

Si dans une peinture nitrocellulosique, on introduit de l'aluminium et de l'oxyde ferrique ou du minium (Pb_3O_4) la couche obtenue, dans laquelle l'oxydant et l'aluminium sont en contact intime, donne lieu, sous le choc, à la production d'étincelles très violentes.

Mais si on applique une couche de peinture à l'aluminium sur une surface d'acier ayant reçu une première couche de peinture "anti-rouille" renfermant Fe_2O_3 ou Pb_3O_4 il faut des chocs assez énergiques pour tirer des étincelles ; on peut supposer que dans la couche antirouille, l'oxyde de fer ou de plomb a été rendu moins actif par l'huile de lin ou les autres constituants de cette peinture.

Les expériences de KINGMAN ont également montré que c'est surtout après avoir porté la surface peinte (peinture appliquée sur une surface anti-rouille) à une certaine température qu'on en tire par le choc des étincelles incendiaires ; avec les peintures nitrocellulosiques un chauffage de $100^{\circ}C$ suffit, pour des peintures à l'huile il faut chauffer à 150 ou $200^{\circ}C$ pour que la peinture soit suffisamment altérée pour donner lieu à étincelle sous le choc.

Manifestement une telle modification peut être produite si un réservoir a été exposé à la chaleur d'un incendie voisin.

7.2.6. Précautions à prendre vis-à-vis des étincelles mécaniques.

Les opérations industrielles donnant lieu à des chocs ou frottements sont nombreuses, outre le maniement des outils à main (marteaux, burins, pelles....) citons les broyages de corps solides l'usinage et le polissage par abrasion des métaux.

On peut observer d'ailleurs que le fonctionnement de nombreux mécanismes repose sur des actions de ce genre (déclics, actions de cames, arrêt sur des butées, freinage par frottement).

A ces causes normales, viennent s'ajouter toutes sortes de causes accidentelles qui sont aussi productrices de points chauds, comme par exemple la rupture d'une pièce en mouvement à l'intérieur d'un carter la lubrification déficiente des surfaces frottantes.

Les possibilités de production des points chauds et d'étincelles de choc ou de friction sont si nombreuses, qu'il ne peut être question que d'indiquer quelques unes des mesures que l'on peut prendre pour minimiser les risques qui s'y rapportent dans les lieux où une atmosphère explosive est éventuellement présente

- 1°) Les machines seront autant que possible d'un type ne donnant pas lieu à des chocs violents (chocs de cames par exemple) ; on recherchera celles dont les parties mobiles ont une vitesse modérée, on surveillera la bonne lubrification des paliers afin qu'ils ne chauffent pas exagérément.
On veillera à ce que les courroies ne patinent pas et à ce que les rouleaux sur lesquels passent des bandes transporteuses ne soient pas bloqués.
On surveillera le bon état des ventilateurs, car si le rotor prend un certain jeu, il peut en résulter un frottement, ou même une rupture avec production de points chauds ou d'étincelles.
- 2°) Lors du chargement des malaxeurs et des broyeurs, on évitera l'introduction accidentelle de corps étrangers, car ils peuvent donner lieu à des frictions dangereuses entre la cuve de l'appareil et le mécanisme intérieur ; on a avantage à introduire des matières pulvérulentes à brasser en les faisant passer à travers un tamis disposé au dessus de l'ouverture de chargement ; des corps étrangers ferreux peuvent aussi être retenus au moyen d'un séparateur magnétique.
- 3°) Les machines dont le fonctionnement donne nécessairement lieu à des étincelles (par exemple meules servant à affûter les outils) seront installées loin des atmosphères dangereuses.
- 4°) Si on doit découper à la scie à métaux une paroi d'acier on fera couler un filet d'eau sur la lame pendant toute l'opération
- 5°) On proscrira des locaux les appareils ou les pièces en alliage de Magnésium, on évitera de recouvrir les surfaces métallique d'une peinture à l'aluminium.
- 6°) Les outils mis à la disposition du personnel seront en bois dur, en caoutchouc durci, en bronze ou en alliage non étincellant ; le personnel devra être averti que ces derniers peuvent produire, en dépit de leur nom, des étincelles dangereuses s'ils sont maniés brutalement.
- 7°) Le personnel sera invité à porter des chaussures sans clous ni ferrures, à moins que le sol ne soit constitué par des pavés en bois ou en matériau ne donnant pas lieu à étincelles.

On a eu des exemples d'explosion, dont la cause était, sans aucun doute, la marche sur un sol cimenté, avec des chaussures à clous, on le fait de sauter d'une hauteur de 0,30m dans une cuvette en béton alors qu'elle renfermait des vapeurs d'essence ou d'acétone.

7.3. Les dangers de l'électricité statique.

7.3.1. Universalité du phénomène d'électrisation.

L'apparition occasionnelle d'électricité statique à la surface de corps variés est un phénomène bien connu, quoique souvent mal compris.

Chaque fois que deux corps en matières différentes sont en contact, des électrons passent de l'un vers l'autre et l'interface est constituée par une couche électrique double, à travers laquelle il y a une différence de potentiel qui est généralement d'une petite fraction de volts ; le corps qui a perdu des électrons est chargé positivement, celui qui les a reçus est chargé négativement.

