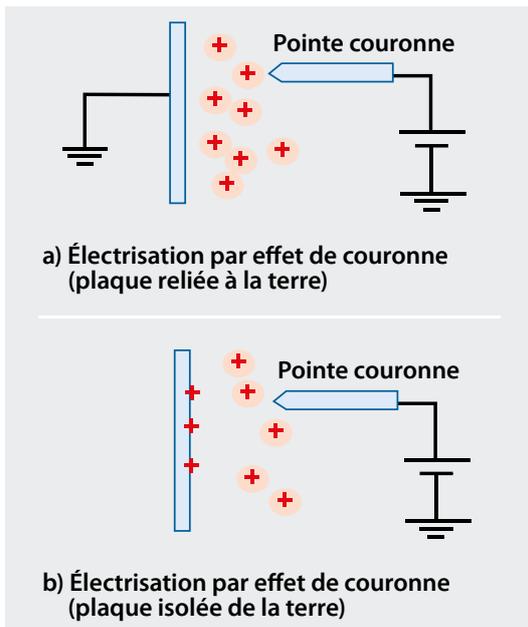


Figure 14. Électrisation par effet couronne

Ce courant est le résultat de l'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 et la plaque ne va pas se charger puisque les électrons vont circuler librement depuis ou vers la terre.

Si maintenant la plaque est isolée de la terre (fig. 14b), alors les charges électriques s'accumuleront sur la plaque sans pouvoir être compensées et y resteront. La plaque sera alors électrisée.

En résumé, 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.

1.2.6. Électrisation par écoulement d'un liquide

Ce phénomène d'électrisation apparaît quand on fait écouler certains liquides (liquides organiques, carburants, etc.) dans un ensemble de conduites.

Comme représenté sur la figure 15, 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.

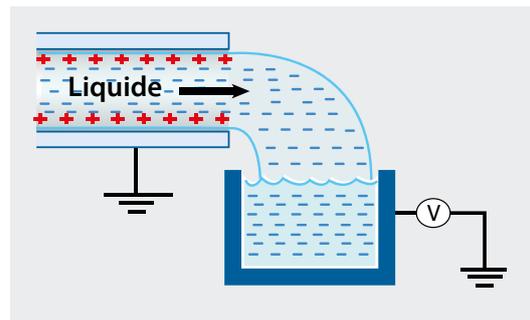


Figure 15. Électrisation par écoulement

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, 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 apparaissent avec le transport de produits pulvérulents (poudres alimentaires, céréales, etc.).

1.3. Accumulation et dissipation des charges

1.3.1. Notions générales

Pour éviter toute accumulation dangereuse de charges, il y a lieu de réduire leur apparition et le cas échéant de favoriser leur dissipation ; à noter qu'il ne peut y avoir accumulation de charges que si le taux de génération est supérieur à celui de dissipation. Un phénomène pour lequel les deux taux sont égaux n'engendre donc pas d'accumulation.

L'étude de l'accumulation et de la dissipation des charges électriques peut souvent être ramenée à celle d'un condensateur. En effet deux grandes surfaces portées à des potentiels différents et séparées par de l'air seront assimilées aux deux armatures d'un condensateur. Il en est de même pour une personne (le corps humain se comporte comme un conducteur) qui peut être assimilée à la première armature d'un condensateur dont le diélectrique¹ serait constitué par les chaussures

1 « Diélectrique » se dit d'un matériau dans lequel on peut emmagasiner de l'énergie électrostatique après l'avoir soumise à un champ intense. Un diélectrique est nécessairement isolant.

1. Notions de bases

et le revêtement du sol sur lequel elles reposent ; la seconde armature est représentée par le sol supposé sans résistance (figure 16).

Tout condensateur chargé, s'il n'est pas alimenté, perd régulièrement sa charge. Le milieu diélectrique qui sépare les armatures n'étant pas totalement isolant, l'environnement extérieur des armatures ne l'est pas non plus. La charge électrique du condensateur décroît donc au fur et à mesure que le temps s'écoule. Il en est de même des corps électrisés.

Les mécanismes d'accumulation et de dissipation des charges sont différents suivants que l'on a affaire à des solides, des matériaux granulaires, des liquides ou des gaz.

1.3.2. Cas des solides

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. Il y a accumulation lorsqu'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.

D'autres mécanismes sont aussi à l'origine de l'accumulation de charge, c'est le cas par exemple lorsqu'un conducteur isolé est soumis au champ généré par une installation produisant des charges, alors on parle de charge par influence.

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

La décharge d'un conducteur isolé peut être très énergétique aussi, car c'est l'ensemble des charges du conducteur qui vont participer à la décharge et non celles accumulées localement comme dans un isolant.

Le tableau 1 donne, pour deux situations, les principales causes d'apparition des charges.

Tableau 1

Exemples d'opérations	Principales causes d'apparition des charges
Mouvement d'une bande sans fin défilant sur des rouleaux.	Contact et rupture de contact entre la bande et les organes de machines (poulies, rouleaux, tambours, etc.). Frottement de bandes avec des pièces de machine ou des matières transportées.
Marche d'une personne.	Contact entre la semelle et le sol, l'un des deux étant isolant.

1.3.3. Cas des matériaux granulaires

Les matériaux granulaires en écoulement ont un comportement qui s'apparente à celui d'un fluide isolant. 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). Le temps de relaxation (ou de dissipation) joue un rôle important : plus ce temps est faible, plus les charges se dissipent rapidement.

Pour réduire les charges électrostatiques, il est possible d'agir, soit sur leur génération, soit sur leur dissipation. Concernant la génération, il est possible d'agir sur la vitesse ou le débit des produits. Dans le transport mécanique de produits par exemple, il existe des limites de vitesse/débit en fonction des produits pour minimiser la génération de charge.

Lorsque pour des raisons techniques, on ne peut intervenir sur la vitesse ou le débit des poudres ou des granulés, il est possible dans certain cas, d'agir sur l'humidité du matériau 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.

Les principaux facteurs intervenant dans l'accumulation des charges lors des opérations de fabrication, de transport et de stockage de poudres sont :

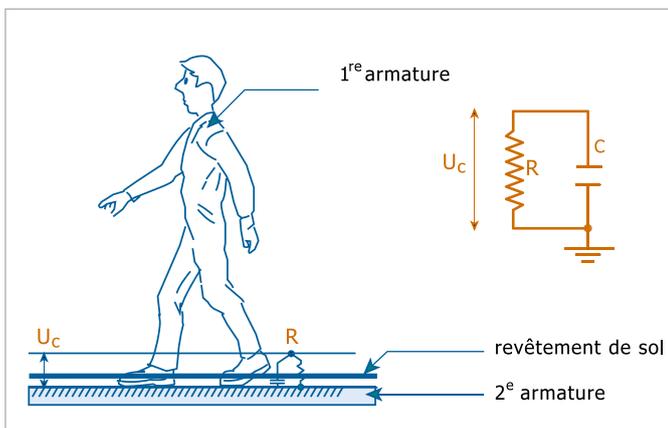


Figure 16. Exemple de condensateur formé par une personne et le sol

- la composition chimique et les caractéristiques physiques des matériaux,
- la teneur en humidité,
- la structure et la nature des parois de l'équipement,
- la taille des particules,
- la concentration du nuage de poussières dans l'atmosphère,
- la vitesse des particules,
- la présence ou pas de turbulence.

La charge électrostatique des produits pulvérisés 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 poudres à résistivité moyenne et non conductrice, ce rapport est essentiellement modifié par le procédé lui-même (vitesse de séparation après contact), par la finesse de la poudre (surface spécifique) et par sa composition chimique (résistivité et permittivité relative). Le tableau 2, extrait de la publication UTE C 23-597, indique pour les opérations industrielles types, les ordres de grandeur de densité de charge massique pour des poudres à résistivité moyenne.

Tableau 2. Ordres de grandeur de densité de charge massique

Opération	Densité de charge massique ($\mu\text{C}/\text{kg}$)
Tamissage	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}

1.3.4. Cas des liquides

La conductivité des liquides est un facteur important. Elle s'exprime en picosiemens par mètre (pS/m). Dans la norme UTE C 23-597, les liquides sont classés selon leur conductivité de la façon suivante :

- conductivité élevée,
- conductivité moyenne,
- conductivité faible.

Les liquides qui donneront naissance à des phénomènes d'électrisation lors d'un écoulement sont ceux qui ont un temps de relaxation important (liquides qui ont des difficultés à retrouver

Tableau 3. Valeurs indicatives des conductivités et des temps de relaxation de certains liquides*

Liquides	Conductivité (pS/m)	Temps de relaxation (s)*
Conductivité faible		
• Paraffines typiques	10^{-1} – 10	2 – 200
• Composants aromatiques purs (toluène, xylène, etc.)	10^{-1} – 10	2 – 200
• Essence	10^{-1} – 10^2	0,2 – 200
• Huiles de graissage	10^{-2} – 10^3	0,02 – 2 000
• Éthers	10^{-1} – 10^2	0,2 – 200
Conductivité moyenne		
• Essences et huiles contenant des additifs dissipatifs	50 – 10^3	0,02 – 0,4
• Fuels lourds (noir)	50 – 10^5	2×10^{-4} – 0,4
• Esters	10^2 – 10^6	2×10^{-5} – 0,2
Conductivité élevée		
• Huile vierge	$\geq 10^3$	$\leq 0,02$
• Condensats de gaz naturel avec inhibiteur de corrosion	$\geq 10^3$	$\leq 0,02$
• Alcools	10^6 – 10^8	2×10^{-7} – 2×10^{-5}
• Cétones	10^5 – 10^8	2×10^{-7} – 2×10^{-4}

* En pratique, les liquides ne mettent pas plus de 100 s pour que la charge revienne au niveau de sécurité

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.

