

Rédacteur
Dominique Folliot

40

Table des matières

| | |
|--|-------|
| L'électricité — les effets physiologiques ... <i>Dominique Folliot</i> | 40.2 |
| L'électricité statique <i>Claude Menguy</i> | 40.6 |
| La prévention et les normes <i>Renzo Comini</i> | 40.11 |

● L'ÉLECTRICITÉ — LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES

Dominique Folliot

L'étude des dangers, de la physiopathologie et de la prévention des accidents d'origine électrique nécessite la connaissance de différentes définitions techniques et médicales.

Les définitions des termes d'électrobiologie ci-dessous sont extraites du *Vocabulaire électrotechnique international* — Partie 891: Electrobiologie de la Commission électrotechnique internationale (CEI, 1998).

Un *choc électrique* est l'effet physiopathologique résultant du passage direct ou indirect d'un courant électrique externe dans le corps. Il concerne les contacts directs et indirects, ainsi que les contacts unipolaires et bipolaires.

Par définition, les personnes — en vie ou décédées — ayant subi un choc électrique ont été victimes d'une *électrisation*; le terme *électrocution* doit être réservé aux accidents mortels. Les *coups de foudre* sont des chocs électriques mortels qui sont provoqués par la foudre (Gourbière et coll., 1994).

Des statistiques internationales relatives aux accidents électriques ont été établies par le Bureau international du Travail (BIT), l'Union européenne (UE), l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique (UNIPÉDE), l'Association internationale de la sécurité sociale (AISS) et le Comité consultatif technique 64 de la CEI. L'interprétation de ces statistiques est entravée par des variations au niveau des techniques de collecte des données, des politiques d'assurance et des définitions des accidents mortels variables d'un pays à l'autre. Il est néanmoins possible d'effectuer l'estimation suivante en ce qui concerne le pourcentage d'électrocutions (voir tableau 40.1).

Le nombre des électrocutions est en faible diminution, à la fois en chiffres absolus et, de manière plus frappante encore, en valeur relative par rapport à la consommation totale d'électricité. Environ la moitié des accidents électriques se produit sur le lieu de travail, tandis que l'autre moitié survient à domicile et lors d'activités de loisirs. Selon l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), entre 1968 et 1991, le nombre moyen d'accidents mortels en France était de 151 par an.

Les fondements physiques et physiopathologiques de l'électrisation

Les spécialistes en matière d'électricité distinguent deux catégories de contacts électriques: les contacts directs, impliquant un contact avec des parties actives sous tension, et les contacts indirects, impliquant un contact avec une masse. Chaque catégorie nécessite des mesures préventives fondamentalement différentes.

Médicalement, ce qui est important pour le bilan pronostique et thérapeutique, c'est de connaître le trajet susceptible d'avoir été emprunté par le courant électrique. A titre d'exemple, un contact bipolaire chez un enfant portant à la bouche une prise mobile de prolongateur n'aura pas de conséquence mortelle si l'enfant est par ailleurs bien isolé par rapport à la terre, mais se soldera par des brûlures très graves de tous les tissus buccaux.

Sur le lieu de travail, compte tenu des hautes tensions qui sont fréquentes, un arc risque également de se former entre une partie active à haute tension et des travailleurs qui s'en approchent trop. Des situations professionnelles spécifiques peuvent également affecter les conséquences d'accidents électriques: les travailleurs peuvent par exemple tomber ou réagir de façon inappropriée lorsqu'ils sont surpris par un choc électrique qui, en d'autres circonstances, serait tout à fait inoffensif.

Les accidents électriques peuvent être provoqués par toutes les catégories de tensions rencontrées sur le lieu de travail. Chaque

Tableau 40.1 Estimations des taux d'électrocutions — 1988

| | Electrocutions par million d'habitants | Total |
|-------------------------|--|-------|
| Etats-Unis ¹ | 2,9 | 714 |
| France | 2,0 | 115 |
| Allemagne | 1,6 | 99 |
| Autriche | 0,9 | 11 |
| Japon | 0,9 | 112 |
| Suède | 0,6 | 13 |