Si les deux corps sont l'un et l'autre conducteurs, quand ils se séparent les électrons excédentaires de l'un retournent dans l'autre avant que le contact soit complètement rompu ; mais si l'un des corps (ou l'un et l'autre) est isolant, ce retour des électrons est gêné, et après séparation, les deux corps, à moins qu'ils ne soient l'un et l'autre reliés électriquement à la terre, conserveront une charge électrique et présenteront une différence de potentiel plus ou moins grande.

Ici il faut dire que, vis-à-vis de l'électricité statique, on doit considérer comme conducteur tout corps dont la résistivité est inférieure à 10^9 ohm - cm.

Le cuir est ici un conducteur mais non le bois sec, dont la résistivité dépasse 10^{10} ohm - cm.

Les meilleurs isolants possibles, comme les caoutchoucs vulcanisés, ont une résistivité de 10^{17} à 10^{18} ohm-cm.

Toutefois, ces isolants quand ils sont placés dans une atmosphère dont le degré hygrométrique dépasse 70%, s'humidifient en surface et deviennent alors quelque peu conducteurs superficiellement.

La résistance d'un sol en ciment ou en carrelage, non mouillé, est de 10^8 à 10^9 ohm.

Une chaussée asphaltée, sauf si elle est couverte par la pluie, est très peu conductrice, d'autre part, à cause de leurs pneus les véhicules automobiles ne sont pas reliés électriquement au sol (ou comme on dit couramment ne sont pas "mis à la terre").

Le phénomène de production des charges électrostatiques est très général : chaque fois qu'il y a contact, puis séparation de deux phases différentes des charges électriques apparaissent et subsistent sur les corps qui ne sont pas mis à la terre.

A moins de nous trouver dans un environnement absolument en repos il apparaît constamment, et il se dissipe également peu à peu, des charges électriques sur nous mêmes et sur les objets qui nous entourent.

Ces charges ne sont dangereuses que si elles ont pu s'accumuler et que soit atteint en un point un potentiel suffisant pour donner lieu à une décharge disruptive (étincelle) phénomène dans lequel une certaine énergie est brusquement libérée en un temps très court dans un petit volume.

Si une étincelle d'énergie suffisante jaillit dans un gaz explosif elle déclenche l'explosion.

7.3.2. Electrisation d'un opérateur.

Que le corps soit susceptible de s'électriser à un degré considérable, quand la peau est bien sèche, est montré par l'expérience suivante :

un opérateur frotte les jointures des phalanges d'une main contre une manche en laine, puis vient les mettre en contact avec le bord de l'orifice d'un bec Bunsen dont s'échappe du gaz de ville ; avant que le contact s'établisse, une étincelle jaillit et allume le jet de gaz ; l'expérience ne réussit qu'avec une personne ayant la peau parcheminée et bien sèche.

Quel que soit l'état de sa peau, une personne portant des chaussures et des vêtements s'électrise du fait de la marche et à cause des mouvements de ses vêtements.

Circulant sur un sol conducteur (terre humide) la charge électrique qu'un homme, porteur de chaussures non conductrices acquiert est peu élevée ; en revanche la circulation sur un sol non conducteur rend possible l'accumulation de charges électriques quelle que soit la nature des chaussures qu'il porte. Le port de chaussures conductrices est à recommander partout où l'on veut éviter les étincelles d'électricité statique.

On doit considérer comme non conductrice des chaussures qui présentent une résistance supérieure à 100 megohms.

Sous le nom de chaussures "antistatiques" on fait des chaussures dont la semelle en caoutchouc renfermant des charges spéciales a une résistance de l'ordre de 0,5 à 1 megohm.

Le personnel devrait aussi dans la mesure du possible porter des chaussettes en coton de préférence à la laine dont la résistivité est élevée, et surtout s'abstenir de porter des vêtements et sous vêtements en fibres synthétiques de la famille des polyamides (nylon) ou des polyester (tergal).

La capacité électrique d'un homme dépend dans une large mesure de l'environnement dans lequel il se trouve ; elle peut varier de 100 à 400 pico farads ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$), cette dernière valeur ayant été mesurée sur un ouvrier vêtu d'une veste en cuir et penché au-dessus d'une rambarde en acier.

MOVILLIAT et MONOMAKHOFF ont mesuré les valeurs suivantes :

- sur un opérateur, chaussé de bottes isolantes en caoutchouc, de 18 mm d'épaisseur, debout sur ses deux pieds : 121 p.F.
- sur le même opérateur reposant sur un pied, l'autre étant levé au maximum : 94 p.F.
- et ils admettent que l'opérateur isolé dans l'espace, au cours d'un saut par exemple aurait une capacité de 55 p.F.

Retenons comme ordre de grandeur la valeur de 200 p.F.

On a trouvé qu'un homme circulant, chaussé de cuir, sur un sol isolant peut assez rapidement acquérir, par temps sec, une tension de 4 kV.

La formule bien connue des condensateurs nous montre qu'il est alors porteur d'une énergie électrique égale à

$$\frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} 200 \cdot 10^{-12} (4 \cdot 10^3)^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Joule} = 1,6 \text{ mJ}$$

C'est la valeur de l'énergie libérée lors de la décharge qu'on peut tirer de lui, valeur qui est notablement supérieure à l'énergie minimale d'allumage par étincelle d'un grand nombre de mélanges gazeux explosifs.

