# Les risques électrostatiques : charges et décharges électrostatiques

Jean-Michel Dien

Résumé Cet article, destiné à introduire l'électrostatique auprès d'un public non averti, constitue un des supports

d'une conférence expérimentale présentant les dangers électrostatiques rencontrés en production lors d'opérations unitaires. Les différents mécanismes de charges et de décharges électrostatiques y sont présentés de façon très pédagogique. Certaines mesures préventives sont également abordées dans le cadre de la Directive ATEX. Les grandes classes de matériaux (conducteurs, isolants, dissipateurs) sont expliquées en même temps que les décharges en étincelle, aigrette, cône, couronne et de surface. Des

exemples tirés de l'expérience industrielle illustrent ces présentations.

Mots-clés Électrostatique, charge, décharge, exemple, industrie, maîtrise du risque chimique.

Abstract Electrostatic hazards: charging mechanisms and discharges

This paper, intended to introduce electrostatics to an uninformed public, describes an experimental conference on electrostatic hazards during unit operations as they can be found in the process industry. The different charging mechanisms and discharges are presented in a pedagogical way. Some preventive measures are also discussed in the frame of the European ATEX Directive. The material classes (conductive, insulating, dissipative) are explained together with the electrostatic discharges: spark, brush, propagating brush, cone,

and corona. Examples from the process industry describe the different topics related in the paper.

Keywords Electrostatics, charge, discharge, example, industry, safety.

et article a été rédigé dans le cadre d'un enseignement introductif des risques électrostatiques lors des Journées sur l'innovation et la recherche dans l'enseignement de la chimie (JIREC, Mulhouse, 3-5 juin 2009) • une deuxième version est disponible pour un public très averti, spécialiste des risques chimiques et connaissant parfaitement l'environnement ATEX. Il sert de support à la première partie d'une conférence expérimentale de trois heures qui simule une cinquantaine d'opérations unitaires industrielles classiques en rapport avec la manipulation de produits pulvérulents, de liquides, d'aérosols et de suspensions.

Dans le cadre de la protection contre les explosions, trois étapes primordiales ont été clairement définies lors de la mise en œuvre de la Directive ATEX en 2003 [1]. La première consiste toujours à essayer d'éliminer la présence d'une atmosphère explosive. Si cela n'est pas possible, la deuxième étape consiste à éliminer les sources d'ignition susceptibles d'être à l'origine d'une explosion. La troisième est envisagée dès que les effets de l'explosion doivent être limités. Les risques électrostatiques sont à étudier systématiquement dans le cadre de la deuxième priorité, à côté d'un panel plus conséquent de sources d'ignition présentées dans la norme européenne EN1127 [2].

Les décharges électrostatiques sont très fréquentes aussi bien dans la vie de tous les jours qu'en milieu industriel. Leur fréquence est telle qu'elles sont à l'origine de très nombreux incidents ou accidents industriels. Aussi est-il primordial de comprendre les mécanismes de formation de charges qui précèdent la décharge. Par la suite, toute analyse consiste à identifier le type de décharge pouvant se produire, ce qui permet alors de définir des mesures préventives très précises (qui constituent la deuxième partie du support de la conférence expérimentale et ne rentrent pas dans le cadre de cet article).

# Les phénomènes de formation de charges électrostatiques

Une surface peut se charger électrostatiquement selon cinq procédés [3]: « tribocharging », double couche,

contact, induction ou influence, effet couronne. Les quatre premiers sont les plus courants et sont expliqués ci-après (tableau I).

#### Charge par « tribocharging »

La charge dite par « tribocharging » s'applique uniquement à des corps solides. Le concept est basé sur des phénomènes de frottement et de séparation. Le fait de simplement frotter (sans séparer) ou de séparer (sans frotter) deux surfaces l'une de l'autre ne va jamais conduire à une charge. Seule la combinaison des deux permet une charge. Une des deux surfaces va se charger positivement et l'autre négativement. La polarité n'a que très peu d'influence sur l'expertise en électrostatique : une fois le matériau chargé, le risque électrostatique est présent. Ce type de charge s'applique par exemple à des personnes en mouvement : les semelles des chaussures se chargent et les contre-charges sont sur le sol. La vidange d'une poudre d'un sac s'accompagne toujours de la formation d'une telle charge : les phénomènes de frottement et de séparation de la poudre de la surface du sac mènent à une charge du sac et de la poudre. Lors d'une charge électrostatique par tribocharging, on observe ainsi toujours la charge de deux entités et non celle d'une seule (figure 1).

# Exemple d'accident industriel mettant en jeu une charge par tribocharging

Une poudre combustible isolante, conditionnée dans un GRVS (grand récipient pour vrac souple [4]) de type C

Tableau I - Les types de charge les plus courants. \*GRVS: grand récipient pour vrac souple [4].