¹ Selon l'Association nationale de protection contre les incendies (National Fire Protection Association (NFPA)) (Massachusetts, Etats-Unis), les statistiques relatives aux Etats-Unis sont davantage le reflet d'une collecte de données à très grande échelle et de l'obligation de déclaration des accidents que d'un environnement plus dangereux. Les statistiques américaines incluent les électrocutions dues à une exposition aux systèmes publics de transmission, ainsi que les électrocutions provoquées par des produits de consommation. En 1988, 290 électrocutions ont été provoquées par des produits de consommation (1,2 électrocution par million d'habitants). En 1993, le nombre des électrocutions de toute origine est passé à 550 (2,1 électrocutions par million d'habitants), dont 38% ont été provoquées par des produits de consommation (0,8 électrocution par million d'habitants).

secteur industriel est caractérisé par un ensemble de conditions qui sont susceptibles de provoquer un contact direct ou indirect, unipolaire ou bipolaire, un arc ou une tension induite et, en fin de compte, des accidents. Bien que cet article n'ait pas la prétention de décrire toutes les activités humaines impliquant l'utilisation de l'électricité, il est utile de rappeler au lecteur les principaux types de travail électrique qui ont fait l'objet de directives préventives internationales décrites dans l'article du présent chapitre sur la prévention et les normes:

1. les travaux effectués sous tension (l'application de protocoles extrêmement sévères a réussi à réduire le nombre d'électrisations dans ce type de travaux);
2. les travaux effectués hors tension;
3. les travaux effectués à proximité d'ouvrages sous tension (ces travaux requièrent la plus grande attention étant donné qu'ils sont souvent effectués par du personnel non électricien).

La physiopathologie

Toutes les variables de la loi de Joule applicable aux courants continus

$$W = V \times I \times t = RI^2 t$$

(la chaleur produite par un courant électrique est proportionnelle à la résistance R et au carré de l'intensité I) sont étroitement liées. Dans le cas du courant alternatif, l'effet de la fréquence doit également être pris en considération (Folliot, 1982).

Les organismes vivants sont des conducteurs d'électricité. L'électrisation se produit lorsqu'il y a une différence de potentiel entre deux points dans l'organisme. Il est important de souligner que le danger d'accident électrique ne résulte pas du seul contact avec un fil sous tension, mais plutôt du contact simultané d'un conducteur sous tension et d'un autre élément dont le potentiel est différent lors de l'établissement d'un circuit électrique accidentel.

Les tissus et les organes situés le long du trajet du courant risquent de subir une excitation motrice fonctionnelle, parfois irréversible, ou peuvent être lésés de manière temporaire ou définitive, généralement à la suite de brûlures. La gravité de ces lésions dépend de l'énergie dégagée ou de la quantité d'électricité qui les traverse. Le temps de transit du courant électrique est donc un élément critique pour déterminer la gravité des lésions (à titre d'exemple, les

anguilles et les raies électriques émettent des décharges extrêmement désagréables qui sont susceptibles de provoquer une perte de conscience. Cependant, malgré une tension de 600 V, un courant d'environ 1 A et une résistance du sujet d'environ 600 Ω , ces poissons sont incapables d'induire un choc mortel, car la durée de la décharge est trop brève, de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes. Lorsque la tension est élevée (>1 000 V), la mort est souvent due à l'importance des lésions, tandis que lorsque la tension est basse, les conséquences mortelles dépendent de la quantité d'électricité ($Q = I \times t$) qui parvient au cœur et qui est déterminée par le type, l'emplacement et la surface des points de contact.

Les paragraphes suivants traitent du mécanisme de la mort provoquée par des accidents électriques, des thérapies immédiates les plus efficaces, ainsi que des facteurs déterminant la gravité des lésions — à savoir la résistance, l'intensité, la tension, la fréquence et la forme de l'onde.

Les causes de mortalité due aux accidents électriques dans l'industrie

Dans de rares cas, la mort est provoquée par l'asphyxie ventilatoire. Celle-ci peut résulter d'un tétanos diaphragmatique prolongé ou de l'inhibition des centres respiratoires en cas de contact avec la tête ou de très fortes densités de courant, à la suite d'éclairs de foudre par exemple (Gourbière et coll., 1994). Si des soins peuvent être prodigués très rapidement, c'est-à-dire dans les trois minutes qui suivent une électrisation, la victime pourra être ranimée par un simple bouche-à-bouche.