La permittivité d'un matériau est le rapport de l'induction électrique (en coulombs par mètre carré) et de l'intensité du champ électrique (en volts par mètre).

Le coulomb est l'unité de charge électrique dans le système international (SI). C'est la quantité d'électricité traversant une section d'un conducteur, parcouru par un courant d'intensité de 1 ampère pendant 1 seconde. Le coulomb par kilogramme représente donc la charge électrique contenue dans une masse de matériau conducteur traversée par un courant.

Pour les liquides de conductivité faible, la densité volumique de charge transportée augmente avec la longueur de la conduite. À partir d'une certaine longueur, cette valeur devient stationnaire.

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 $50 \mu\text{C}/\text{m}^3$.

1. Notions de bases

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 4).

1.4. Phénomènes disruptifs

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 17), un claquage se produit si ΔV dépasse une certaine valeur seuil V_d appelée tension disruptive. Une étincelle jaillit alors quelque part entre les plateaux.

1.4.1. Loi de Paschen

La loi de Paschen, loi empirique énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 1889, indique que l'apparition d'un arc électrique dans

Tableau 4

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.

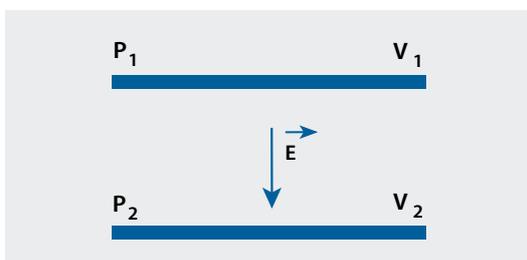


Figure 17. Claquage entre deux plaques

un gaz, à un certain champ électrique de claquage (dit champ disruptif), est une fonction généralement non linéaire du produit de la pression $[p]$ du gaz par la distance $[d]$ entre les électrodes.

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

Cette loi 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.

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. Les valeurs typiques de tension disruptive de l'air dans un champ uniforme à 20 °C et à 1 bar sont indiquées dans le tableau 5 ci-après.

Tableau 5. Tensions disruptives de l'air

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
20	59
30	86
40	112
50	138
60	164
80	215
100	266

1.4.2. Cas des gaz rares

Lorsque l'on mesure les potentiels disruptifs dans les gaz rares (par exemple 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. Il existe en fait 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.

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. 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 à leur. Un courant circule, il est infime.

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 décrit plus haut. 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.

Pris dans le même champ électrique, ils vont être accélérés et pouvoir donner naissance chacun à deux autres électrons qui, pris dans le champ élec-

trique, 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).

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.

Elles se manifestent de différentes façons et 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.

Cinq types de décharges sont décrits dans la suite de ce chapitre :

- décharge étincelle,
- décharge en aigrette,
- décharge glissante de surface,
- décharge de cône,
- décharge type « foudre ».

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 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, la décharge est caractérisée par un éclair très lumineux, qui emprunte le plus court chemin pour aller d'une électrode à l'autre (figure 18).

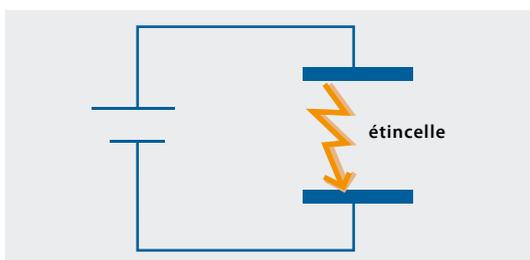


Figure 18. Décharge étincelle



Décharge étincelle en image

1. Notions de bases

Ce type de décharge peut se produire par exemple entre un élément conducteur mis à la frottement de ses chaussures sur le revêtement de sol.???

On est dans une configuration électrique semblable à celle d'un condensateur d'où le nom de « décharge capacitive » [figure 19]. L'énergie disponible lors de ce type de décharge est fonction de la capacité électrique de l'élément chargé électriquement et de son potentiel électrique. Elle est donnée par la formule des condensateurs $W = 1/2 CV^2$, avec :

- W énergie en joules,
- C capacité en farads,
- V tension en volts.

L'énergie 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. Dans le tableau 6, sont indiquées quelques valeurs types de l'énergie des décharges étincelle [1].

Tableau 6. Valeur type de l'énergie 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

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.

Les principales caractéristiques de ce type de décharge sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7. Principales caractéristiques des décharges étincelles

Surfaces impliquées	Conducteurs (liquides ou solides).
Conditions de décharges	Le champ électrique est supérieur ou égal au champ disruptif du milieu environnant (3 MV/m pour l'air).
Courant de la décharge	Dépend de l'impédance du système et peut atteindre plusieurs ampères en valeur crête.
Exemples de situations industrielles	Tronçon de conduite électriquement isolé qui se charge du fait de l'écoulement d'un liquide ou d'un pulvérulent dans la conduite. Décharge provoquée par une personne chargée d'électricité statique (charge due à la marche, à l'électrisation par influence, etc.).
Énergie et caractéristiques	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 : $W = 1/2 CV^2$. Cette décharge peut laisser des traces d'érosion sur les surfaces.

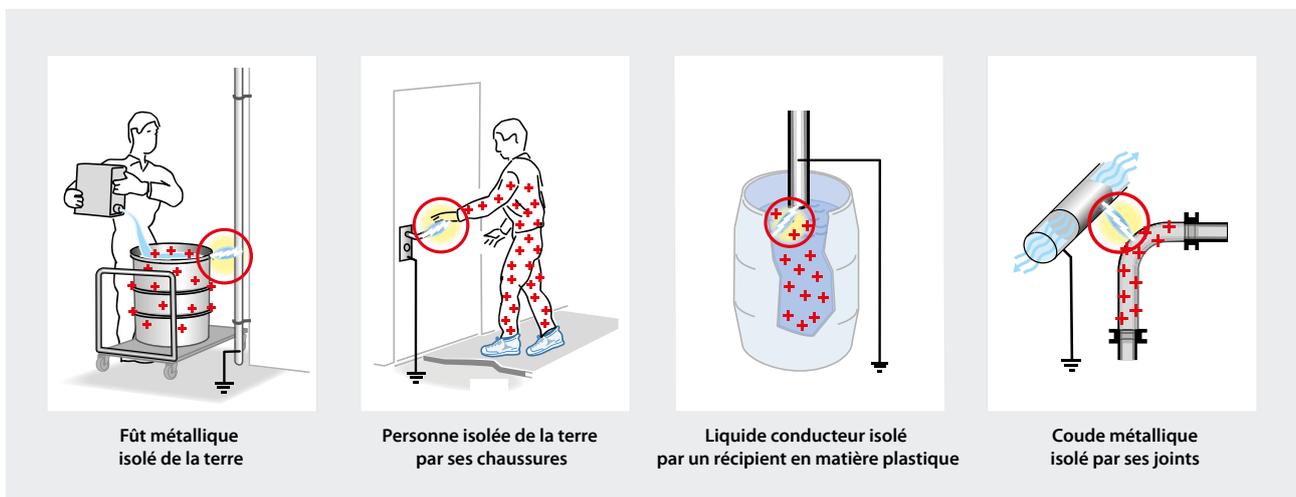


Figure 19. Exemples de décharges par étincelles

1.4.4.3. Décharge en aigrette

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

Par exemple, lorsque l'on approche une sphère métallique reliée à la terre d'une surface isolante porteuse de charges électriques, 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 (figure 20).

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 8 ci-après.

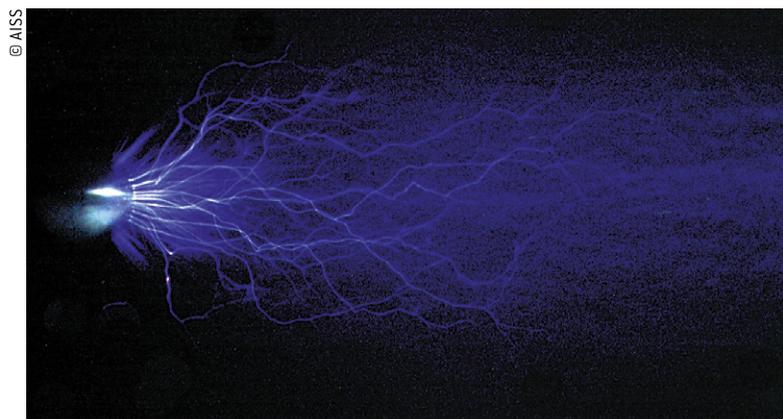
Pour une même énergie transportée, les effets seront donc plus diffus et les traces laissées sur la surface ne seront pas souvent visibles.