Type de charge	Observé avec	Fréquence d'observation	Identification	Principe	Exemples
Tribocharging	des solides uniquement	très élevée	facile	frottement séparation	charge et vidange de poudres
Double couche	des liquides uniquement	très élevée	facile	frottement séparation	écoulement dans une conduite ; agitation d'un liquide
Contact	des solides et des liquides	normale	facile	transfert des charges par simple contact	répartition des charges d'une partie d'une installation à une autre jouxtant la première
Influence	des solides et des liquides	normale	très difficile	transfert par polarisation	à proximité d'un champ électrostatique émanant d'un GRVS* de type A, B, D ou C non mis à la terre

correctement mis à la terre, doit être introduite dans un réacteur contenant déjà un solvant inflammable ayant un point éclair inférieur à 55 °C par l'intermédiaire d'une trémie. L'installation est en inox et correctement mise à la terre. Lors de l'introduction, une explosion se produit au niveau de la trémie. Analyse : lors de la vidange de la poudre, des phénomènes de frottement et de séparation se produisent sur la surface interne du sac entre le sac et la poudre. Toutes les charges se trouvant sur le sac s'évacuent immédiatement et complètement grâce à la mise à la terre du sac. Les contrecharges se trouvent sur la poudre. Comme la poudre est isolante, la mise à la terre est inefficace. Une décharge électrostatique (une aigrette) a alors lieu entre la poudre chargée et l'installation. L'énergie de cette décharge suffit à enflammer les vapeurs de solvant et provoquer l'explosion. L'installation, y compris le sac conducteur, était quant à elle correctement mise à la terre.

Remarque: l'introduction d'une poudre dans un réacteur chargé en solvant inflammable via l'ouverture du trou d'homme est extrêmement dangereuse et nécessite soit des précautions astreignantes soit des contre-mesures supplémentaires, car les charges électrostatiques accumulées par tribocharging sur la poudre isolante ne peuvent jamais être éliminées.

#### Charge par double couche

La formation de charges par double couche ne s'applique qu'aux liquides et s'apparente en premier lieu fortement au tribocharging pour des solides. Un liquide s'écoulant dans un tuyau conduit à une charge de ce liquide et du tuyau. Une masse réactionnelle agitée dans un réacteur chimique conduit à une formation de charges sur le contenu et sur le contenant (figure 2). Plus la vitesse d'écoulement (ou de rotation) est importante, plus la formation de charges sera efficace.

### Exemple d'incident industriel mettant en jeu une charge par double couche

Une masse réactionnelle avec du toluène pour solvant isolant doit être agitée dans un réacteur industriel émaillé. Le réacteur est sous azote et le système peut être considéré comme inerte. Suite à ce batch, des irrégularités sont

Figure 1 - Exemples de formation de charge par tribocharging.

observées à la surface de l'émaille lors d'un contrôle visuel. Le réacteur est endommagé et l'émaillage doit être restauré. Analyse: lors de l'agitation, l'émail et la masse réactionnelle se chargent par double couche. Aucune des charges ne peut être éliminée par la mise à la terre de l'installation. Plus la vitesse d'agitation est importante, plus la génération de charges est importante. La densité de charges au niveau de l'émail est telle qu'une décharge électrostatique peut avoir lieu (une glissante). Ce phénomène est appelé claquage de l'émail.

#### Charge par contact

Le phénomène de charge par contact est le plus simple à comprendre : la charge d'un objet, initialement non chargé, se fait simplement par contact avec un autre objet déjà chargé. Une poudre chargée se déversant dans un récipient inox va communiquer par contact ses charges au récipient : il n'y a ici ni phénomènes de frottement, ni phénomènes de séparation. Lors d'une accumulation de charges par contact, les objets ont la même polarité.

### Exemple d'accident industriel mettant en jeu une charge par contact

Un opérateur, correctement mis à la terre, entreprend de transférer de l'acétate d'éthyle (solvant conducteur) depuis de petits bidons en plastique isolant d'un volume maximal de 5 L dans un fût métallique de 25 L. Au cours de la manipulation, une explosion se produit et l'opérateur est gravement brûlé.

Analyse: lors de l'écoulement de l'acétate d'éthyle depuis le bidon en plastique, le solvant et le bidon se chargent par double couche. Les charges accumulées au niveau du bidon isolant ne sont pas critiques du tout et ne sont pas responsables de l'explosion. Les contre-charges se trouvent sur l'acétate d'éthyle et sont communiquées par contact au fût métallique. Au fur et à mesure du remplissage et en tenant compte de la capacitance du fût, celui-ci se charge à des potentiels élevés. L'opérateur, en approchant sa main du fût métallique chargé, subit une décharge électrostatique (une étincelle) allant du fût vers sa main. Cette décharge est suffisamment énergétique pour enflammer l'atmosphère explosive.

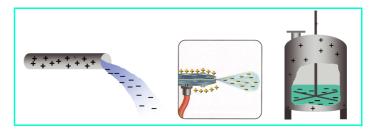


Figure 2 - Exemples de formation de charge par double couche.