En revanche, le collapsus cardio-vasculaire périphérique résultant de la fibrillation ventriculaire reste la cause principale de mortalité. Cette complication se produit inévitablement lorsque aucun massage cardiaque n'est pratiqué en même temps qu'une réanimation bouche-à-bouche. Ces interventions, qui devraient être enseignées à tous les électriciens, devraient se poursuivre jusqu'à l'arrivée des services d'urgence, ce qui prend presque toujours plus de trois minutes. Un grand nombre d'électrocardiologistes et d'ingénieurs de par le monde ont étudié les causes de la fibrillation ventriculaire dans le but de mettre au point les meilleures mesures de protection actives ou passives (CEI, 1987, 1994). La désynchronisation aléatoire du myocarde par un courant électrique entretenu nécessite une fréquence, une intensité et un temps de transit bien déterminés. Il faut surtout que le signal électrique parvienne au myocarde pendant ce que l'on appelle la *phase vulnérable du cycle cardiaque*, qui correspond au début de l'onde T de l'électrocardiogramme.

La CEI (1987, 1994) a défini des courbes décrivant l'effet de l'intensité du courant en fonction du temps de transit sur la probabilité (exprimée en pourcentage) de fibrillation pour un trajet du courant main-pied chez un homme de 70 kg en bonne santé. Ces outils sont appropriés pour des courants industriels dont la fréquence se situe dans la plage allant de 15 à 100 Hz. Les fréquences plus élevées font actuellement l'objet d'études. Pour des temps de transit de moins de 10 ms, il convient de raisonner en termes d'énergie en évaluant l'intégralité de la surface située sous la courbe du signal électrique.

Le rôle des différents paramètres électriques

Chaque paramètre électrique (intensité, tension, résistance, temps, fréquence) ainsi que la forme de l'onde sont d'importants déterminants des lésions provoquées, à la fois isolément et en interaction.

Des seuils d'action ont été définis pour l'intensité du courant alternatif ainsi que pour les autres conditions déjà définies ci-dessus. L'intensité du courant pendant l'électrisation est une donnée inconnue, car elle dépend de la résistance des tissus au moment du contact ($I = V/R$), mais elle est généralement perceptible dès 1 mA environ. Des intensités relativement faibles peuvent être à l'origine de contractions musculaires qui risquent d'empêcher le

sujet de lâcher un objet sous tension. Le seuil d'action dépend de la densité du courant, de la surface de contact, de la pression du contact et de variables individuelles. Pratiquement tous les hommes et presque toutes les femmes et les enfants peuvent lâcher prise à des courants pouvant aller jusqu'à 6 mA. A 10 mA, on a constaté que 98,5% des hommes, 60% des femmes et 7,5% des enfants sont capables de lâcher prise. A 20 mA, seuls 7,5% des hommes y parviennent; aucune femme ou enfant n'en est capable. Personne ne peut lâcher prise à 30 mA et davantage.

Des courants d'environ 25 mA peuvent être à l'origine d'un tétanos du diaphragme, le muscle respiratoire le plus puissant. Si le contact est maintenu pendant 3 minutes, un arrêt cardiaque peut également s'ensuivre.

La fibrillation ventriculaire risque de se produire à une intensité d'environ 45 mA; pour les adultes, cette probabilité est de 5% après une période de contact de 5 secondes. En chirurgie cardiaque qui, selon l'avis général, constitue un cas particulier, un courant de 20 à 100 $\times 10^{-6}$ A appliqué directement sur le myocarde suffit pour provoquer une fibrillation. Cette sensibilité myocardique justifie la rigueur des normes relatives aux appareils électromédicaux.

A facteurs constants (V , R , fréquence), les seuils de courant dépendent également de la forme de l'onde, de l'espèce animale, du poids du sujet, de la direction du courant dans le cœur, du rapport temps de transit du courant/cycle cardiaque, de l'instant du cycle cardiaque durant lequel le courant arrive et de facteurs individuels.

Généralement, la tension impliquée dans un accident est connue. En cas de contact direct, la fibrillation ventriculaire et la gravité des brûlures sont directement proportionnelles à la tension, étant donné que:

$$V = RI \text{ et } W = V \times I \times t$$

Les brûlures provoquées par un choc électrique haute tension sont accompagnées de nombreuses complications dont seules quelques-unes sont prévisibles. Les victimes de ces accidents doivent dès lors être soignées dans des centres spécialisés. La thermogenèse se produit d'abord dans les muscles et les paquets vasculo-nerveux. La perte de plasma causée par les lésions tissulaires crée un choc qui est parfois rapide et intense. Pour une superficie donnée, les brûlures électrothermiques provoquées par un courant électrique sont toujours plus graves que les autres types de brûlures. Elles sont en effet à la fois externes et internes et, bien que cela ne soit pas apparent au départ, peuvent entraîner des lésions vasculaires avec de graves effets secondaires, dont des sténoses et thrombi internes qui, en raison de la nécrose qu'ils provoquent, mènent souvent à l'amputation.