1.4.4.4. Décharge glissante de surface

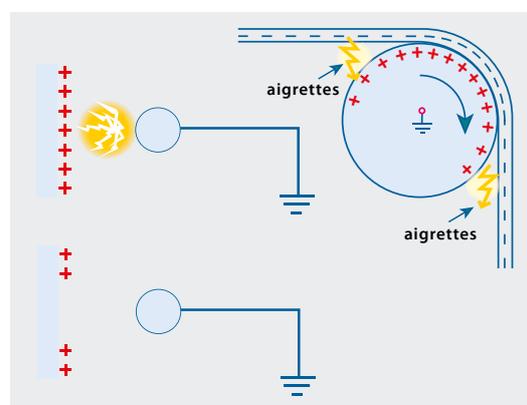
Lorsqu'une surface conductrice reliée à la terre est recouverte d'un film isolant, ce dernier se charge (positivement sur l'exemple), à la suite d'une opération fortement génératrice de charges (par exemple transport, pneumatique). La surface conductrice quant à elle, se charge par influence (négativement sur figure 21).

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.



⚡ Décharge en aigrette



⚡ Figure 20. Exemples de décharge en aigrette

Tableau 8. Principales caractéristiques des décharges en aigrette

Surfaces impliquées	Surface isolante chargée.
Conditions de décharges	Le champ électrique est égal au champ disruptif du milieu environnant (3 MV/m pour l'air).
Courant de la décharge	Courant observé de quelques micro-ampères.
Exemples de situations industrielles	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) ; 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.
Énergie et caractéristiques	L'énergie de la décharge peut être généralement considérée comme étant inférieure à quelques mJ.

1. Notions de bases

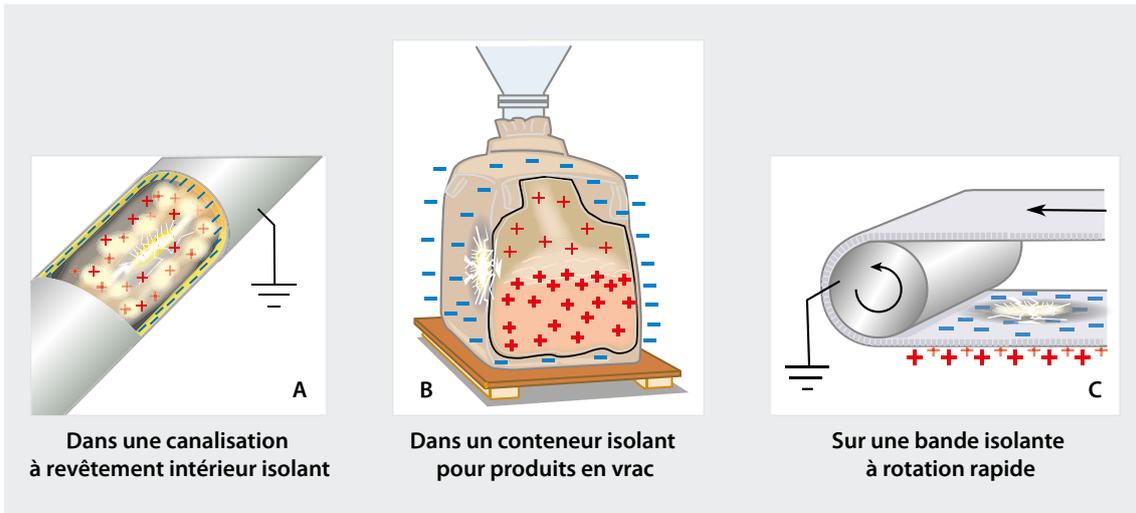


Figure 21. Exemples de décharges glissantes de surface

Tableau 9. Principales caractéristiques des décharges glissantes de surface

Surface impliquée	Conducteur revêtu d'un isolant de fine épaisseur ou isolant revêtu d'un conducteur [configuration en double couche].
Conditions de décharges	Densité surfacique de charge supérieure à environ $2.7 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$. Tension de claquage de la couche isolante supérieure à 4 kV [voir Cenelec R044-001 (1999)].
Exemples de situations industrielles	Transport pneumatique des poudres à grande vitesse à travers une conduite conductrice (métallique ou composite) à revêtement interne isolant. « 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.
Énergie et caractéristiques	L'énergie de la décharge de surface peut être évaluée en utilisant l'expression suivante : $W = As^2d/2\epsilon_0$ dans laquelle A est l'aire de la surface déchargée et de l'épaisseur de l'isolant ; Elle peut atteindre plusieurs milliers de mJ et laisser des traces sur la surface.

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

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 [figure 22].

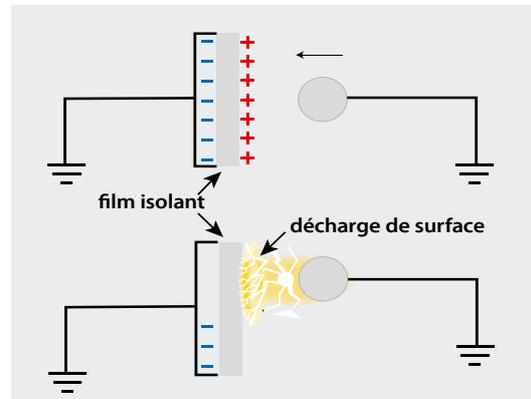
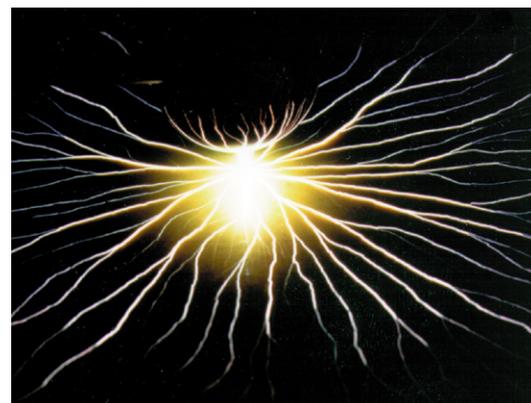


Figure 22. Décharge glissante de surface



Décharge glissante de surface

© AISS

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.

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 glissantes de surface sont extrêmement énergétiques. Elles peuvent atteindre plusieurs milliers de mJ et laisser des traces couvrant une partie importante de la surface de l'isolant (tableau 9).

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 (figure 23).

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

1.4.4.6. Décharge type « foudre »

Ces décharges se produisent à l'intérieur d'un nuage de poussières, lorsque l'intensité du champ due 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.

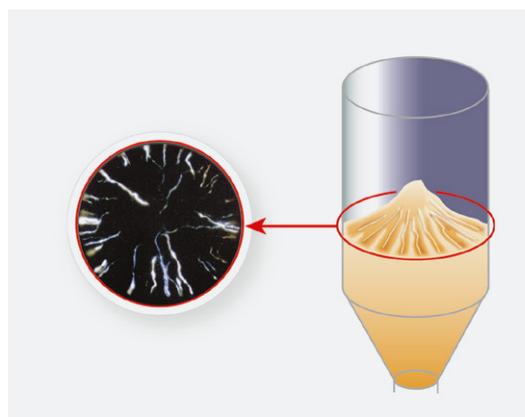


Figure 23. Décharge de type cône

Tableau 10. Principales caractéristiques de décharge de cône

Conditions de décharges	Poudre de résistivité élevée. Débit de remplissage élevé. La présence dans le pulvérulent de produits de forte granulométrie (supérieure à 100 µm) amplifie le phénomène.
Situations industrielles	Elle se produit lors du remplissage de silos ou de conteneurs de grandes dimensions.
Énergie et caractéristiques	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).

2



Accidents d'origine électrostatique

2. Accidents d'origine électrostatique

Les effets négatifs de l'accumulation d'électricité statique vont de la sensation désagréable que l'on ressent lorsqu'on touche un objet conducteur relié à la terre (une poignée de porte, un tableau électrique par exemple) alors que l'on a emmagasiné une quantité de charges suffisantes, aux accidents mortels, qui peuvent être provoqués à la suite d'une explosion ayant pour source d'ignition une décharge d'électricité statique. Les effets physiologiques des décharges électrostatiques sur les humains vont du fourmillement désagréable aux actions réflexes violentes. Ces effets sont provoqués par le courant de décharge.

Cette partie présente quelques accidents représentatifs dont l'origine électrostatique paraît la plus probable.

2.1. Principales causes d'accidents

L'électricité statique est à l'origine de plusieurs accidents industriels. Les principaux facteurs d'accidents d'origine électrostatique sont :

- les opérations de transfert de liquides pétroliers (dépotage, transvasement d'un réservoir à un autre, etc.) ;
- les opérations de nettoyage de citernes et l'utili-

- sation 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 électriquement chargée (car isolée de la terre) ;
- l'utilisation de canalisations non adaptées pour le transport pneumatique ;
- les absences de liaisons équipotentielles entre matériels.

Ces accidents sont 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.

2.2. Exemples d'accidents

Le Bureau d'analyse des risques et pollutions (Barpi) répertorie les incidents ou accidents qui ont ou auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques ou à l'environnement. Les exemples d'accidents ci-après sont des extraits de la base de données ARIA (Analyse, recherche et information sur les accidents) gérée par ce bureau.

ARIA recense, début 2018, plus de 46 000 accidents ou incidents survenus en France ou à l'étranger. Le tableau 11 présente succinctement quelques accidents dans lesquels l'électrostatique est en cause.

Tableau 11. Exemples d'accidents dans lesquels l'électrostatique est en cause

Pays et secteur	Déroulement de l'accident	Analyse des sources d'inflammation
France – 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).
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.
France – 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) : - mécanisme d'accumulation de charges rendu possible par la présence d'un collier de serrage électriquement isolé du reste de l'installation, - mécanisme de décharge disruptive du type étincelle entre le collier et le tuyau d'écoulement.