Remarque: l'audit électrostatique des procédures mises en place dans les ateliers de production permet de comprendre comment les charges ont été générées et où elles se trouvent. En localisant exactement les charges, il est possible d'anticiper le sens de la décharge: ici du fût vers l'opérateur et surtout pas l'inverse. Ceci permet de comprendre pourquoi la mise à la terre de l'opérateur était certes nécessaire mais insuffisante.

#### Charge par influence

L'accumulation de charges par influence est de loin le phénomène le plus sournois, car l'objet A ainsi chargé est immobile et n'est pas en contact avec un corps chargé. Afin de comprendre ce cas de figure, la notion de lignes de champ électrostatique doit être introduite : l'objet ne peut être chargé que s'il se trouve dans le champ électrostatique d'un objet B déjà chargé. Les charges présentes sur l'objet B vont créer dans l'espace un champ électrostatique tout autour de lui, les lignes de champ constituant ce champ électrostatique. En l'absence d'un environnement particulier. les lignes de champ partent toutes de la surface B chargée vers l'environnement. Plus l'éloignement est important, plus le champ électrostatique est faible. Ainsi pour alimenter ce champ, les lignes de champ ont besoin de charges provenant de toute la surface chargée B. Petit à petit, la réserve en charges de l'objet B s'épuise jusqu'à ce qu'il soit complètement déchargé. Le temps associé à cette décharge est appelé temps de relaxation et peut varier de la fraction de seconde à plusieurs années. Si l'objet A est à proximité de B, dans son champ électrostatique, il va être bombardé, ou plutôt polarisé, par les charges provenant de B, alors qu'il n'y a ni contact ni frottement ni mouvement : les charges s'accumulent sur A par induction (ou influence).

Un exemple classique est l'utilisation en industrie de GRVS (également appelé à tort big-bag) pour la manipulation de poudres. Certains de ces sacs (types A, B et D), y compris leur contenu, peuvent se charger à des potentiels très élevés. Le champ électrostatique dans leur voisinage est alors puissant et va provoquer l'accumulation de charges sur tous les matériaux environnants, y compris les opérateurs. Au-delà d'une distance de 1 m, ce champ électrostatique est négligeable. Lors d'une accumulation de charges par influence, les objets ont tous la même polarité.

## Exemple d'accident industriel mettant en jeu une charge par influence

Des céréales combustibles doivent être conditionnées dans des fûts métalliques. Ces fûts sont placés sur un convoyeur à rouleaux et positionnés juste sous la trémie poudre pour le remplissage. Le positionnement des fûts n'est pas optimisé et ils ne sont pas toujours centrés par rapport aux bords du convoyeur et à la sortie de trémie : il en résulte une atmosphère explosive type poudre importante ; le fût en train d'être rempli ainsi que le suivant, distant de 0,5 m, sont dans cette atmosphère explosive. Le convoyeur est correctement mis à la terre. Lors du remplissage d'un fût, une inflammation a lieu au niveau du fût suivant alors qu'il ne contient aucune poudre.

Analyse: le fût en train d'être rempli se charge électrostatiquement par influence ou par contact en fonction de la résistivité de la poudre. Ces charges ne peuvent en aucun cas être responsables de l'explosion. Le convoyeur était certes correctement mis à la terre, mais pas les rouleaux métalliques qui restent isolés de l'installation car des joints en

plastique isolant sont utilisés pour les connecter au convoyeur. Le fût en train d'être rempli était correctement positionné sur le convoyeur et à égale distance des bords du convoyeur. Ce fût conducteur isolé émet alors un champ électrostatique dans son voisinage et provoque la charge par influence du fût suivant. Celui-ci, également isolé, n'était pas centré sur le convoyeur et était plus proche d'un des bords du convoyeur. Cette distance plus courte facilite alors la décharge électrostatique (une étincelle) qui a lieu dans l'atmosphère explosive et provoque l'explosion.

Remarque: mettre une installation à la terre semble trivial. Les statistiques concernant les accidents industriels sont sans appel: les mauvaises mises à la terre sont de loin la cause première des accidents d'origine électrostatique.

# Surfaces conductrices, dissipatrices et isolantes

Il existe trois types de matériaux ou de surfaces, caractérisés principalement par leur résistivité qui est la capacité d'un matériau à s'opposer au mouvement de charges. Ces surfaces peuvent être conductrices, isolantes ou dissipatrices et toutes peuvent se charger électrostatiquement : elles sont caractérisées par leur résistivité de surface. Par extrapolation, nous pouvons affirmer qu'il n'existe pas d'objet ou de surface ne pouvant pas se charger électrostatiquement.