La déperdition tissulaire occasionne également une libération de chromoprotéines telles que la myoglobine. Ce phénomène s'observe également chez les victimes de blessures dues à un écrasement mais, chez les victimes de brûlures haute tension, la libération est énorme. Selon certaines études, l'anurie serait due à la précipitation de myoglobine dans les tubules rénaux provoquée par l'acidose, qui est elle-même occasionnée par l'anoxie et l'hyperkaliémie. Cette théorie, qui a été confirmée de manière expérimentale mais n'a pas été acceptée à l'unanimité, justifiait la recommandation de procéder immédiatement à une thérapie par alcalinisation. L'alcalinisation intraveineuse, qui corrige mieux l'hypovolémie et l'acidose induites par la nécrose cellulaire, est actuellement la thérapie préconisée du fait du développement des secours médicalisés d'urgence.

En cas de contacts indirects, la tension de contact (V) et la limite de tension conventionnelle doivent également être prises en compte.

La tension de contact est celle à laquelle une personne est soumise lorsqu'elle touche simultanément deux conducteurs entre

lesquels il existe une différence de potentiel en raison d'une mauvaise isolation. L'intensité du courant qui en résulte dépend de la résistance du corps humain et de celle du circuit externe. Ce courant devrait respecter les seuils de sécurité, autrement dit, il devrait être conforme aux courbes d'intensité en fonction du temps. La tension de contact la plus élevée qui puisse être tolérée indéfiniment sans induire d'effet électropathologique est appelée *limite de tension conventionnelle* ou, pour s'exprimer de manière plus intuitive, *tension de sûreté*.

La valeur réelle de la résistance pendant un accident électrique est inconnue. Les variations au niveau des résistances en série — par exemple, les vêtements et les chaussures — expliquent en grande partie la diversité des effets d'accidents électriques apparemment similaires. Elles ont cependant peu d'influence sur le résultat des accidents impliquant des contacts bipolaires et des électrisations à haute tension. En cas de courant alternatif, l'effet des phénomènes capacitifs et inductifs doit être pris en compte dans les calculs standards basés sur la tension et le courant ($R = V/I$).

La résistance du corps humain s'obtient par l'addition de la résistance de la peau aux deux points de contact et de la résistance interne du corps. La résistance de la peau varie en fonction de facteurs environnementaux et, comme l'a constaté Biegelmeir (CEI, 1987, 1994), elle dépend en partie de la tension de contact. D'autres facteurs tels que la pression, la surface de contact, l'état de la peau au point de contact et des facteurs individuels influencent également la résistance. Il est donc irréaliste d'essayer de baser les mesures préventives sur les estimations de la résistance de la peau. La prévention devrait être fondée sur l'adaptation des équipements et des procédures aux humains, plutôt que l'inverse. Dans un but de simplification, la CEI a défini quatre types d'environnement — sec, humide, mouillé et immergé — et a déterminé des paramètres qui sont utiles pour la mise au point d'actions de prévention adaptées à chaque cas.

Généralement, on connaît la fréquence du signal électrique qui est à l'origine des accidents. En Europe, elle est presque toujours de 50 Hz; aux États-Unis, elle est de 60 Hz. Dans certains cas où des voies ferrées sont impliquées (dans des pays tels que l'Allemagne, l'Autriche ou la Suisse), elle peut être de $16^{2/3}$ Hz, une fréquence qui, théoriquement, comporte un plus grand risque de téτανisation musculaire et de fibrillation ventriculaire. Il faut rappeler que la fibrillation n'a rien à voir avec une téτανisation; celle-ci est causée par une stimulation répétée du muscle qui a une sensibilité maximale à environ 10 Hz. C'est la raison pour laquelle, à une tension donnée, on estime qu'un courant alternatif de fréquence extrêmement basse a des conséquences trois à cinq fois plus graves qu'un courant continu, exception faite des brûlures.