7.3.3. Electrisation des corps solides.

Deux corps solides mis en contact, puis séparés portent des charges électriques de signes opposés.

La mise en contact peut être rendue plus intime par le frottement, mais ce qu'on appelait autrefois électrisation par frottement n'est que de l'électrisation par contact.

Une surface portant une charge est à un potentiel électrique plus ou moins élevé ; quand un corps électrisé est approché d'un corps à un potentiel assez différent, il se produit un passage brutal de charge électrique de l'un à l'autre, sous forme d'une étincelle jaillissant entre les deux corps, qui constitue une source possible d'amorçage si l'atmosphère est explosive.

Il y a frottement et par conséquent électrisation quand on agite dans un mélangeur deux produits pulvérulents différents, quand on broie un corps solide, quand on recueille sur une courroie transporteuse en mouvement un solide en grains, en cristaux ou en blocs spécialement quand il s'agit d'une matière très facilement électrisable comme le soufre.

Parmi les actions, autres qu'un simple frottement, engendrant des charges électrostatiques entre solides, il faut citer :

- l'arrachement d'un solide collé à un autre solide ;
l'enlèvement d'un ruban adhésif, ou le prélèvement d'une longueur de ruban dans un rouleau a été parfois la cause d'une explosion.
- la séparation d'une pièce moulée de son moule spécialement quand il s'agit de pièces moulées en matière plastique.
- la déformation des élastomères, qu'il s'agisse d'un allongement par traction ou d'une déformation par compression.

On ne dispose d'aucune théorie qui permettrait de prédire la valeur de la charge électrique qui est produite lors de la séparation, après leur contact, de deux corps solides.

Ce qui suit est donc forcément purement qualitatif.

Les matières plastiques, comme le polyéthylène, le celluloid, se chargent très facilement et peuvent donner lieu à des étincelles dangereuses.

Pour se mettre à l'abri des phénomènes gênants ou dangereux d'électrisation, on a imaginé de rendre conducteur (au sens électrostatique) le polyéthylène ou d'autres matières plastiques en lui incorporant dans la masse ou en lui appliquant en surface un produit approprié comme par exemple un sel d'ammonium quaternaire ou un ester de polyéthylène glycol ; ces agents dits "antistatiques" ont pour rôle de faciliter la dissipation des charges qui prendraient naissance.

Parmi les mesures qu'on peut prendre pour se protéger des effets de l'électrisation des corps solides, les principales sont :

- 1°) la mise à la terre systématique des appareils, mesure que l'on peut conseiller dans tous les cas ;
- 2°) le maintien en permanence du degré hygrométrique de l'air au dessus de 70% ;
par exemple en tendant des étoffes mouillées et en arrosant le sol quand le temps est sec ; ceci est une mesure souvent utile, mais pouvant cependant être inefficace avec certaines matières dont la conductibilité superficielle n'est pas affectée par l'humidité de l'atmosphère.

7.3.4. L'électrisation des liquides en mouvement.

Dans certaines conditions, un liquide non conducteur s'écoulant dans une tuyauterie s'électrise, la tuyauterie recevant de l'électricité de signe opposé, et emporte des charges qui s'accumulent dans le récipient dans lequel il est amené ; on connaît de nombreux cas d'explosion, au cours du remplissage de réservoirs par des liquides inflammables explosions amorcées par une étincelle jaillissant dans la phase gazeuse, au dessus du liquide.

Ce type d'accident a été étudié surtout dans l'industrie du pétrole.

Un liquide parfaitement pur, rigoureusement non polaire et ne contenant aucune particule en suspension ne pourrait pas s'électriser en circulant dans une tuyauterie ; mais une quantité minime d'impuretés dissoutes dans le liquide peut lui conférer une légère conductivité, en y libérant des ions positifs et des ions négatifs ; alors des ions d'une certaine polarité (le plus souvent des ions positifs) vont vers la paroi et y sont retenus par absorption les ions opposés restant libres, diffusent dans le liquide et sont entraînés dans le mouvement général de celui-ci ; c'est le processus générateur de charge.

Mais grâce à la conductivité du liquide, il s'établit des déplacements d'ions tendant à annuler les différences de potentiel existant dans le liquide.

La charge électrique emportée par unité de volume est donc sous la dépendance de deux facteurs opposés :

- le taux de production des charges et
- la vitesse de recombinaison des charges de signes opposés.

Si la conductivité du liquide est très faible, il n'y a que très peu d'éléments ionisés et la production de charges électriques est faible ; si cette conductivité est notable la recombinaison des charges opposées l'emporte sur leur production et le champ électrique existant dans le liquide est très faible.

C'est lorsque la conductivité est comprise entre 10^{-11} et 10^{-16} S/cm qu'il peut se produire une électrisation importante.

Les hydrocarbures bien purs ont une conductivité $< 10^{-18}$ S/cm et dans un tel liquide on ne peut déceler aucune électrisation mesurable.

Mais chez les carburants usuels de conductivité entre 10^{-13} et 10^{-15} S/cm il y a électrisation lors de l'écoulement dans une tuyauterie.

Les alcools ont une conductivité de 10^{-8} à 10^{-9} se rapprochant de celle de l'eau (10^{-6} S/cm) ; ces alcools ainsi que beaucoup d'autres liquides organiques (acides, esters, cétones) ne présentent donc pas un risque de danger par électrisation lorsqu'ils s'écoulent dans une canalisation ; il faut se souvenir que la conductivité des liquides organiques est fortement modifiée par les traces d'impureté.