Une surface conductrice est typiquement une surface métallique permettant aux électrons de se déplacer d'un endroit à un autre de cette surface. La résistivité de surface d'un matériau conducteur est inférieure à  $10^4$  ohms ( $\Omega$ ). Il est possible de charger artificiellement cette surface avec un appareil appelé générateur électrostatique. Ce générateur crée un champ électrostatique et la surface, que l'on va considérer dans un premier temps comme isolée, va être polarisée par des charges électrostatiques qui vont s'y accumuler. En admettant que la polarisation ne se fasse que dans un coin de la plaque conductrice, ces charges vont se répartir immédiatement et uniformément sur toute la surface conductrice, même là où la polarisation n'a pas eu lieu. Dès lors, une surface conductrice va pouvoir accumuler une quantité très importante de charges par unité de surface : c'est la densité de charges du matériau. Cette densité augmente jusqu'à ce que la densité de charges limite soit atteinte ou jusqu'à ce que la polarisation cesse. Si la polarisation cesse, les charges vont rester sur le matériau pendant longtemps : le matériau est électrostatiquement chargé. En reliant la plaque conductrice à une mise à la terre, les charges vont à nouveau se répartir sur le nouveau matériau conducteur (la mise à la terre) et on assiste à une évacuation immédiate et totale de toutes les charges vers la terre.

Les plastiques type Plexiglas, PP, PE, PVC ou PTFE sont des exemples de *matériaux isolants*: la résistivité de surface est supérieure à  $10^{11}~\Omega$ . Lorsqu'un coin d'une plaque isolante est polarisé avec le générateur électrostatique, les charges électrostatiques vont se concentrer uniquement dans ce coin: elles ne peuvent pas se déplacer. La répartition des charges n'est pas uniforme. La densité de charges augmente avec la durée de la polarisation jusqu'à ce que la densité de charges limite soit atteinte. D'une manière générale, la densité de charges d'un matériau isolant est moins importante que dans le cas d'une surface conductrice ou dissipatrice. Une mise à la terre du matériau isolant, même si elle se fait directement dans la zone de polarisation, n'amènera jamais un déchargement total : les charges resteront sur le matériau.

Un matériau dissipateur est classiquement un revêtement plastique (isolant) chargé en graphite (conducteur) ou avec un agent antistatique (conducteur). Sa résistivité de surface est comprise entre  $10^4$  et  $10^{11} \Omega$ . Tout comme dans le cas d'un matériau conducteur, un chargement local va mener à une répartition uniforme des charges électrostatiques sur toute la surface. La différence vient de la densité de charges : celle d'un matériau dissipateur est parfois plus limitée, car seule une quantité de charges définie peut s'y accumuler, même en l'absence totale de mise à la terre. En présence d'une mise à la terre, les charges, tout comme pour la surface conductrice, seront évacuées vers la terre, à la différence près que cette évacuation est plus lente car la résistance à la terre est plus élevée.

Non seulement une installation ou un équipement mais également son contenu (poudre, liquide, suspension ou aérosol) peuvent être conducteurs, isolants ou dissipateurs. Par contre, un gaz ne peut jamais être chargé.

#### Accumulation, évacuation ou décharge

Le premier danger le plus courant en électrostatique est d'être persuadé qu'il est impossible d'accumuler des charges sur une installation industrielle en métal et qu'elle ne présente donc aucun risque. Ceci est à l'origine de la plupart des incidents. En effet, c'est uniquement si l'installation est correctement mise à la terre qu'il n'y a pas de danger. Cette capacité à dissiper les charges vers la terre est couramment appelée « évacuation ».

Le deuxième danger le plus courant est d'être persuadé qu'une installation correctement mise à la terre ne peut pas présenter de dangers électrostatiques. Comme expliqué précédemment, certains phénomènes de formation de charges conduisent systématiquement à la génération de charges électrostatiques sur deux entités : typiquement sur l'installation (le contenant) et sur le produit (le contenu). L'évacuation des charges par la mise à la terre ne fonctionne que pour les objets conducteurs ou dissipateurs, jamais pour les isolants. Ainsi un solvant isolant ou un matériau pulvérulent isolant ne se déchargera que très peu dans une installation conductrice, même si celle-ci est correctement mise à la terre. L'accumulation de charges sur l'isolant se poursuivra jusqu'à ce que la densité de charges maximale soit atteinte. S'ensuit alors une décharge électrostatique qui va se produire soit à l'intérieur soit à l'extérieur. Si le produit est trop chargé, la décharge n'aura lieu qu'à l'intérieur. Cette décharge peut conduire à une explosion si une atmosphère explosive est présente (figure 3).

#### Gaz, vapeurs, poudres, granulés, émulsions et aérosols

Les vapeurs de solvants inflammables, qui sont en général plus lourdes que l'air, peuvent toujours être enflammées par toutes les décharges électrostatiques, à part la couronne. Tous les gaz, ainsi que les vapeurs de solvants inflammables, sont répartis dans trois groupes d'explosivité. Les deux premiers, IIA et IIB, regroupent les gaz ou les vapeurs usuels. Le dernier groupe, IIC, se caractérise par des énergies minimales d'inflammation extrêmement basses (< 0,025 mJ) et comporte des éléments comme l'hydrogène ou l'acétylène. Une décharge en couronne n'est efficace que pour le groupe IIC. Les autres décharges sont efficaces pour tous les groupes.