Les seuils décrits précédemment sont directement proportionnels à la fréquence du courant. Ainsi, à 10 kHz, le seuil de détection est dix fois plus élevé. La CEI a entrepris une révision des courbes de danger de fibrillation pour les fréquences supérieures à 1 000 Hz (CEI, 1994).

Au-delà d'une certaine fréquence, les lois physiques qui commandent la pénétration du courant dans le corps changent complètement. Les effets thermiques liés à la quantité d'énergie libérée deviennent prépondérants étant donné que les phénomènes capacitifs et inductifs commencent à prédominer.

Généralement, on connaît la forme de l'onde électrique qui est à l'origine d'un accident. Elle peut fortement influencer le type de lésions résultant d'accidents ayant impliqué un contact avec des condensateurs ou des semi-conducteurs.

L'étude clinique du choc électrique

Conventionnellement, les électrisations ont été classées en accidents à basse tension (50 à 1 000 V) et à haute tension (>1 000 V).

La basse tension est un danger familier, à vrai dire omniprésent; les chocs qu'elle provoque se produisent aussi bien à domicile que lors d'activités de loisirs, dans le milieu agricole comme dans les milieux hospitalier ou industriel.

Lorsqu'on examine l'éventail des chocs électriques basse tension, du choc le plus bénin au choc le plus grave, il faut commencer par ceux qui n'entraînent aucune complication. Dans ce cas, les victimes sont capables de se mettre en sécurité d'elles-mêmes, de rester conscientes et de continuer à ventiler normalement. Les effets cardiaques se limitent à une simple tachycardie sinusale avec ou sans altérations électrocardiographiques mineures. Malgré les conséquences relativement minimes de ce genre d'accidents, l'électrocardiogramme reste une précaution médicale et médico-légale appropriée. Il est conseillé, dans un but de prévention, d'effectuer des études techniques sur ces incidents potentiellement dangereux en complément des examens cliniques (Gilet et Choquet, 1990).

Les victimes de chocs faisant suite à un contact électrique un peu plus fort et de plus longue durée peuvent souffrir de troubles ou de pertes de conscience, mais se rétablissent complètement plus ou moins rapidement; le traitement accélère la guérison. Les examens révèlent généralement des hypertopies neuromusculaires, des problèmes d'hyperventilation et d'encombrement pulmonaire qui sont la plupart du temps dus à une obstruction oropharyngée. Les troubles cardio-vasculaires découlent souvent d'une hypoxie ou d'une anoxie et peuvent prendre la forme d'une tachycardie, d'une hypertension et parfois même d'un infarctus. Les patients atteints de ces troubles doivent être hospitalisés.

Parfois, les victimes perdent connaissance pendant les quelques secondes de contact, sont pâles ou cyanosées, arrêtent de respirer, ont des pulsations à peine perceptibles et souffrent d'une mydriase traduisant une souffrance cérébrale aiguë. Bien que cet état soit habituellement dû à une fibrillation ventriculaire, la pathogénie précise de cette mort apparente ne se révèle pas le point essentiel. Il importe d'entamer rapidement une thérapie bien adaptée, étant donné que l'on sait depuis un certain temps que cet état clinique n'est jamais mortel immédiatement. Le pronostic pour ces cas de choc électrique (pour lesquels une guérison totale est possible) dépend de la rapidité et de la qualité des premiers secours. Statistiquement, ces secours ont plus de chances d'être administrés par du personnel non médical. La formation de tous les électriciens aux interventions de base susceptibles de sauver des vies est donc conseillée.

Pour les cas de mort apparente, le traitement d'urgence doit être prioritaire. Pour les autres cas, il faut se concentrer sur les traumatismes multiples résultant d'un téτανos violent, de chutes ou de la projection de la victime. Une fois le danger de mort immédiate écarté, il faut traiter les traumatismes et les brûlures, y compris ceux qui sont causés par les contacts basse tension.

Les accidents avec des hautes tensions se traduisent par des brûlures importantes et des effets similaires à ceux qui ont été décrits pour les accidents avec des basses tensions. La conversion de l'énergie électrique en chaleur se produit à la fois au niveau interne et externe. Une étude des accidents électriques en France, réalisée par les services médicaux du service public de fourniture d'électricité, EDF-GDF, constate que presque 80% des victimes ont souffert de brûlures. Celles-ci peuvent être répertoriées en quatre catégories:

1. les brûlures par arc, affectant habituellement la peau des parties découvertes et, parfois, des complications dues aux brûlures provoquées par des vêtements en combustion;
2. les brûlures électrothermiques multiples, extensives et profondes, provoquées par des contacts haute tension;
3. les brûlures classiques provoquées par des vêtements en combustion et la projection de matériaux incandescents;

4. les brûlures mixtes provoquées par un arc, un incendie et le passage du courant.