Ce fait est d'ailleurs mis à profit, dans l'industrie du pétrole, où l'on ajoute parfois, aux hydrocarbures ayant une trop grande résistivité, un liquide dit "additif antistatique" qui, à un taux inférieur à un millionième, ramène la résistivité vers 10^8 à 10^9 ohm-cm.

Dans une tuyauterie où s'écoule un liquide isolant tout se passe comme si un courant électrique accompagnait le liquide, et l'on a pu mesurer le courant sur la ligne de mise à la terre d'un réservoir isolé en cours de remplissage ; les expériences ont montré que l'intensité du courant croît avec la vitesse d'écoulement du liquide (souvent à peu près en raison du carré de cette vitesse) et surtout qu'elle est fortement accrue quand l'écoulement est turbulent.

Dans un réservoir métallique, les charges apportées par le liquide rejoignent peu à peu la paroi ; la charge conservée par un élément de volume au bout du temps t , décroît avec le temps selon la loi

τ étant le temps nécessaire pour ramener la charge à $\frac{1}{e}$ = 0,37 de sa valeur initiale ; il est appelé "temps de relaxation"

et ne dépend que des deux propriétés suivantes du liquide :

et - sa constante diélectrique ϵ
 - sa résistivité ρ

$$\tau = 9 \cdot 10^{-12} \epsilon \rho$$

Les liquides pour lesquels le risque est le plus grand lors d'une opération de remplissage d'un réservoir, sont ceux dont la conductivité est de 10^{-15} à 10^{-16} S/cm ; cette valeur n'est pas celle (10^{-14}) à laquelle la production de charge est maximale, mais il lui correspond des temps de relaxation très longs.

Selon les liquides, τ peut aller d'une fraction de seconde à plus d'une heure.

Sans avoir à s'écouler par une tuyauterie, un liquide non conducteur placé dans un récipient et qui par suite des secousses du transport, est agité s'électrise ; il restera longtemps électrisé, s'il est dans un récipient en matière isolante, telle qu'une matière plastique ; en revanche s'il est dans un fût métallique qui est mis à la terre, le liquide perd assez vite sa charge selon le processus de relaxation déjà indiqué.

Pour la même raison, le contenu d'une citerne routière s'électrise pendant le roulage et à cause des pneus qui isolent le véhicule du sol ne perd sa charge que peu à peu.

Il est conseillé d'attendre une ou deux minutes avant de faire le transfert du contenu du récipient ou de la citerne.

Quand un liquide non conducteur traverse un filtre, il s'électrise bien plus que par écoulement dans une tuyauterie simple.

Le passage à travers un lit de matière pulvérulente + comprimé est équivalent à ce point de vue à une filtration.

Les études de LAUER et ANTAL ont montré que c'est dans les premières minutes de la filtration que la charge emportée par le liquide est la plus élevée ; ces auteurs préconisent pour réduire les risques de cette électrisation :

- a) de remplacer un filtre unique dans un circuit par plusieurs filtres plus petits en série séparés par certains intervalles.
- b) de porter une attention spéciale aux premières portions de liquide ayant traverser le filtre.

7.3.5. Electrification de systèmes à deux phases.

1°) Liquide dans un gaz.

Le fait, pour un liquide qui se déverse d'un orifice dans un gaz de se diviser en gouttelettes formant une "pluie" est générateur d'électricité statique ; lors de cette production de gouttelettes, et contrairement à ce qui se passe au cours de l'écoulement dans un tuyau, la recombinaison des charges de signes opposés ne peut se produire que dans une faible mesure, de sorte que les liquides de conductivité moyenne, comme le sont les alcools, les esters, les cétones et de façon générale la plupart des liquides organiques, s'électrifient.

On a expliqué certains cas d'explosion dans des réservoirs d'alcool méthylique et éthylique en faisant observer que l'équipement de ces réservoirs rendait possible en service la formation, au dessus du liquide, de brouillards électrisés.

A la lumière de ces accidents, il est recommandé de ne jamais remplir un réservoir de liquide inflammable en y laissant tomber le liquide de la partie haute (emplissage dit "en pluie") ; il faut faire arriver le liquide jusqu'à la partie inférieure du récipient, du moyen d'un tube plongeur, ou mieux encore aménager un emplissage "en source" par un orifice à la partie basse, orifice pouvant être surmonté d'un déflecteur en forme de tronc de cône.

Quand on détend un gaz liquéfié le jet de gaz produit entraîne toujours des gouttelettes de liquide qui sont fortement agitées et sont électrisées ; si le jet vient frapper une surface mise à la terre il peut jaillir une étincelle sur l'obstacle, ce qui peut allumer un mélange d'air et de vapeur inflammable. Un jet de butane issu d'une bouteille s'enflamme en rencontrant un obstacle.

Quand un jet d'eau vient frapper un obstacle, les éclaboussures qui en résulte sont électrisées ; LENARD montra en 1892 que les grosses gouttes qui retombent vite portent des charges d'un signe, tandis que les gouttelettes très fines, formant un brouillard persistant, portent des charges électriques de signe opposé.