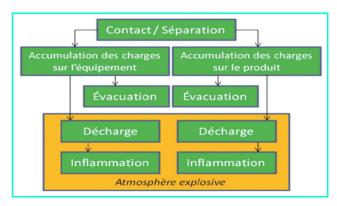


Figure 3 - Principe de base charge/évacuation/décharge [6].

Dès que le point éclair d'un solvant est inférieur à 55 °C ou dès que la température de travail en production est supérieure au point éclair, toutes les décharges électrostatiques, à part la couronne, deviennent des sources d'ignition possibles.

Une poudre présente toujours une granulométrie inférieure à 0,5 mm car au-dessus de cette valeur, il s'agit de granulés. Contrairement à des granulés, une poudre peut être enflammée par une source d'ignition d'origine électrostatique. Les risques électrostatiques pour une poudre ne peuvent être étudiés que sur la base de propriétés physico-chimiques réalisée sur un échantillon ayant une médiane inférieure ou égale à 63 μm. Cette limite permet d'apprécier les risques liés à la présence de fines dans la poudre. Plus la granulométrie est petite, plus les risques sont importants. Une des grandeurs physico-chimiques les plus importantes est l'énergie minimale d'inflammation (EMI). Cette EMI représente l'énergie minimale que doit dégager une décharge électrostatique pour enflammer la poudre (figure 4). L'énergie maximale pouvant être libérée par une décharge électrostatique est inférieure à 1 J. Toutes les poudres ayant une EMI supérieure à 1 J ne posent donc aucun problème électrostatique. Plus l'EMI d'une poudre est basse, plus les risques sont importants. En dessous de 3 mJ, ces risques sont considérés comme pratiquement permanents.

Au sens électrostatique du terme, il existe deux types de poudres : les sèches et les humides. Une poudre est sèche lorsque sa teneur en solvant inflammable est inférieure à 0,5 % en masse et inversement, elle est humide lorsque cette teneur est supérieure à 0,5 % en masse. Cette différence est capitale, car certaines décharges électrostatiques ne sont efficaces que pour des gaz ou des vapeurs alors que d'autres le sont en permanence. Le danger provenant d'une poudre humide ne provient pas de la poudre elle-même mais des vapeurs de solvant qui en émanent et qui sont beaucoup plus faciles à enflammer (EMI de l'ordre de 0,2 mJ) que la poudre (EMI > 1 mJ).

Lorsqu'une poudre est en présence de vapeurs ou de gaz, le système ainsi constitué est appelé mélange hybride : l'EMI et la limite inférieure d'explosivité de l'hybride sont plus basses que pour les constituants pris séparément.

Cette limite de 0,5 % en masse est particulièrement significative à la sortie des sécheurs, car si la poudre est considérée comme sèche du point de vue analytique, elle ne l'est pas du point de vue électrostatique. Ceci conduit à des mises en zones ATEX radicalement différentes.

Dans le même ordre d'esprit, une émulsion est définie du point de vue électrostatique dès que la teneur en solide dans

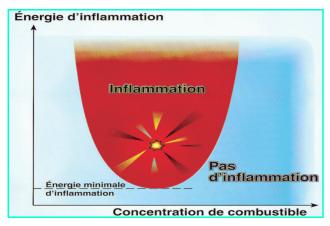


Figure 4 - L'énergie minimale d'inflammation, EMI (image issue de [6]).

le liquide est supérieure à 0,5 %. Au-delà de cette limite, il est impossible de limiter l'accumulation de charges électrostatiques du mélange isolant et donc d'éviter la décharge.

#### Les décharges électrostatiques

Il existe six types de décharges électrostatiques [7] : l'étincelle, l'aigrette, la glissante, la cône, la couronne, et l'éclair.

#### L'étincelle

L'étincelle est une décharge électrostatique entre deux conducteurs, l'un des deux au moins n'étant pas mis à la terre (figure 5a). Cette décharge électrostatique est la plus courante parmi toutes les décharges : elle est également à l'origine de la grande majorité des incidents industriels. Les charges électrostatiques participant à la décharge proviennent d'un corps conducteur. Ainsi l'ensemble des charges présentes sur cet objet va participer à la décharge. La décharge est alors puissante, souvent visible à l'œil nu et peut enflammer des vapeurs, des gaz ou des poudres inflammables. Après la décharge, l'objet est entièrement déchargé. Une étincelle provenant d'un opérateur délivre une énergie de l'ordre de 10 mJ. Partout où des zones ATEX ont été définies, la mise à la terre des objets conducteurs est obligatoire. La seule contre-mesure pour éviter une étincelle est de mettre à la terre les objets conducteurs et dissipateurs. Mettre à la terre un conducteur revient à s'assurer que la résistance à la terre soit toujours inférieure à  $10^6 \Omega$ . Les opérateurs, qui ont des semelles dissipatrices, doivent présenter une résistance à la terre inférieure à  $10^8 \Omega$ .