Le suivi et les examens complémentaires sont effectués selon les circonstances, en fonction des données de l'accident. La stratégie suivie pour établir un pronostic ou dans un but médico-légal est bien entendu déterminée par la nature des complications observées ou prévues. Lors d'électrifications par la haute tension (Folliot, 1982) et de coups de foudre (Gourbière et coll., 1994), il est obligatoire de recourir à l'enzymologie et à l'analyse des chromoprotéines et des facteurs de coagulation.

Il est possible que le processus de guérison d'un traumatisme électrique soit compromis par des complications précoces ou tardives et, particulièrement, par celles qui relèvent des systèmes cardio-vasculaire, nerveux et rénal. Ces complications constituent une raison suffisante pour hospitaliser les victimes d'électrifications par la haute tension en milieu spécialisé. Certaines d'entre elles peuvent laisser des séquelles fonctionnelles ou esthétiques.

Si le trajet du courant a fait parvenir une grande quantité de courant jusqu'au cœur, des complications cardio-vasculaires peuvent apparaître. Les troubles fonctionnels sont les plus fréquemment observés et les plus bénins, avec ou sans symptômes cliniques correspondants. Les arythmies — tachycardies sinusales, extrasystoles, flutters et fibrillations auriculaires se manifestant dans cet ordre — sont les altérations électrocardiographiques les plus fréquentes; elles risquent de laisser des séquelles définitives. Les troubles de conduction sont plus rares, et il est difficile de les associer à des accidents électriques si aucun électrocardiogramme n'a été effectué au préalable.

Des troubles plus graves, tels que des insuffisances cardiaques, des lésions valvulaires et des brûlures myocardiques ont également été signalés, mais représentent des cas rares, même chez les victimes d'accidents provoqués par la haute tension. Des cas bien précis d'angine de poitrine et même d'infarctus ont également été rapportés.

Des lésions vasculaires périphériques peuvent être observées pendant les semaines qui suivent l'électrification par la haute tension. Plusieurs mécanismes pathogènes ont été proposés: le spasme artériel, l'action du courant électrique sur les couches média et musculaires des artères et la modification des paramètres de la coagulation.

Une grande variété de complications neurologiques peuvent se manifester. La première à apparaître est l'accident cérébral, que la victime ait perdu connaissance au départ ou non. La physiopathologie de ces complications concerne le traumatisme crânien (dont l'existence devrait être vérifiée), l'effet direct du courant sur la tête ou la modification du flux sanguin cérébral et l'induction d'un œdème cérébral différé. De même, les complications périphériques ou médullaires secondaires peuvent être provoquées par le traumatisme ou l'effet direct du courant électrique.

Les troubles sensoriels affectent l'œil ainsi que le système audio-vestibulaire ou cochléaire. Il est important d'examiner la cornée, le cristallin et le fond de l'œil aussi rapidement que possible et de suivre les victimes d'un arc ou d'un contact direct à la tête, afin de détecter les effets secondaires différés. Des cataractes sont également susceptibles de se développer après une période asymptomatique intermédiaire de plusieurs mois. Les troubles vestibulaires et la perte de l'ouïe sont surtout dus à l'effet de souffle; chez les victimes de la foudre transmise par une ligne téléphonique, ils sont dus aussi à des traumatismes électriques (Gourbière et coll., 1994).

L'amélioration des services mobiles d'urgence a fortement réduit la fréquence des complications rénales et, surtout, de l'oligoanurie chez les victimes d'électrifications par la haute tension. La réhydratation et l'alcalinisation intraveineuse à effectuer très rapidement et soigneusement constituent le meilleur des traite-

ments pour les victimes de graves brûlures. Quelques cas d'albuminurie et d'hématurie microscopique persistante ont été signalés.