De graves explosions eurent lieu en 1969 sur trois énormes navires pétroliers, au cours de l'opération de lavage des réservoirs, ce lavage est fait, dans des réservoirs dégazés par des jets d'eau sous pression élevée, dirigés contre les parois intérieures.

Des expériences ont montré que le brouillard électrisé peut persister un certain temps après le lavage et on a constaté qu'en introduisant dans le réservoir une tige de sondage, on peut tirer une étincelle assez énergique pour faire exploser un mélange d'air et de vapeur de pétrole.

2°) Solide dans un gaz.

Quand du CO_2 , liquide sous pression dans une bouteille métallique est détendu à l'air libre, il se produit un jet de CO_2 gazeux tenant en suspension des cristaux de neige carbonique ; dès 1922 RUTER avait signalé qu'on peut observer des étincelles électriques à l'extrémité d'un tuyau en caoutchouc d'où s'échappe un courant rapide de CO_2 à l'atmosphère.

Cette électrisation des cristaux de neige carbonique est bien connue maintenant des pompiers qui manient les extincteurs à CO_2 .

Elle fut la cause en 1954 en R.F.A. d'une explosion qui entraîna la mort de 29 personnes quand on déclencha, au dessus de l'ouverture d'un grand réservoir qui avait contenu des hydrocarbures, un dispositif d'extinction au CO_2 provenant de bouteilles de ce gaz sous pression.

Les canalisations d'air comprimé renferment toujours malgré les précautions qu'on prend, des poussières variées, en particulier de la rouille en poudre ; dans un jet d'air comprimé qui s'échappe d'une canalisation, ces poussières s'électrisent et peuvent, en se déchargeant sur un objet mis à la terre, allumer un mélange gazeux explosif ; plusieurs explosions de grisou se sont produites dans les mines de cette manière.

On connaît des cas où, en envoyant pour la première fois dans une conduite neuve du gaz de ville, il y eut explosion ; ces explosions ont été causées par l'électrisation des poussières présentes dans la canalisation et mises en mouvement par le courant gazeux.

3°) Liquide dans un liquide.

Quand deux liquides non miscibles sont agités, ils s'électrisent ; ceci s'observe en particulier avec un hydrocarbure renfermant des gouttes d'eau.

On a pu produire une forte explosion dans un réservoir en y envoyant par pompage rapide un carburant auquel on avait ajouté 5% (en volume) d'eau.

4°) Solide dans un liquide.

Quand un solide en suspension dans un liquide est agité, il peut se produire, pour des valeurs convenables de la résistivité du liquide et des propriétés du solide une électrisation pouvant donner lieu éventuellement à une étincelle dangereuse.

7.3.6. Mesures de sécurité concernant les liquides inflammables.

1°) La mesure de sécurité essentielle est la "mise à la terre" des réservoirs contenant des liquides inflammables et des appareils destinés à en recevoir ; on évitera le plus possible, dans la conception des circuits parcourus par ces liquides, les éléments isolants, puisque ce sont eux qui sont susceptibles de retenir les charges.

Si on doit introduire dans un réservoir garni de liquide une pièce mobile, par exemple un pot pour prélever un échantillon, on n'oubliera pas que c'est une opération qui présente un certain risque, si la pièce en question est une "pige" utilisée en vue de mesurer le niveau du liquide il vaut probablement mieux qu'elle soit en matériau isolant plutôt qu'en ~~qu'~~ métallique.

Enfin il est prudent de ne pas faire une telle opération dans les 2 ou 3 minutes qui suivent le remplissage du réservoir.

Alors qu'il importe qu'une "prise de terre" pour appareil mettant en oeuvre un courant industriel ait une faible résistance électrique, une prise de terre pour l'écoulement de l'électricité statique convient encore très bien quand sa résistance est de 100 ohms le conducteur peut être un fil métallique quelconque pourvu que sa résistance mécanique soit suffisante.

2°) Le remplissage d'un appareil ne doit pas se faire "en pluie" c'est-à-dire en chute libre du haut du réservoir, mais par le fond, soit par un orifice d'entrée à la partie inférieure permettant un remplissage en "source" soit par un tube plongeur allant jusqu'au fond du réservoir et en contact avec le fond, l'extrémité du tube étant taillée en biseau ; il faut toujours éviter la projection de liquide sur les parois.

3°) Quand on verse un liquide d'un récipient dans un autre, on doit maintenir le contact entre le receveur et le récipient verseur et verser lentement .

4°) Il faut limiter la vitesse d'écoulement dans les tuyauteries des liquides isolants inflammables ; une valeur maximale de 1m/s paraît raisonnable.

5°) On peut réduire la charge électrique finalement emportée par le liquide, en installant sur la canalisation et en aval des filtres, une chambre de relaxation dans laquelle le liquide n'a qu'une vitesse très réduite et séjourne pendant un temps égal à la période de relaxation ; pour beaucoup de liquides, ce temps ne dépasse pas une minute.

6°) Quand on doit envoyer un jet d'eau dans un réservoir dont l'atmosphère est explosive, la lame et le réservoir doivent être reliés par un conducteur et mis à la terre ; il faut éviter les jets d'eau trop violent.

7°) Pour déplacer un mélange gazeux explosif - ou simplement suspect d'une canalisation, d'un réservoir ou d'un appareil si l'on emploie du CO_2 il doit être sous la forme exempte de cristaux de neige carbonique ou de poussières.