#### Exemple d'accident industriel mettant en jeu une étincelle

Un opérateur, équipé de chaussures de sécurité dissipatrices, vaque à ses occupations sur un sol suffisamment conducteur et correctement mis à la terre. Il est à l'origine d'une décharge électrostatique de type étincelle provenant de sa main vers l'installation inox également correctement mise à la terre. Cette décharge enflamme l'atmosphère explosive présente.

Analyse: le caractère dissipateur (ou antistatique) d'un objet n'est jamais permanent (ici les chaussures). Les semelles peuvent être contaminées par une poudre ou un solvant isolant et deviennent avec le temps isolantes. L'opérateur devient alors un conducteur isolé.

Remarque: de tels exemples sont légion. Le cas des semelles dissipatrices peut être étendu à toutes les surfaces ou objets antistatiques.

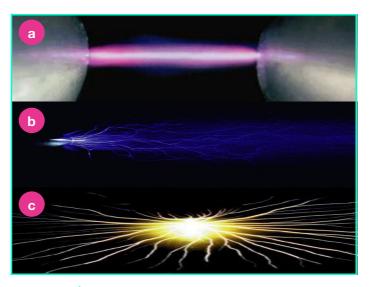


Figure 5 - (a) Étincelle ; (b) Aigrette ; (c) Glissante (images issues de [6]).

#### L'aigrette

L'aigrette est une décharge électrostatique entre un isolant et un conducteur (figure 5b); peu importe que le conducteur soit mis à la terre ou non. Les charges impliquées dans la décharge proviennent toutes de la surface isolante. Ainsi seules les charges à proximité du conducteur vont participer à la décharge : la décharge est locale, de faible intensité, rarement visible à l'œil nu. Cette décharge est facilitée si les lignes du champ électrostatique émanant de l'isolant peuvent se concentrer sur le conducteur. L'aigrette libère une énergie maximale de l'ordre de 3 mJ et ne peut enflammer que les gaz, les vapeurs et les poudres humides, mais pas les poudres sèches. Cette particularité s'explique par la répartition spatiale et temporelle de l'énergie alors qu'une étincelle de même énergie peut tout enflammer. L'étincelle libère son énergie dans un laps de temps très court (signal fin et élevé), l'aigrette libèrera la même énergie dans un laps de temps plus long et un espace plus large (signal large et faible). Afin de limiter les dangers provenant des aigrettes pour des atmosphères vapeur, gaz ou hybride, il suffit de limiter la taille des surfaces isolantes – pour une zone 1 IIC : 20 cm<sup>2</sup> par exemple -, ou bien limiter la taille maximale des bidons en plastique isolant en zone 1 à 5 L, etc.

#### Exemple d'accident industriel mettant en jeu une aigrette

Une poudre ayant une teneur en solvant inflammable supérieure à 0,5 % en masse doit être conditionnée dans un GRVS de type C. Ce GRVS est conducteur et correctement mis à la terre. Afin de protéger la poudre d'une contamination extérieure, il est décidé d'introduire une sache isolante [4] dans le sac. Cette sache présente une tension de claquage inférieure à 4 kV. Lors du remplissage du sac, une explosion se produit et détruit l'atelier de production.

Analyse: une tension de claquage inférieure à 4 kV prévient la formation d'une glissante mais la sache reste tout de même isolante. La sache se charge par tribocharging et est à l'origine d'une aigrette entre la sache et l'opérateur, même si celui-ci est correctement mis à la terre. L'aigrette n'enflamme pas le nuage de poussière mais les vapeurs de solvant. Ensuite seulement il y a inflammation du nuage.

Remarque: tous les GRVS utilisés dans des zones explosives doivent présenter un certificat conforme à la

norme IEC61340-4-4 [4]. Cette norme fait abstraction des saches internes. Seules certaines combinaisons sont acceptables. Rares sont les fournisseurs connaissant les combinaisons sûres.

#### La glissante

La glissante est une décharge électrostatique mettant en général en jeu une poudre ou un liquide isolant s'écoulant dans une conduite isolante à des vitesses importantes typiques des transports pneumatiques (figure 5c). Lors d'une charge par tribocharging ou par double couche, le revêtement intérieur de la conduite va accumuler des charges d'une certaine polarité. À l'extérieur de la conduite, que ce soit un revêtement conducteur ou non, des contre-charges de polarités inverses vont s'accumuler. La glissante va alors consister en un plasma, trouant la conduite, et permettant la jonction des charges et des contre-charges : la décharge a lieu aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la conduite.

Une glissante est très puissante et facilement repérable : elle peut percer un revêtement plastique isolant d'une épaisseur allant jusqu'à 8 mm. Elle peut enflammer toutes les atmosphères explosives possibles. Elle a la particularité d'être destructrice dans le sens où l'intégrité du système peut être compromise. Nombreux sont les accidents en milieu industriel faisant intervenir des glissantes, y compris dans des systèmes initialement parfaitement inertes. Dans le cadre de la définition de contre-mesures ATEX, l'inertage d'un système dans lequel des glissantes peuvent intervenir doit toujours être analysé très précisément. Un inertage ne prévient jamais une décharge électrostatique. Des mesures basées sur une étude des tensions de claquage, une réduction des vitesses d'écoulement ou d'augmentation de la conductivité permettent d'éliminer plus sûrement le danger inhérent aux glissantes.