Royaume-Uni – Industrie pétrolière	<p>Une explosion se déclare alors que le conducteur d'un camion-citerne est en train de mener à bien l'opération de remplissage.</p> <p>Le conducteur est brûlé à la tête et aux jambes.</p>	<p>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.</p>
France – Fabrication de peintures	<p>Un incendie se déclare dans une entreprise de fabrication de peintures lors du nettoyage d'une tête d'injection sur une chaîne de conditionnement.</p> <p>Le dispositif pour le nettoyage utilise du toluène qui est récupéré dans un bac et est recyclé par pompage.</p> <p>L'accident fait un blessé, brûlé au bras gauche et au cou.</p>	<p>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.</p>
France – Pharmacie	<p>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.</p> <p>Elle initie une seconde explosion du nuage de poussières projeté dans l'atelier et dans les locaux voisins via les faux plafonds.</p> <p>L'opérateur est brûlé au deuxième degré.</p>	<p>Une expertise interne montre que l'électrostatique a probablement initié l'explosion. Cette conclusion s'appuie sur le fait :</p> <ul style="list-style-type: none"> - que le déversement d'une poudre, en particulier d'une poudre résistive ($\rho = 1013 \Omega.m$) est un processus générant des charges électrostatiques, - que l'atmosphère explosive était très sensible aux décharges d'origine électrostatique (EMI inférieure à 1 mJ).
États-Unis – Transport de produits inflammables	<p>Une explosion se produit à l'intérieur d'une barge utilisée pour le transport maritime du toluène.</p> <p>Cette explosion est suivie d'un incendie et fait quatre blessés.</p>	<p>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.</p>
Allemagne – Chimie	<p>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.</p> <p>Deux ouvriers sont blessés dont un assez gravement.</p>	<p>L'électrostatique semble être une cause probable de l'accident, compte tenu que :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le déversement d'une poudre est un processus générant des charges électrostatiques et que l'écoulement était particulièrement rapide, - 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).
France – Chimie	<p>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>	<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 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - qu'il présente en lui-même le risque de décharge en aigrette (brush discharge), - qu'il 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, - qu'il isole électriquement des éléments métalliques (vanne de vidange), qui peuvent collecter des charges électriques et provoquer une étincelle.
France – 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>

3



Analyse du risque électrostatique et prévention

3. Analyse du risque électrostatique et prévention

Ce chapitre traite de l'ensemble des mesures pour améliorer la sécurité des biens et des personnes.

3.1. Mesures générales de prévention et de protection

3.1.1. Organisation

3.1.1.1. Acteurs

Dans une entreprise, les acteurs ayant un rôle concernant la sécurité des personnes sont nombreux. Ils sont également multiples en termes de « domaine de compétences ».

Lorsqu'une entreprise est confrontée à une problématique d'électricité statique, il y a lieu de désigner un coordinateur au sein de l'établissement, afin de centraliser les différents aspects du phénomène. En effet l'électricité statique peut être à l'origine de situations dangereuses pour les personnes (gestes réflexes), d'aléas ou de dysfonctionnement de production, d'incendie, d'explosion, etc.

3.1.1.2. Intégration de la sécurité

Si la préoccupation de sécurité doit être permanente et suivre toutes les évolutions 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.

3.1.1.3. Formation

La formation du personnel est un point essentiel de la maîtrise des risques liés à l'électricité statique.

Elle peut être réalisée sous forme de sensibilisation, qui peut être partie intégrante d'un autre domaine, telle qu'une sensibilisation aux risques d'incendie et d'explosion par exemple. Elle peut aussi prendre la forme d'une formation adaptée aux spécificités de l'entreprise et intégrer des études de cas et des travaux pratiques.

3.1.1.4. Vérifications périodiques

Les vérifications périodiques des installations ont pour objectifs de s'assurer du maintien en l'état des dispositions prises vis-à-vis des risques dus à l'électricité statique.

La périodicité de ces vérifications est déterminée par le chef d'établissement, sauf dispositions à caractère réglementaire pouvant être contenues par exemple dans des arrêtés concernant les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Ces vérifications doivent être effectuées par du personnel compétent interne à l'entreprise ou par un organisme extérieur. Elles peuvent concerner, entre autres, la pérennité des liaisons équipotentielles et des mises à la terre, les modifications sur les installations ou sur les procédés, etc.

3.1.2. Risque d'incendie et d'explosion

3.1.2.1. Mécanismes

L'inflammation d'une atmosphère contenant des gaz, des vapeurs, des aérosols liquides ou des poussières combustibles se produit si les deux conditions suivantes sont réunies :

- lorsqu'ils sont mélangés à de l'air, de l'oxygène ou un gaz comburant en proportion convenable ;
- lorsqu'un apport d'énergie suffisant (étincelle, flamme, surface chaude) permet d'amorcer la réaction de combustion.

L'explosion est une combustion extrêmement rapide qui se caractérise par une élévation brutale de température et de pression. Dans le cas des pulvérulents, il faut que les poussières soient en suspension pour assurer une grande surface de contact avec l'air. Une couche de poussière génère potentiellement un incendie, alors que la couche de poussière mise en suspension dans l'air génère potentiellement une explosion

3.1.2.2. 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.

Une décharge d'électricité statique peut être à l'origine d'une explosion, compte tenu de l'énergie de décharge, de l'énergie minimale d'inflammation du produit et de la concentration du produit.

Le tableau 12 contient quelques valeurs d'EMI.

Tableau 12

Produit	Diamètre médian des particules (μm)	EMI (mJ)
Hydrogène	-	0,017
Acétylène	-	0,017
Ethylène	-	0,07
Benzène	-	0,2
Propane	-	0,25
Aluminium	< 10	< 1
Caoutchouc	38	1 000-3 000
Farine	110	300-1 000
PVC	< 10	> 1 000
Sucre	34	10-30

Pour rappel, l'énergie d'une décharge disruptive peut varier de 0,5 mJ à plusieurs dizaines de mJ en fonction de la taille et de la géométrie de la partie d'installation concernée (voir « Décharges d'origine électrostatique, partie 1 »)

3.1.2.3. Méthode d'analyse

La méthode d'analyse pour la prévention du risque d'incendie et d'explosion doit être suffisamment simple pour être utilisable dans la majorité des entreprises. Pour rappel, une inflammation ou une explosion due à l'électricité statique repose sur :

- la présence d'une atmosphère explosible ;

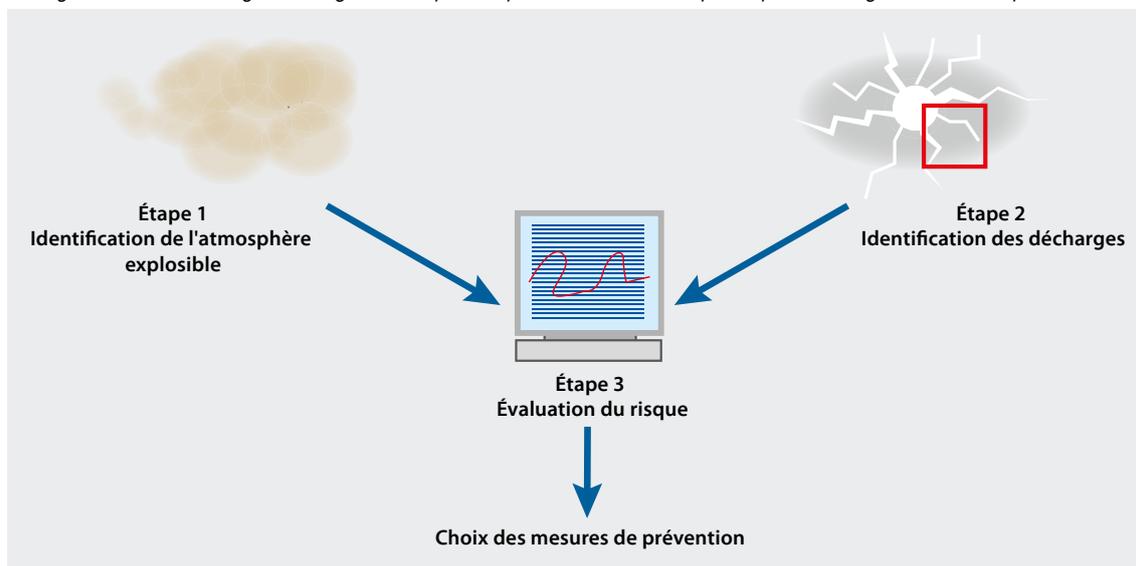
- l'enchaînement d'une suite de phénomènes qui sont :
 - la séparation (formation) de charges électrostatiques,
 - l'accumulation de charges électrostatiques,
 - le déclenchement d'une décharge disruptive ;
- des caractéristiques suffisantes de la décharge disruptive (notamment en termes d'énergie) pour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

Les points clefs pour la mise en œuvre de cette méthode sont :

- une identification précise de l'atmosphère inflammable à la fois en termes de probabilité d'occurrence, de localisation géographique et de sensibilité à l'inflammation ;
- une identification des décharges possibles en chaque point de l'installation où une atmosphère explosible est susceptible d'apparaître ;
- en première analyse, toute surface pouvant s'électriser 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.

Par conséquent, ce travail se résumera en trois étapes (voir figure 24) et sera suivi, bien entendu, de l'examen et du choix des mesures de prévention.