Pour détruire les cristaux de CO_2 solide qui prennent naissance au cours de la détente du gaz sous pression, on peut, comme le préconisent certains brevets réchauffer le gaz dans une chambre auxiliaire de prédétente.

7.3.7. L'énergie minimale d'inflammation des gaz explosifs.

Une étincelle électrique jaillissant dans un gaz porte celui-ci à une très haute température dans un volume minime qui est celui de l'étincelle ; l'énergie ainsi fournie à ce petit volume de gaz se communique aux portions voisines de gaz et y produit des réactions chimiques.

Si le gaz est explosif la réaction engendrera un petit noyau de flamme qui pourra soit s'étendre soit se propager dans le gaz selon les caractéristiques de celui-ci (composition, température, pression), selon la disposition des électrodes entre lesquelles s'est formé cet embryon de flamme et enfin selon la valeur de l'énergie que l'étincelle aura apportée au gaz.

L'emploi de l'étincelle électrique pour produire, au laboratoire, l'explosion d'un mélange gazeux dans un eudiomètre remonte à Volta.

La nature de l'étincelle est extrêmement complexe.

Selon les caractéristiques du circuit électrique (résistance, capacitance, inductance) elle peut être oscillante ou non et sa durée peut varier dans le rapport de 1 à 1000.

C'est lorsque le circuit a une résistance et une inductance très faible ($< 1 \mu\text{h}$) que l'étincelle est la plus brève sa durée pouvant être $< 1 \mu\text{s}$.

C'est également dans ces conditions que l'énergie de la décharge est communiquée presque intégralement (98 à 100%) au gaz et on la calcule alors facilement par la formule classique de l'énergie d'un condensateur ($1/2 CV^2$).

C'est VIALARD qui eu l'idée qu'il fallait systématiquement opérer avec un condensateur associé à un éclateur et depuis 1943 les expériences de GUEST du Bureau of Mines ont été effectuées avec des circuits non inductifs.

On a reconnu que la plus faible énergie capable d'enflammer un mélange donné est celle qui est mise en jeu avec un éclateur dont les électrodes ont une forme donnée, lors d'une décharge capacitive pure, la capacité étant relativement faible (donc corrélativement avec un potentiel élevé).

Très tôt d'ailleurs s'était dégagée la notion que, pour un gaz donné, il existe une valeur minimale de l'énergie au dessous de laquelle une étincelle ne déclenche pas la propagation d'une flamme.

Cette énergie minimale augmente quand la pression diminue et décroît quand la température s'élève.

Dans le cas des mélanges d'un gaz combustible avec l'air elle varie considérablement avec la composition ayant une valeur énorme pour les mélanges voisins des limites d'inflammabilité et passant par un minimum qui, pour l'hydrogène correspond à peu près au mélange équilibré mais qui est, pour les hydrocarbures autres que le CH_4 , relatif à un mélange plus riche que le mélange équilibré.

CALCOTTE et collaborateurs ont étudié méthodiquement plus de 70 gaz et vapeurs ; le Tableau 17 est relatif aux mélanges les plus inflammables que forment avec l'air les divers gaz ou vapeurs étudiés.

Tableau 17

Energie minimum d'inflammation par étincelles .

Pour chaque gaz combustible, il s'agit du mélange avec l'air le plus inflammable, à la pression et à la température ordinaires.

gaz combustible	pourcentage	énergie minimale d'inflammation (mJ)
H_2	25, 1	0,018
Sulfure de carbone	7,7	0,009
CH_4	8,1	0,290
Ethane	6,6	0,24
Propane	5,0	0,25
Hexane	3,65	0,23
Benzène	4,7	0,21

./..

Les mélanges d'un gaz avec l' O_2 pur ont des énergies minimales d'inflammation 10 fois ou 100 fois plus faibles environ que les mélanges du même gaz avec l'air ;

0,002 mJ suffit pour enflammer les mélanges d'hydrogène et d'oxygène.

Il existe une relation étroite entre l'énergie minimale d'inflammation et la distance de coïncement CALCOTTE en donne la relation empirique suivante :

$$E_{\min} = 0,0235 d^{2,48}.$$

Une étincelle éclatant dans un gaz, outre l'échauffement qui a été mentionné précédemment, a pour effet de lancer dans le gaz une onde de choc ; celle-ci emporte donc une petite fraction de l'énergie de la décharge (1 à 5%) ; les énergies imparties au gaz pour le faire exploser sont donc légèrement inférieures à celle du Tableau ci-dessus, mais en vue des applications à la sécurité, il importe peu de savoir ce qu'il en est exactement, et on peut valablement utiliser cette valeur $\frac{1}{2} CV^2$ pour comparer les mélanges gazeux.

au point de vue de leur inflammabilité.

7.4. Les étincelles électriques de rupture.

Au moment de l'ouverture d'un circuit électrique, d'inductance $\mathcal{L}$ et de capacité négligeable, il y a libération sous forme d'une étincelle appelée étincelle de rupture, d'une énergie égale à

$$\frac{1}{2} \mathcal{L} i^2$$

i étant l'intensité du courant avant l'ouverture.