#### Exemple d'accident industriel mettant en jeu une glissante

De l'hexaméthyldisiloxane (HMS, liquide inflammable très isolant et très corrosif) doit être transporté d'un atelier à un autre sur une distance de 100 m. À cause du caractère très corrosif du HMS, seules des conduites plastiques peuvent être utilisées. Connaissant les dangers électrostatiques liés aux aigrettes, l'atelier décide de pousser le HMS sous pression d'azote : le système est donc inerté. Afin de palier aux problèmes de manque de rigidité de cette longue conduite, celle-ci est enchâssée à l'intérieur d'une deuxième conduite conductrice mise à la terre. Après plusieurs mois d'utilisation, une explosion détruit toute la conduite et entraîne un feu important dans l'atelier.

Analyse: la vitesse d'écoulement du HMS augmente considérablement lorsqu'on pousse à l'azote. Il en découle un chargement par double couche important du HMS et de la conduite plastique. La densité de charges au niveau de la conduite plastique augmente jusqu'à ce qu'une glissante se produise entre l'intérieur et l'extérieur de la conduite isolante, conduisant à la formation d'un plasma : la conduite est trouée. Mois après mois, du HMS perle par cette fuite et s'accumule entre les deux conduites. La prochaine décharge de type glissante enflamme alors ce mélange explosif.

Remarque : la glissante est la seule décharge électrostatique « destructrice » : aucune autre décharge n'est capable de passer à travers un matériau aussi épais. Si une glissante peut se produire dans un système, un inertage peut ne pas être suffisant, contrairement à toutes les autres décharges électrostatiques.

#### La cône

La décharge cône est une décharge électrostatique qui ne se produit qu'avec des poudres très isolantes. Leur résistivité doit être supérieure à  $10^{10}\,\Omega$ .m. La poudre doit être préalablement chargée, typiquement lors d'un transport pneumatique, et l'installation doit avoir des particularités géométriques particulières. La granulométrie tient ici un rôle spécial. Pour toutes les décharges électrostatiques, sauf la cône, une granulométrie faible va augmenter les risques électrostatiques. Dans le cas des cônes, le risque augmente avec la granulométrie. Si la décharge en cône se produit, les fines seront alors les plus exposées. Les mesures préventives classiquement introduites en production sont basées sur la géométrie des installations, plus particulièrement des silos. Même si les cônes ne se produisent qu'en présence de poudres, elles peuvent enflammer toutes les atmosphères explosives.

#### Exemple d'accident industriel mettant en jeu une cône

Des céréales doivent être stockées dans un silo vertical de 30 m de haut. Lors du remplissage pneumatique avec un nouveau type de céréales, une explosion détruit le silo en béton. Analyse : le danger lié à une cône est, entre autres, basé sur la granulométrie et la géométrie de l'installation (le diamètre du silo). Un silo prévu pour un certain type de céréales peut ne plus convenir pour les nouvelles céréales. L'énergie dégagée par une décharge en cône peut facilement être estimée de façon empirique pour des silos ayant des diamètres inférieurs à 3 m. Cette énergie équivalente est à comparer avec l'EMI de la poudre. Si elle est supérieure, une explosion est possible.

Remarque: le cas des silos peut être extrapolé à toute enceinte recevant une importante quantité de poudre (trémie poudre, atomiseur etc.).

#### La couronne

La couronne est une décharge électrostatique faisant intervenir le phénomène de pointe. Elle est très rare en milieu industriel et n'a une importance significative que pour les atmosphères IIC. Elles peuvent également avoir un rôle plus important lors de l'utilisation très particulière de GRVS de type D, même pour des atmosphères IIA et IIB.

#### Exemple d'un accident industriel mettant en jeu indirectement une couronne

Un GRVS de type D est chargé avec une poudre sèche ayant une EMI de 100mJ. Un opérateur mis à la terre s'approche de l'installation et provoque une explosion de l'atmosphère explosive.

Analyse: de par son principe de fonctionnement (effet couronne), le GRVS provoque le chargement par influence de toute l'installation placée à moins de 1 m du sac, y compris l'opérateur. Celui-ci ne doit pas être obligatoirement mis à la terre, car l'EMI de la poudre est trop élevée ; la capacitance de l'opérateur étant trop faible. En s'approchant de l'installation non mise à la terre, il subit une étincelle allant de l'installation vers lui.

Remarque : les accidents directement liés à une couronne sont extrêmement rares et font toujours intervenir des substances du groupe IIC, plus particulièrement de l'hydrogène, car les EMI sont inférieures à 0,025 mJ. Les accidents mettant en jeu indirectement une couronne sont également rares et peuvent être observés avec des

Tableau II - Résumé des différents types de décharges électrostatiques. \*GRVS : grand récipient pour vrac souple.