Figure 24. Méthodologie d'analyse du risque d'explosion d'une atmosphère par décharge électrostatique



3. Analyse du risque électrostatique et prévention

3.1.3. Prévention des décharges disruptives

Les mesures de prévention permettant d'éviter l'apparition de décharges disruptives figurent dans le tableau 13.

3.1.4. Mesures pour prévenir la production et l'accumulation de charges

Les mesures de prévention relatives à la production et à l'accumulation de charges sont de différentes natures.

3.1.4.1. 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.

3.1.4.2. Mise à la terre

La figure 25 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.

Tableau 13. Exemples de mesures destinées à éviter l'apparition de décharges d'origine électrostatique

Type de décharge considéré	Exemples de mesures destinées à éviter l'apparition de décharges d'origine électrostatique
Décharge étincelle	Réaliser l'équipotentialité et la mise à la terre des éléments conducteurs électriquement isolés. 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.
Décharge en aigrette	Proscrire l'utilisation de matériaux isolants. Utiliser des additifs antistatiques. Limiter les vitesses.
Décharge glissante de surface	Utiliser des tuyaux, des conduits d'aspiration, etc., conducteurs. 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. Ne pas utiliser de matériaux isolants ayant une tension de claquage supérieure à 4 kV.
Décharge de cône	Dans l'état actuel des connaissances, il n'y a pas de mesure pratique permettant d'éviter ce type de décharges.

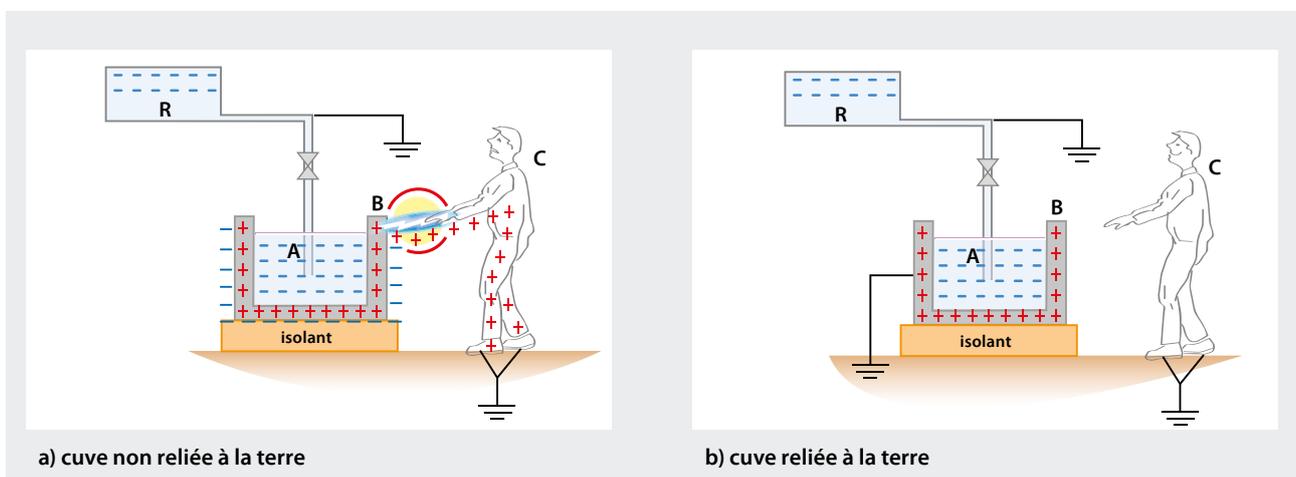


Figure 25. Illustration de la nécessité de la mise à la terre – a) Risque de décharge entre la cuve et l'opérateur, b) La mise à la terre supprime le risque de décharge

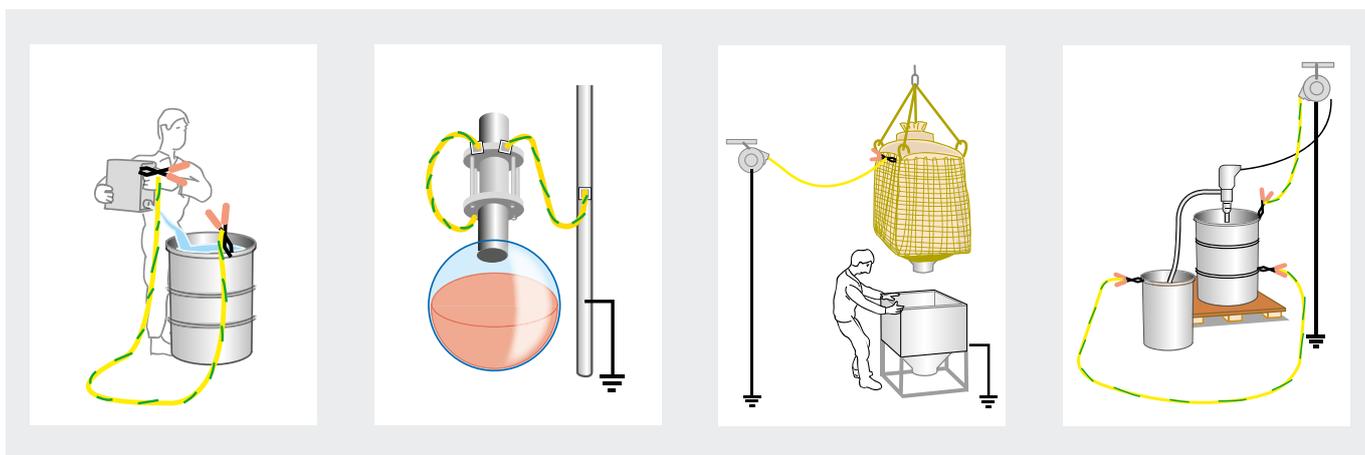


Figure 26. Exemples de mise à la terre

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 contraintes mécaniques 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 soudeuse, par brasure ou par raccord vissé et bloqué en s'assurant que les zones de contact soient débarrassées de toute matière potentiellement isolante (peinture, graisse...).

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.



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

3.1.4.3. 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 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. Analyse du risque électrostatique et prévention

3.1.4.4. 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 maintenance 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.

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.

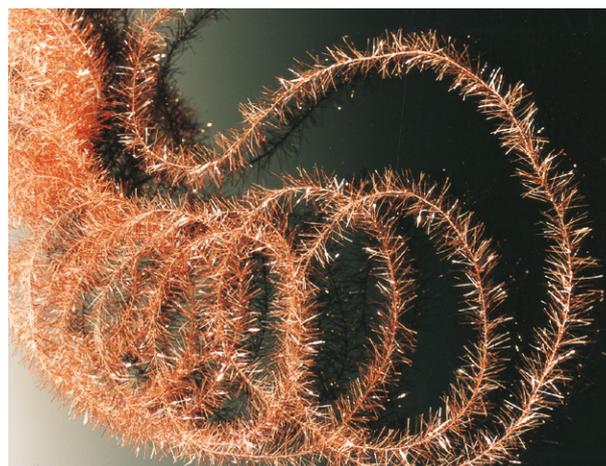
Il faut remarquer qu'au cas où des étincelles se produiraient malgré les mesures prises, à partir d'isolants chargés, leur énergie serait accrue par suite, précisément, d'une diminution de la résistivité superficielle de ces isolants.

3.1.4.5. Neutralisation des charges

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, mais 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. Parmi les causes susceptibles de produire cet effet, on peut citer les propriétés ionisantes de certains rayonnements électromagnétiques 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 et des charges négatives. Les éliminateurs industriels utilisent ce phénomène pour créer, au voisinage des systèmes ou substances à neutraliser, un grand nombre de charges positives et négatives.



© Boussey Control

✦ *Éliminateur à induction électrostatique en plastique métallisé avec âme non conductrice dont l'efficacité est tout à fait illusoire (attention à ne pas confondre avec une guirlande de Noël)*

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 ; il 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. Ces matériels sont souvent associés à un dispositif de soufflage d'air, afin que les charges pénètrent plus aisément dans les zones inaccessibles ou pour « arroser » tout un plan de travail.

Il existe aussi des pistolets qui émettent une décharge d'ions générés par des cristaux piézoélectriques. Ces appareils ne nécessitent aucune source d'énergie mais ont une durée de vie limitée et ne permettent pas de supprimer intégralement les charges. En revanche, ils peuvent créer des ions positifs ou négatifs et par conséquent être utilisés pour ioniser une surface électriquement neutre.

Éliminateurs radioactifs

Ce type de matériel n'est presque plus utilisé en France mais on en trouve encore sur d'anciennes installations. Il offre l'avantage de ne pas avoir besoin d'énergie électrique pour assurer sa fonction. Moins efficaces que les éliminateurs inductifs ou

électriques, ils présentent néanmoins l'intérêt de neutraliser les charges plus complètement lorsque le niveau de charge est faible. Pour cette raison, ils sont souvent utilisés conjointement avec les autres procédés. Leur inconvénient majeur réside dans la présence d'une source radioactive qui est contraignante en termes de gestion du

risque et dont la durée de vie est limitée à environ un an, au bout duquel elle doit être remplacée. Ces éliminateurs existent sous forme de barre ou de pistolet à air comprimé. Dans ces derniers, l'air est soufflé au travers d'une buse, dont une partie est composée d'un alliage contenant du polonium ou de l'américium qui ionise l'air.

4



Exemples de situations à risque

4. Exemples de situations à risque

Ce chapitre, qui n'a pas la prétention d'être exhaustif, présente des situations à risque et les mesures de prévention particulières pouvant être appliquées.