En effet, en raisonnant en courant continu sur un circuit élémentaire de résistance R , de self $\mathcal{L}$, on peut écrire que la différence de potentiel aux bornes de l'étincelle de rupture est, au temps t ,

$$v = E - \mathcal{L} \frac{di}{dt} - Ri$$

et que l'énergie dissipée par l'étincelle vaut au temps t

$$\int_0^t v \cdot i \cdot dt = \int_0^t (Ei - Ri^2) dt + \int_I^0 (-\mathcal{L} i) di$$

Le premier terme de l'équation représente l'énergie dissipée par l'étincelle après un temps t suffisamment long pour que l'intensité i atteigne 0. Dans ce cas le 2ème terme du second membre de l'équation doit être intégré de I à 0.

En d'autres termes l'énergie dissipée par l'étincelle est égale à l'énergie libérée par la source augmentée de l'énergie magnétique emmagasinée dans la self soit

$$\frac{L I^2}{2}$$

La valeur relative de ces deux termes du second membre de l'équation dépend essentiellement de la self du circuit.

Pour des mélanges CH_4 -air le Gerchar a donné une série de courbes d'intensité minimum d'inflammation reliant l'inductance, et la tension du circuit qui traduisent les résultats obtenus par le Safety in Mines Research Board (fig. 37).

Ces courbes mettent en évidence que l'intensité minimum d'inflammation est maximum pour E et L simultanément petits et qu'en restant en dessous de 20 volts on obtient une gamme acceptable convenant aux appareils miniers de télécommande.

L'énergie magnétique emmagasinée dans la self n'a qu'un rapport indirect avec la force électromotrice (f.e.m.) produisant le courant dans le circuit.

Si le circuit a une inductance suffisante une f.e.m. aussi faible que 4,5 volts qui est celle des piles sèches servant à alimenter les lampes électriques de poche peut produire une étincelle d'énergie non négligeable, donc dangereuse.

A ce sujet, l'appellation de "tension de sécurité" par laquelle on désigne une tension de 12 volts obtenue à partir d'un réseau de distribution de courant alternatif au moyen d'un transformateur abaisseur de tension, risque d'induire en erreur ;

Cette tension n'est "de sécurité" qu'en ce qui concerne le risque d'électrocution, si le corps vient à être traversé par le courant ; elle ne garantit pas que l'emploi de cette tension ne peut pas produire d'étincelle apte à faire exploser en mélange gazeux ; le fait même d'obtenir cette basse f.e.m. au moyen d'un transformateur, qui comprend des spires, rend les étincelles dangereuses.

Dans les circuits électriques industriels habituels, l'énergie de l'étincelle de rupture est le plus souvent d'un ordre de grandeur très supérieur aux énergies d'étincelles électrostatiques minimales d'inflammation qui ont été envisagées ci-dessus et on sait que ces étincelles de rupture, jaillissant dans une atmosphère explosive, ont été la cause de très fréquentes explosions.

Ce qu'on sait moins, c'est que des circuits inductifs peuvent se trouver réalisés dans des appareils de l'industrie chimique sans intervention de conducteur de force ou de lumière.

On en aura une idée par la description de l'accident suivant :

Dans une usine utilisant de l'acide sulfurique on faisait un prélèvement sur le contenu de chaque wagon-citerne apportant une livraison ; pour cela un opérateur faisait descendre, par le trou d'homme, dans l'acide, un flacon suspendu à un fil en acier inoxydable ; à diverses reprises le préposé avait perçu au cours de l'opération des crépitements, auxquels il n'avait pas prêté attention ; un jour au cours d'un prélèvement, il se produisit une explosion dans l'espace gazeux de la citerne, dans laquelle il devait y avoir de l'hydrogène.

Dans cet accident, le volume important du réservoir avait permis à l'inductance du circuit constitué par le corps de la citerne l'acide et le fil en acier inoxydable d'attendre une valeur relativement élevée (N.B. il est facile de prouver l'existence d'un courant d'origine voltaïque entre le réservoir et le fil en acier inoxydable puisqu'il y a 2 métaux différents en contact avec un électrolyte).

Des étincelles de ce genre, qui peuvent se produire avec des solutions basiques ou salines aussi bien qu'avec un acide ne peuvent avoir une énergie dangereuse que lorsqu'elles se produisent sur des appareils de grandes dimensions ; on les évite en n'introduisant dans l'appareil que des instruments (jauges, fils...) constitués avec le même métal que celui dont est fait le réservoir.

7.5. Le matériel électrique de sécurité pour atmosphères explosives.

7.5.1. Classification des matériels pour atmosphères explosives.

Le fonctionnement normal des matériels électriques de toutes sortes,
moteurs
transformateurs
interrupteurs
circuits etc... donne lieu d'une part à des échauffements, car l'effet Joule est inévitable, d'autre part à des étincelles ou à des arcs.

Remplacé par les feuilles

annexes :

" Mode de sécurité du
matériel électrique utilisable

./..

Ces effets sont susceptibles, si des précautions appropriées ne sont pas prises, de produire l'explosion d'un mélange gazeux inflammable ambiant.

Aussi a-t-on cherché à concevoir et construire des matériels électriques tels que leur fonctionnement ne puisse pas être la cause d'une explosion de l'atmosphère ambiante.

Les premiers matériels de ce genre ont été les moteurs antigrisouteux, mis au point dès la fin de la première guerre mondiale pour servir dans les mines de charbon où l'atmosphère est potentiellement explosive à cause du grisou (c'est-à-dire ^{peut} éventuellement être explosive).