Type de décharge	Description	Fréquence d'observation	Dangerosité principale	Exemples	
Étincelle	conducteur isolé → conducteur	très élevée	Zone ATEX 0 1 2 20 21 22	- opérateur non mis à la terre - installation mal mise à la terre	
Aigrette	$isolant \to conducteur$	très élevée	Zone ATEX 0 1	<ul> <li>utilisation de sacs en plastique isolant en présence de vapeurs de solvants</li> <li>utilisation de bidons en plastique pour des liquides inflammables</li> </ul>	
Glissante	<ul><li>solides ou liquides isolants</li><li>vitesse de transport élevée</li><li>équipement isolant</li></ul>	normale	Zone ATEX 0 1 20 21	- utilisation de conduites ou de revêtements isolants lors du convoyage pneumatique d'une substance isolante	
Cône	- solides très isolants - solides préalablement très chargés - configuration géométrique particulière de l'installation	normale	Zone ATEX 20 21  - remplissage des silos - chargement d'une importante quanti poudre		
Couronne	phénomène de pointe	faible	Groupe IIC	- utilisation de GRVS* type D	

Tableau III - Efficacité des décharges électrostatiques.

Type de décharge	Atmosphère gaz/vapeur IIA & IIB Zones ATEX 0 1 2	Atmosphère gaz / vapeur IIC Zones ATEX 0 1 2	Systèmes hybrides IIA & IIB Zones ATEX 0 1 2 20 21 22	Atmosphère poudre  Zones ATEX 20 21 22
Étincelle	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible
Aigrette	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible	Explosion impossible
Glissante	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible
Cône	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible	Explosion possible
Couronne	Explosion impossible	Explosion possible	Explosion impossible	Explosion impossible

substances n'appartenant pas au groupe d'explosivité IIC, comme dans ce cas.

#### L'éclair

L'éclair est une décharge électrostatique très bien connue et contre laquelle pratiquement tous les bâtiments de production sont très bien protégés.

Un résumé des différents types de décharges électrostatiques est présenté dans le *tableau II*.

#### **Conclusion**

Reconnaître le type de matériaux (conducteur, isolant, dissipateur) présents dans un atelier de production et identifier le type de charge (tribocharging, double couche, induction, transfert, couronne) correspondant au procédé utilisé permet facilement de localiser les charges électrostatiques et de fixer son attention sur une ou deux décharges électrostatiques. Rares sont les procédés pouvant générer en même temps trois types de décharges électrostatiques différents. La décharge électrostatique de type étincelle ne doit jamais être éliminée d'une étude de sécurité, même si l'installation est a priori correctement mise à la terre. Elle est la cause de la plupart des incidents. Une poudre isolante présentant une EMI faible (< 3 mJ) combinée à une installation ayant un volume intérieur conséquent (> 2 m<sup>3</sup>) conduit très souvent à un risque important. En présence d'une atmosphère vapeur ou gaz, la décharge électrostatique de type aigrette ne doit pas non plus être éliminée, même si l'installation conductrice est correctement mise à la terre. Lors du transport pneumatique d'un liquide ou d'un pulvérulent isolant dans une installation présentant un revêtement isolant, la décharge de type glissante ne doit jamais être négligée (voir tableau III).

#### Références

- [1] Directive 1999/92/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé les travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.
- [2] NF EN 1127-1. Atmosphères explosives. Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion. Partie I: Notions fondamentales et méthodologiques. Afnor, Paris, 1997.
- [3] Glor M., Electrostatic Hazards in Powder Handling, John Wiley & Sons, 1988.
- [4] Norme internationale IEC61340-4-4, 2005, Partie 4.4 « Classification électrostatique des grands récipients pour vrac souples (GRVS) », Première édition oct. 2005.
- [5] Brochure Thuba Switzerland « Les dangers d'allumage par charge électrostatique dans l'industrie des procédés », mai 2001.
- [6] Brochure IVSS « Statische Elektrizität », 1995.
- 7] T 033, TRBS 2153, « Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung », BG RCI, 2009.



Ancien élève de l'École de Chimie de Mulhouse, avec pour spécialités la sécurité des procédés, **Jean-Michel Dien** est titulaire d'un DESS dans ce domaine ainsi que d'un doctorat ayant pour thème les décompositions autocatalysées. Il a travaillé près de dix ans chez Wacker-Chemie en Allemagne comme responsable du Groupe Sécurité et Optimisation et du Pilote. Il a rejoint l'Institut Suisse de Sécurité en 2003 et dirige la partie internationale de SWISSI Process Safety\* en tant qu'expert et conseiller dans les domaines de la

sécurité des procédés, plus particulièrement en électrostatique et dans le cadre ATEX. L'étude et l'utilisation sûre des GRVS/FIBC dans l'industrie sont l'une de ses principales activités à côté de la sécurité thermique des procédés.

Swiss Institute of Safety & Security, Schwarzwaldallee 240, WRO-1055.5.26, CH-4002 Bâle (Suisse).

Courriel: jean-michel.dien@swissi.ch