4.1. 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 conductivité des encres des solvants et des lubrifiants.

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, en évitant le port de vêtements en fibres synthétiques non conductrices,
- l'ionisation de l'air.

4.2. 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 gaz inerte (azote).

4.3. 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 taux voisin de 70 %. Cette précaution est indispensable lorsqu'il s'agit de chutes de nitrocellulose.

4.4. 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 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 ce cas, 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.

4.5. Stockage et manutention de liquides inflammables

L'électrisation des liquides inflammables peut engendrer des risques d'explosion si des transferts de charges accompagnés 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 se former :

- entre des parties conductrices de l'installation reliées 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.

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 reliées à la terre.

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. Il convient d'éviter l'usage entre autres de récipients et de canalisations non conducteurs.

Pour limiter l'accumulation des charges au sein du liquide, lors de son écoulement, on veillera

particulièrement à éviter des vitesses élevées d'écoulement.

Des recommandations détaillées en fonction du mode de remplissage, du type de matériau des canalisations, etc. sont précisées dans la norme UTE C23-597 [voir bibliographie].

Les parois intérieures des canalisations doivent être lisses et exemptes de souillures. 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.

4.6. Remplissage et dépotage de citernes routières

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 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.

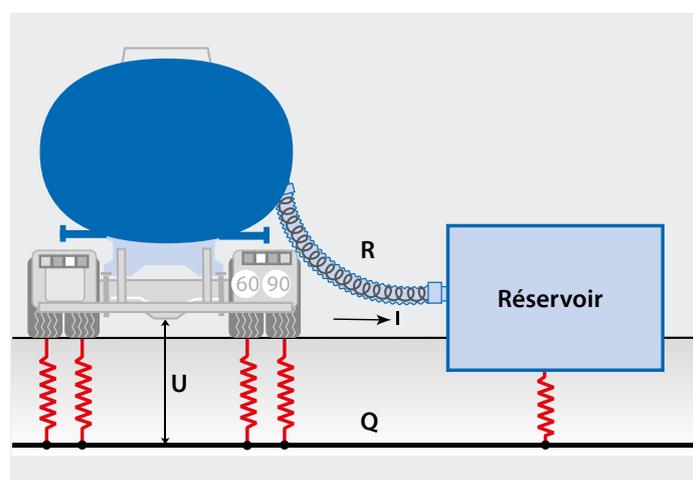


Figure 27. Mise à la terre d'une citerne routière pendant son déchargement

4. Exemples de situations à risque

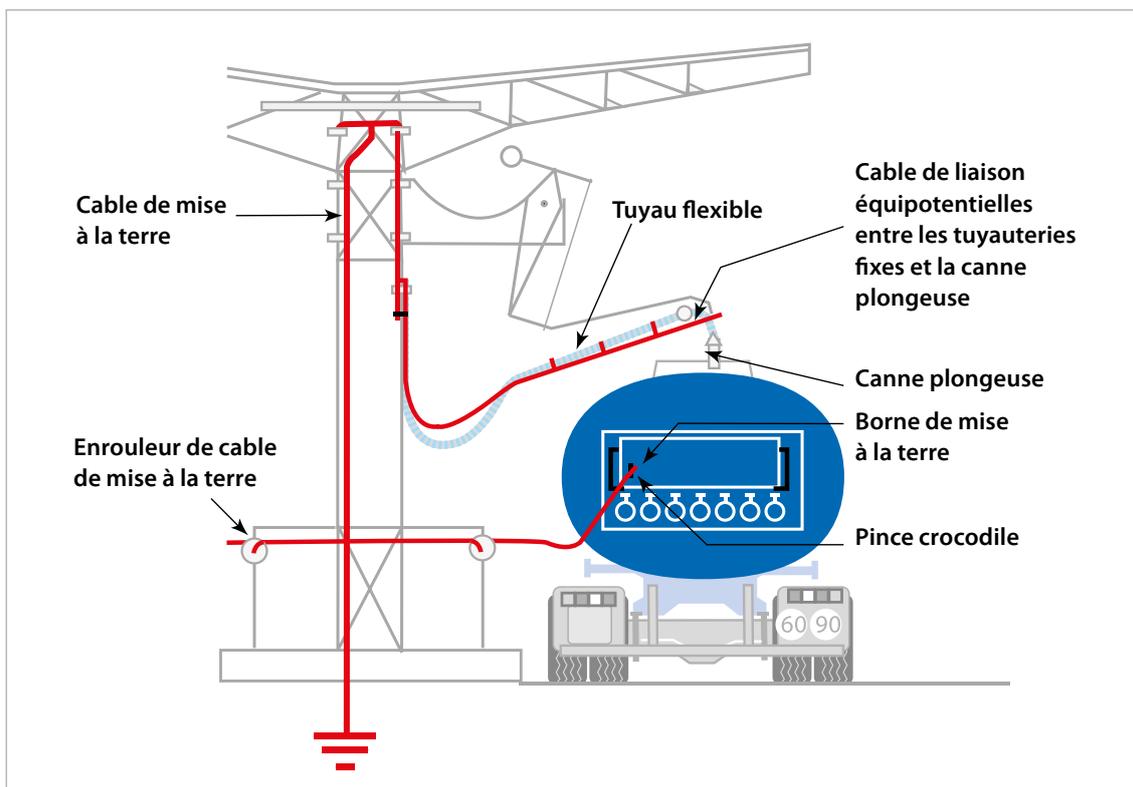


Figure 28. Mise à la terre d'un camion citerne routière (d'après H. Chaillot - La sécurité dans la distribution des hydrocarbures liquides)

Pour les opérations de remplissage et les opérations de dépotage d'hydrocarbures, la mise à la terre volontaire du camion-citerne est obligatoire (figures 27 et 28).

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.



Patte de mise à la terre d'une citerne routière

4.7. 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 des appareils. Cependant, il y a lieu de tenir compte de la présence éventuelle de filtres ou de toiles métalliques intercalées dans le circuit du gaz. Ces éléments 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.

4.8. 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.

4.9. 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). Toutes les pièces doivent être reliées électriquement ensemble et à la prise de terre ;
- les risques dus au pistolet lui-même (et des appareils correspondants), dans le cas des équipements de projection électrostatique. Ces risques peuvent être prévenus en utilisant des appareils conformes aux normes correspondantes.

4.10. Opération de traitement et de manutention de particules solides

Tous les appareils qui entrent dans le processus de fabrication seront réunis entre eux et mis à la terre. 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 dans ce document. Une attention particulière sera portée notamment sur l'utilisation de canalisations conductrices homogènes et leur mise à la terre.

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

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.

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

4.11. 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.

Pour réduire ce risque, il y a lieu 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.

4.12. Tuyaux et canalisations

Les tuyaux et canalisations utilisés dans un process industriel peuvent être à l'origine de phénomènes électrostatiques dangereux pour les personnes ou l'environnement. Si c'est le cas, l'utilisation d'éléments non conducteurs est à proscrire.

Tous les éléments conducteurs comme exemple les récipients, les canalisations, les buses, les filtres ou les tamis, etc., fixes ou mobiles, entrant en contact avec une substance susceptible

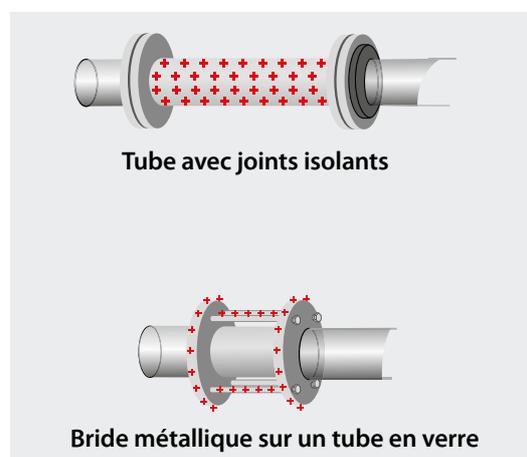


Figure 29. Exemples d'accumulation de charges sur des parties conductrices isolées électriquement de la terre

4. Exemples de situations à risque

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.) (figure 29).

4.13. 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.

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 ;
- 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 (figure 30) ;
- quant aux protecteurs de courroies, ils seront réalisés en matière conductrice et reliés à la terre.

4.14. Hôpitaux

Dans les locaux ou les zones réputés AIA (Anesthésiques inflammables autorisés), toutes dispositions doivent être prises, d'une part pour éviter la génération de charges électrostatiques et d'autre part, pour les écouler. En effet certains anesthésiques ou agents de nettoyage et de désinfection peuvent former des atmosphères inflammables avec de l'air ou des mélanges inflammables avec de l'oxygène ou du protoxyde d'azote.

Pour diminuer la probabilité d'apparition de charges électrostatiques, le caoutchouc non conducteur, les matières plastiques, la laine et la plupart des tissus en fibres synthétiques sont à proscrire dans ces locaux.

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 locaux.

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. Pour cela, le revêtement des sols de ces locaux doit présenter une résistance au plus égale à 25×10^6 ohms).