Les formes cliniques et les problèmes de diagnostic

Les formes cliniques du choc électrique se sont diversifiées du fait de la variété des applications industrielles de l'électricité ainsi que de l'augmentation de la fréquence et de la variété de ses applications médicales. Pendant longtemps, les accidents électriques ont uniquement été provoqués par la foudre (Gourbière et coll., 1994). La foudre peut transporter une quantité tout à fait remarquable d'électricité et une victime de la foudre sur trois décède. Les effets d'un coup de foudre — brûlures et mort apparente — sont comparables à ceux du courant électrique dans l'industrie et sont dus au choc électrique, à la transformation de l'énergie électrique en chaleur, aux effets de souffle et aux caractéristiques électriques de la foudre.

La foudre touche trois fois plus d'hommes que de femmes. Cette proportion reflète les types de travail effectués qui comportent des risques différents d'exposition à la foudre.

Les brûlures résultant d'un contact de bistouris électriques avec les surfaces métalliques mises à la terre sont les effets les plus fréquents observés chez les victimes d'une électrification iatrogène. Les limites admissibles concernant les courants de fuite des appareils médicaux électriques sont plus ou moins sévères suivant les appareils. Il est impératif de suivre les spécifications fournies par les fabricants ainsi que les recommandations d'utilisation.

Avant de conclure cette partie, il peut être utile de mentionner le cas spécial du choc électrique chez la femme enceinte. Ce choc peut provoquer la mort de la femme, du fœtus ou des deux. Lors d'un accident exceptionnel, un fœtus en vie a pu être mis au monde avec succès par une césarienne, 15 minutes après que la mère fut décédée à la suite d'une électrocution par un choc de 220 V (Folliot, 1982).

Les mécanismes physiopathologiques d'un avortement causé par un choc électrique devraient être étudiés de façon plus détaillée. L'avortement est-il provoqué par des troubles de la conduction dans le tube cardiaque embryonnaire soumis à un gradient de potentiel ou par le décollement du placenta à la suite d'une vasoconstriction?

La survenue d'accidents électriques de ce type, heureusement rare, est une raison de plus de demander la déclaration de tous les incidents d'origine électrique.

Le diagnostic positif et médico-légal

Les circonstances d'un choc électrique sont habituellement suffisamment claires pour que le diagnostic étiologique soit sans équivoque. Ce n'est cependant pas toujours le cas, même en milieu industriel.

Le diagnostic de collapsus circulatoire à la suite d'un choc électrique est extrêmement important, étant donné qu'il conduit immédiatement les témoins à prodiguer les premiers soins après avoir coupé le courant. L'arrêt respiratoire et l'absence de pouls signifient qu'il faut absolument commencer le massage cardiaque et le bouche-à-bouche. Auparavant, on y avait uniquement recours lorsqu'on observait une mydriase (dilatation des pupilles), signe diagnostique d'une lésion cérébrale aiguë. Aujourd'hui, on a plutôt tendance à intervenir dès que le pouls n'est plus perceptible.

Étant donné que quelques secondes peuvent s'écouler avant que les victimes ne perdent connaissance par suite de fibrillation ventriculaire, celles-ci peuvent avoir le temps de s'éloigner de l'équipement qui est à l'origine de l'accident. Cela peut avoir une certaine importance médico-légale (par exemple, lorsqu'une victime est découverte à quelques mètres d'une armoire électrique

ou d'une autre source de tension sans aucune trace de lésion d'origine électrique).

On n'insistera jamais assez sur le fait que l'absence de brûlures électriques ne permet pas d'exclure la possibilité d'une électrocution. Si l'autopsie des victimes découvertes dans un environnement électrique ou à proximité d'un équipement susceptible de générer des tensions dangereuses ne révèle aucune lésion comme les marques de Jellinek et aucune autre cause apparente de mort, il faut envisager la possibilité d'une électrocution.

Si le corps est découvert à l'extérieur, on parvient au diagnostic de foudroiement par élimination. Il faut en rechercher les indices dans un rayon de 50 mètres autour du corps. Le Musée d'électro-pathologie, à Vienne, présente une exposition saisissante de ces indices et, notamment, de la végétation carbonisée et du sable vitrifié. Il est possible que les objets métalliques portés par la victime aient fondu.

Bien que le suicide par l'électricité reste heureusement rare dans l'industrie, la mort consécutive à une négligence demeure malheureusement une réalité. C'est particulièrement le cas des matériels non normalisés et des installations électriques provisoires installées et exploitées dans des conditions difficiles.