Les principes qui sont à la base de leur conception ont été appliqués par la suite à la construction de matériels pouvant être employés dans une atmosphère où l'air renferme des gaz combustibles autres que le méthane ou des vapeurs organiques diverses comme cela peut se présenter dans l'industrie chimique ou les raffineries de pétrole.

Ces matériels sont dits à enveloppe antidéflagrante.

D'autres principes sont aussi mis en oeuvre pour construire des matériels électriques de sécurité et l'on peut classer ces matériels en 6 modes de protection.

1. enveloppe antidéflagrante "d"

C'est un mode de protection dans lequel les pièces qui peuvent enflammer une atmosphère explosive sont enfermées dans une enveloppe qui résiste à la pression développée lors d'une explosion interne d'un mélange explosif et qui empêche la transmission de l'explosion à l'atmosphère explosive environnante de l'enveloppe.

2. Mode de protection par remplissage pulvérulent "q".

C'est un mode de protection dans lequel l'enveloppe du matériel électrique est rempli d'un matériau à l'état pulvérulent de manière telle que, dans les conditions d'emploi prévus à la construction, un arc se produisant à l'intérieur de l'enveloppe ne puisse provoquer l'inflammation de l'atmosphère environnante.

Il ne doit y avoir inflammation ni par propagation de la flamme ni par échauffement excessif des parois de l'enveloppe.

3. Immersion dans l'huile "o".

C'est un mode de protection dans lequel le matériel électrique ou les parties de matériel électrique sont immergées dans l'huile de telle sorte que une atmosphère explosive se trouvant au dessus du niveau de l'huile ou à l'extérieur de l'enveloppe ne puisse s'enflammer.

4. Surpression interne "p".

C'est un mode de protection dans lequel la pénétration d'une atmosphère environnante à l'intérieur de l'enveloppe du matériel électrique est empêchée par le maintien, à l'intérieur de ladite enveloppe, d'un gaz de protection à une pression supérieure à celle de l'atmosphère environnante.

La surpression est maintenue avec ou sans débit continu de gaz de protection.

5. Sécurité intrinsèque "i"

Ce mode de protection conduit à définir plusieurs termes qui sont généralement utilisés : circuit de sécurité intrinsèque.

C'est un circuit dans lequel aucune étincelle ni aucun effet thermique produit dans les conditions d'épreuve prescrites par une norme européenne, (qui couvrent le fonctionnement normal et les conditions spéciales de défaut) n'est capable de provoquer l'inflammation d'une atmosphère explosive donnée.

Matériel électrique.

Un matériel électrique est l'ensemble des composants, circuits ou parties de circuits électriques normalement contenus dans une enveloppe unique.

Matériel électrique à sécurité intrinsèque.

Matériel électrique dans lequel tous les circuits sont de sécurité intrinsèque.

6. Sécurité augmentée "e".

C'est un mode de protection consistant à appliquer des mesures afin d'éviter, avec un coefficient de sécurité élevé, la possibilité de températures excessives et l'apparition d'arc ou d'étincelles à l'intérieur et sur les parties externes du matériel électrique qui n'en produit pas en service normal.

7.5.2. Harmonisation des règles de construction du matériel électrique destiné à fonctionner dans une atmosphère explosible.

Le matériel électrique utilisable en atmosphère explosible constitue pour des raisons évidentes de danger une catégorie à part dans le matériel électrique.

Ce matériel doit généralement être agréé par une autorité compétente avant de pouvoir être mis en vente.

Chaque pays ayant ses règles de construction administrative un matériel électrique agréé dans un Etat membre de la communauté doit subir à nouveau des tests et épreuves, parfois différents, pour pouvoir être admis dans un autre Etat/membre.

Le Traité instituant la Communauté Economique Européenne visant une coopération économique de plus en plus poussée entre ses Etats membres, prévoit entre autre, en son article 100, que le Conseil, sur proposition de la commission, arrête les directives pour le rapprochement des dispositions législatives réglementaires et administratives des Etats Membres qui ont une incidence directe sur l'établissement et le fonctionnement du marché commun.

Une directive concernant le rapprochement des législations relatives au matériel électrique utilisable en atmosphère explosible a été adoptée par le Conseil le 18 décembre 1975 et complétée le 6 février 1979 pour les installations autres que les mines de houille. Pour ces dernières une proposition de directive analogue a été élaborée par "l'Organe permanent pour la sécurité et la salubrité dans les mines de houille" depuis le mois de décembre 1978. Elle est en discussion au niveau de la commission depuis lors et il faut espérer qu'elle sera prochainement adoptée par le Conseil.

Cette directive crée des "normes harmonisées" de construction du matériel électrique concernant la sécurité et une procédure d'agrément unique qui est ou sera reconnue dans tous les pays de la Communauté.

Pour pouvoir circuler librement dans les Etats Membres le matériel électrique doit être soit conforme aux normes harmonisées soit assurer une sécurité au moins équivalente.

Les "normes harmonisées" ont été établies à partir de "Normes européennes" élaborées par le Comité Européen de normalisation électrotechnique (CENELEC).

Le Cenelec, organisme privé, qui groupe, outre "les membres de la communauté", d'autres pays européens, a élaboré 7 normes relatives :