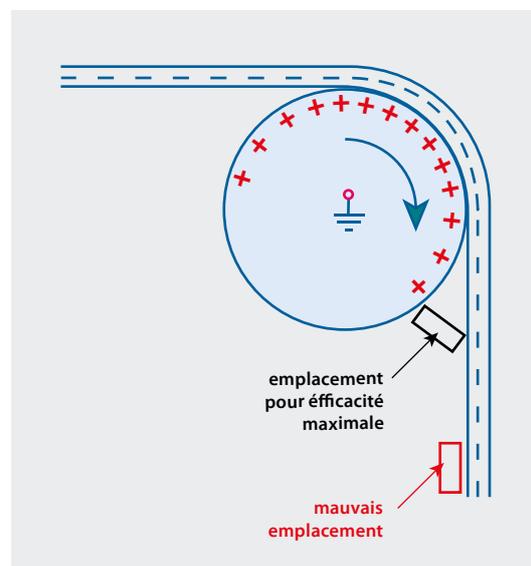


Figure 30. Emplacement efficace d'un éliminateur de charges

5



Autres nuisances de l'électricité statique

5. 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'empoussièrement de certains produits, etc. Dans ce chapitre, seront traités les cas des bureaux et des industries.

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 [quelques millijoules (mJ)], il peut être pénible par sa répétition dans les locaux de bureaux, ou avoir des conséquences graves s'il est à l'origine de chutes (figure 31).

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.

Lorsqu'une personne craint de s'être chargée électriquement (par exemple en descendant d'un véhicule par temps sec ou en marchant avec

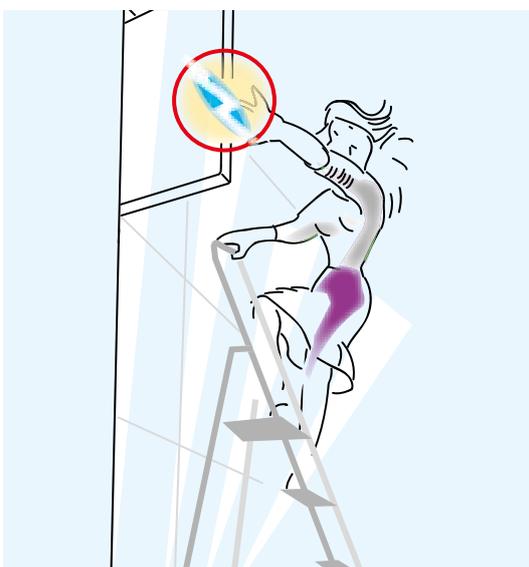


Figure 31. Accident résultant indirectement d'une décharge électrostatique

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 par exemple...), etc.

Pratiquement, les moyens les plus répandus pour se prémunir de ce risque 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.) ; privilégier les tissus en coton plutôt que les matières synthétiques ainsi que les semelles en cuir plutôt qu'en caoutchouc.
- 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

Les composants électroniques, type circuit intégré, sont sensibles à l'électricité statique (tableau 14). Des tensions aussi faibles que quelques dizaines de volts peuvent détruire un composant en provoquant un cratère dans les couches isolantes. On peut identifier deux situations pratiques dans lesquelles un composant risque d'être soumis à une décharge d'origine électrostatique :

- 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 au contact d'un plan conducteur.

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

Sur une chaîne de montage de composants électroniques, le niveau de protection vis-à-vis des décharges électrostatiques, doit être en adéquation avec la nature des opérations réalisées. Une zone protégée peut être un simple tapis pour dépannage ponctuel, un plan de travail, une salle, un atelier, toute l'entreprise (figure 32).



- ① Roulettes de sol
- ② Surface de pose
- ③ Testeur de bracelet
- ④ Testeur de chaussures
- ⑤ Plaque de pied pour chaussures
- ⑥ Cordon de poignet et bracelet
- ⑦ Cordon au sol
- ⑧ Mise à terre
- ⑨ Point de mise à terre
- ⑩ Point de mise à terre
- ⑪ Chaussures
- ⑫ Ioniseurs
- ⑬ Surface de travail dissipative
- ⑭ Siège avec pieds et patins de sol
- ⑮ Sol antistatique
- ⑯ Vêtements à faible charge
- ⑰ Étagère avec des surfaces mises à terre
- ⑱ Signe de la zone de protection contre les DES

Figure 32. Zone de sécurité électrostatique

Tableau 14 – Sensibilité des semi-conducteurs à l'électricité statique

Type de composant	Niveau de susceptibilité aux DES [en volts]
CMOS	250 – 3 000
Ampli-Op	190 – 2 500
VMOS	30 – 1 800
MOSFET	100 – 200
GaAsFET	100 – 300
EPROM	100
JFET	140 – 7 000
Transistor bi-polaire	380 – 7 000
Diodes Schottky	300 – 2 500
Logique Schottky TTL	1 000 – 2 500

Tout objet à l'intérieur d'une zone de sécurité électrostatique doit impérativement posséder des caractéristiques électrostatiques adaptées et 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 à l'intérieur de la zone.

Le principe de lutte contre l'électricité statique se résume en deux points :

- éviter la génération de charges ;
- permettre la dissipation des charges sans danger.

Les mesures de protection fréquemment rencontrées sont par exemple :

- opérateur à poste fixe : mise à terre par un bracelet,
- opérateur devant se déplacer : mise à terre par le sol via les chaussures,
- matériels conducteurs ou dissipateurs : mise à terre,
- matériel roulant : mise à terre par le sol via les roues,
- limiter la génération de charge : emploi de matériaux antistatiques, sinon emploi d'éliminateurs.

5.3. Exemples de mesures sur site industriel

Tableau 15. Potentiels électrostatiques mesurés au niveau des process et des opérateurs à proximité lors des situations de travail observées*

Situation de travail	Opération	Potentiel mesuré sur le process	Potentiel mesuré sur l'opérateur	Humidité relative [%]	Observation sur la mesure du process	Observations sur la mesure de l'opérateur
Ensachage de poudre	Mise en place d'une sachette plastique sur un GRVS**.	Mesure impossible	4	36	Mesure impossible car manque de place et cadence de l'opération trop importante.	Mesure sur l'opérateur après avoir ouvert et secoué la sachette avant sa mise en place
	Mise en place d'une sachette plastique dans un fût en carton.	7,5	1	57	Mesure sur l'ensemble bidon-sachette posé sur un soi-disant isolant.	
	Ensachage automatique.	18		40	Mesure sur la bande transporteuse (vitesse inférieure à 1 m/s).	Pas de poste fixe pour l'opération. Un opérateur peut cependant passer à proximité immédiate
Déconditionnement d'un GRVS avant chargement dans un réacteur	Retrait d'un film plastique autour d'un GRVS par arrachement et découpe.	15		53	Mesure sur la poudre après l'opération.	
		60 (pics jusqu'à 200)	8	53	Mesure sur le GRVS à la fin de l'opération. Les pics sont mesurés durant l'opération lorsque l'opérateur arrache le film plastique.	Mesure à la fin de l'opération. L'opérateur est à proximité immédiate du GRVS.
Chargement de poudre dans un réacteur	Versement manuel d'un sac (25 kg) dans une trémie.	2	2	71	Mesure sur l'ensemble sac-opérateur.	Mesure sur l'ensemble sac + opérateur. La faible quantité de charges s'explique par le fort taux d'humidité (71 %).
	Versement manuel d'un sac (2 kg) dans une trémie.	50	1	58	Mesure sur le sac en cours de versement.	La charge sur l'opérateur est faible, car malgré la quantité importante de charges, la surface rayonnante est faible.
	Chargement via une canne plongeante d'aspiration.	40	7	53	Mesure sur GRVS en cours d'opération.	Des mesures sur la passerelle métallique supportant l'opérateur et le GRVS ont montré des pics à 2 kV lors des mouvements de la canne plongeante indiquant une mauvaise mise à la terre de cette passerelle.
	Remplissage automatique d'un GRVS de type A (sans mise à la terre).	250	4	36	Mesure sur le GRVS en cours d'opération	Mesure sur l'opérateur situé à un mètre du GRVS. La structure métallique reliée à la terre supportant le GRVS permet de minimiser la charge par influence de l'opérateur.

Charge de l'opérateur par influence

Charge de l'opérateur par contact/séparation

* Les potentiels mesurés, avec une incertitude de 2,5 % en kV. Les valeurs indiquées sont des potentiels stabilisés. Les valeurs crêtes maximales sont, le cas échéant, mentionnées en observation. La température des lieux de travail était comprise entre 15 et 20 °C. À défaut d'information particulière notée

dans le tableau, la situation est optimale du point de vue de l'évacuation des charges avec un sol conducteur et une mise à la terre de l'installation.

** GRV(S) : Grand récipient vrac (souple).

Situation de travail	Opération	Potentiel mesuré sur le process	Potentiel mesuré sur l'opérateur	Humidité relative [%]	Observation sur la mesure du process	Observations sur la mesure de l'opérateur
Filmage	Filmage manuel d'une palette de pots métalliques.	4	1	67	Mesure sur le film entourant la palette en cours d'opération.	
	Mise en place d'une bâche plastique sur une cuve mobile métallique contenant du solvant.	5	4	90	Mesure sur la bâche en cours d'opération. Potentiel relativement élevé malgré un taux d'humidité de 90 %.	Potentiel relativement élevé malgré un taux d'humidité de 90 %.
	Filmage semi-automatique d'une palette de pots.	10	5	67	Mesure sur le film entourant la palette en cours d'opération	Mesure sur l'opérateur situé à proximité immédiate de la palette en cours de filmage.
	Filmage automatique avec dévidoir de film plastique à l'extérieur de la machine.	50	30	67	Mesure sur le rouleau de film plastique en cours d'utilisation.	Mesure sur l'opérateur situé à un mètre du rouleau. Pas de poste de travail fixe à proximité immédiate du rouleau, mais une zone de passage.
Transfert de liquide	Transfert d'un liquide conducteur par gravité d'un fût métallique à un autre.	1		90	Mesure sur les deux fûts. Le taux d'humidité élevé de 90 % et la mise à la terre des fûts expliquent la faible quantité de charges.	Mesure impossible sur l'opérateur seul, car il est situé sur le chariot automoteur soulevant le fût à vider.
	Transfert d'un liquide d'un GRV entouré d'une armature métallique vers une cuve métallique.	2		38	Mesure sur la cuve métallique	Mesure impossible sur l'opérateur seul, car il est situé sur le chariot automoteur soulevant le GRV.
		4			Mesure sur le GRV	
Mouvement de l'opérateur	Nettoyage à l'aide d'un aspirateur sur un sol en résine (supposé isolant).		8	40		Mesure effectuée sur l'opérateur en fin de nettoyage (lorsqu'il ne restait que peu de poussières).
	Marche sur un sol isolant.		1	40/57		Deux mesures réalisées dans des environnements de travail différents.
	Marche sur un sol carrelé (dissipateur de charges).		1	30		
	Marche sur un sol carrelé (dissipateur de charges).		10	30		Port d'une surveste en polaire par l'opérateur.
	Descente d'un chariot automoteur	4	1,5	45	Mesure sur le siège du chariot en matière plastique.	



Conclusions

La présence de charges électrostatiques sur les lieux de travail peut être à l'origine d'accidents de personnes ou de dysfonctionnements du matériel. Elle peut également compromettre le bon déroulement de certaines opérations de fabrication ou de manutention.

En matière de prévention des accidents d'origine électrostatique, il n'existe pas de solution type.

Le choix des dispositions à prendre, pour supprimer ou minimiser le risque, ne peut être fait qu'après prise en compte de l'ensemble des paramètres déterminants comme par exemple :

- la nature de l'activité de l'entreprise,
- les matières premières utilisées,
- la conception et l'implantation du matériel de fabrication et de manutention,
- l'atmosphère environnante.

Les mesures de prévention sont à choisir en fonction du résultat de l'analyse de risques. Il y a lieu de privilégier les mesures qui visent à supprimer la génération et l'accumulation de charges électriques. Parmi celles-ci on trouve par exemple :

- l'action sur les moyens de production : remplacement des éléments isolants par des éléments conducteurs, au sens électrostatique. Limiter la vitesse d'écoulement des liquides et des matières pulvérulentes. Limiter la hauteur de la chute dans l'alimentation gravitaire. Limiter la pression et les frottements sur les guides et les rouleaux d'entraînement ;
- l'action sur les produits utilisés : par addition de produits antistatiques pour diminuer la résistivité trop importante de certains liquides inflammables ;
- 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 ;
- l'action sur les sols : pas de sols ni de revêtements de sols non conducteurs ;
- l'action sur l'habillement du personnel : chaussures et vêtements antistatiques ;

La mise en œuvre de ces mesures est de la responsabilité de l'employeur.

Glossaire - Bibliographie

Glossaire

Antistatique : Matériau qui permet une migration facile des charges électriques sans pour autant être considéré conducteur électrique. Relié à la terre, le matériau antistatique n'accumule pas de charges électrostatiques.

On trouve également les termes : conducteur, dissipatif ou astatique

Décharge de cône : phénomène disruptif pouvant se produire lors du remplissage de silos par des produits pulvérulents chargés.

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.

Décharge en aigrette : phénomène disruptif pouvant se produire entre une surface en matériau isolant chargée d'électricité statique et une autre surface portée à un potentiel différent comme un élément conducteur mis à la terre.

Décharge glissante de surface : phénomène disruptif pouvant se produire entre une surface en matériau isolant formant condensateur avec une surface métallique généralement reliée à la terre.

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.

Effet de couronne : décharges partielles dans un gaz autour d'un conducteur nu ou légèrement isolé. L'effet de couronne produit habituellement de la lumière et du bruit.

Effet de pointes : ensemble des phénomènes électrostatiques dus à l'augmentation du champ électrique au voisinage des pointes. Des applications telles que les éliminateurs électrostatiques, les paratonnerres, utilisent ces phénomènes.

Étincelle : 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, les poudres et liquides à faible résistivité, etc.).

Bibliographie

Normes

UTE C 23-597 – Electrostatique. Code de bonne pratique pour éviter les risques dus à l'électricité statique, nov. 2004.

Norme NF C 15-211 – Installations électriques dans les locaux à usage médical, 2017.

Publications INRS

ED 911 – Les mélanges explosifs. Partie 1 : Gaz et vapeurs.

ED 944 – Les mélanges explosifs. Partie 2 : Poussières combustibles.

ED 945 – Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (ATEX). Guide méthodologique.

ED 6183 – Élimination des sources d'inflammation dans les zones à risque d'explosion.

ED 6345 – L'électricité.



Pour commander les brochures et les affiches de l'INRS,
adressez-vous au service Prévention de votre Carsat, Cramif ou CGSS.

Services Prévention des Carsat et de la Cramif

Carsat ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14, rue Adolphe-Seyboth
CS 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
prevention.documentation@carsat-am.fr
www.carsat-alsacemoselle.fr

(57 Moselle)
3, place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.carsat-alsacemoselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11, avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 69 45 10 12
fax 03 89 21 62 21
www.carsat-alsacemoselle.fr

Carsat AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80, avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 36
documentation.prevention@
carsat-aquitaine.fr
www.carsat-aquitaine.fr

Carsat AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal,
43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
Espace Entreprises
Clermont République
63036 Clermont-Ferrand cedex 9
tél. 04 73 42 70 19
fax 04 73 42 70 15
offredoc@carsat-auvergne.fr
www.carsat-auvergne.fr

Carsat BOURGOGNE - FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs,
39 Jura, 58 Nièvre,
70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
46, rue Elsa-Triolet
21044 Dijon cedex
tél. 03 80 33 13 92
fax 03 80 33 19 62
documentation.prevention@carsat-bfc.fr
www.carsat-bfc.fr

Carsat BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236, rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex 09
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drp.cdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

Carsat CENTRE - VAL DE LOIRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36, rue Xaintrailles
CS44406
45044 Orléans cedex 1
tél. 02 38 79 70 21
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-cvl.fr

Carsat CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
TSA 34809
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 45 71 45
cirp@carsat-centreouest.fr
www.carsat-centreouest.fr

Cram ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19, place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevdocinrs.cramif@assurance-maladie.fr
www.cramif.fr

Carsat LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29, cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@carsat-lr.fr
www.carsat-lr.fr

Carsat MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2, rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
doc.prev@carsat-mp.fr
www.carsat-mp.fr

Carsat NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85, rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
documentation.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.fr

Carsat NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11, allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 79 30
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr
www.carsat-nordpicardie.fr

Carsat NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours
CS 36028
76028 Rouen cedex 1
tél. 02 35 03 58 22
fax 02 35 03 60 76
prevention@carsat-normandie.fr
www.carsat-normandie.fr

Carsat PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2, place de Bretagne
44932 Nantes cedex 9
tél. 02 51 72 84 08
fax 02 51 82 31 62
documentation.rp@carsat-pl.fr
www.carsat-pl.fr

Carsat RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère,
42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie,
74 Haute-Savoie)
26, rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 97 92
fax 04 72 91 98 55
prevention.doc@carsat-ra.fr
www.carsat-ra.fr

Carsat SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse-du-Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35, rue George
13386 Marseille cedex 20
tél. 04 91 85 85 36
documentation.prevention@carsat-sudest.fr
www.carsat-sudest.fr

Services Prévention des CGSS

CGSS GUADELOUPE

Espace Amédée Fengarol, bât. H
Parc d'activités La Providence, ZAC de Dothémare
97139 Les Abymes
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13
risquesprofessionnels@cgss-guadeloupe.fr
www.preventioncgss971.fr

CGSS GUYANE

CS 37015
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01
prevention-rp@cgss-guyane.fr

CGSS LA RÉUNION

4, boulevard Doret, CS 53001
97741 Saint-Denis cedex 9
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss.re
www.cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes,
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 76 19 – fax 05 96 51 81 54
documentation.atmp@cgss-martinique.fr
www.cgss-martinique.fr

L'électricité statique fait largement partie de notre vie quotidienne : étincelles, vêtements qui collent à la peau, cheveux « électriques », etc.

Elle est aussi utilisée dans de nombreux procédés : photocopie, peinture, dépoussiérage, pulvérisation... Directement liée à la structure atomique des matières utilisées ou traitées, elle se crée spontanément, dans certaines conditions, au cours d'opérations de fabrication ou de manutention. Invisible, discrète, l'électricité statique se manifeste partout, souvent d'une façon anodine mais toujours insidieuse et parfois susceptible de détériorer des appareils ou des installations, voire de provoquer des explosions dans certains environnements.

Cette brochure, destinée aux responsables chargés de la sécurité des installations, bureaux d'études, services techniques, concepteurs de matériels, équipements et systèmes de prévention, explique le phénomène physique. Elle présente des mesures de prévention et de protection, illustrées par des exemples.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 6354

1^{re} édition • octobre 2019 • 3 000 ex. • ISBN 978-2-7389-2514-5

▶ L'INRS est financé par la Sécurité sociale - Assurance maladie / Risques professionnels ◀

www.inrs.fr

YouTube