Les accidents électriques ne devraient normalement plus jamais se produire, vu la possibilité de recourir aux mesures préventives efficaces décrites dans le dernier article du présent chapitre.

● L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Claude Menguy

Les matériaux se différencient par les charges électriques qui peuvent les parcourir. Les *conducteurs* peuvent être parcourus par un courant, alors que les *isolants* empêchent le passage d'un courant. L'électrostatique traite des phénomènes d'équilibre de l'électricité sur des corps électrisés. Il y a présence d'*électricité statique* lorsque des charges électriques, en équilibre, sont présentes sur des objets. Si ces charges se déplacent, on obtient un courant électrique et l'électricité n'est plus statique. Ce courant est communément appelé électricité et il est étudié dans les autres articles du présent chapitre. On utilise le terme d'*électrisation statique* pour désigner tout processus visant à séparer les charges électriques positives des charges négatives. On mesure la conduction grâce à une propriété appelée *conductance*, alors qu'un isolant est caractérisé par sa *résistivité*. La séparation des charges qui se traduit par l'électrisation peut se produire sous l'effet de processus mécaniques, par exemple, un contact entre des objets et une friction, ou le choc de deux surfaces. Les surfaces peuvent être toutes les deux solides, ou l'une d'entre elles peut être solide et l'autre liquide. Ce processus mécanique peut aussi être causé, mais c'est plus rare, par la rupture ou la séparation de surfaces solides ou liquides. Le présent article concerne les contacts et les frictions.

Les processus d'électrisation

Le phénomène de production d'électricité statique par friction (triboelectrisation) est connu depuis des milliers d'années. Le contact entre deux matériaux suffit pour induire une électrisation. La friction est simplement un type d'interaction qui augmente la surface de contact et dégage de la chaleur — la *friction* est le terme général qui décrit le mouvement de deux objets en contact; la pression exercée, sa vitesse de cisaillement et la chaleur produite constituent les déterminants majeurs de la charge générée par la friction. Parfois, celle-ci cause aussi l'arrachement de particules solides.

Lorsque les deux solides en contact sont des métaux (contact métal-métal), les électrons migrent de l'un vers l'autre. Chaque

métal se caractérise par un potentiel initial différent (potentiel de Fermi) et la nature recherche toujours l'équilibre, c'est-à-dire que les phénomènes naturels tendent à éliminer les différences de potentiel. Cette migration d'électrons se traduit par la production d'un potentiel de contact. Étant donné que les charges d'un métal sont très mobiles (les métaux sont d'excellents conducteurs), elles peuvent même se recombinaison au dernier point de contact avant que les métaux ne soient séparés. Il est, dès lors, impossible d'induire une électrisation en mettant en contact deux métaux et en les séparant ensuite, car les charges vont toujours circuler pour annuler la différence de potentiel.

Lorsqu'un *métal* et un *isolant* entrent en contact en ne provoquant presque aucune friction dans le vide, le niveau énergétique des électrons dans le métal est proche de celui de l'isolant. Ce sont les impuretés surfaciques ou volumiques qui sont à l'origine de ce phénomène et qui empêchent également la formation d'arcs (la décharge d'électricité entre les deux corps chargés — les électrodes) lors de la séparation. La charge transférée vers l'isolant est proportionnelle à l'affinité électronique du métal et chaque isolant possède également une affinité électronique, ou attraction vers les électrons, qui lui est associée. Ainsi, il peut y avoir transfert d'ions positifs ou négatifs de l'isolant vers le métal. La charge surfacique après le contact et la séparation s'exprime par l'équation 1 du tableau 40.2.

Lorsque deux isolants entrent en contact, un transfert de charges se produit en raison de l'état différent de leurs énergies surfaciques (voir l'équation 2 du tableau 40.2). Les charges transférées vers la surface d'un isolant peuvent migrer plus profondément à l'intérieur du matériau. L'humidité et la contamination superficielle peuvent modifier fortement le comportement des charges. L'humidité superficielle accroît, notamment, les densités surfaciques d'états, en augmentant la conduction surfacique, ce qui favorise la recombinaison des charges et facilite la mobilité ionique. La plupart des gens rencontrent ce phénomène dans leur vie quotidienne lorsqu'ils remarquent qu'ils sont davantage soumis à l'électricité statique par temps sec. La teneur aqueuse de certains polymères (matières plastiques) modifie la charge avec le temps. L'augmentation ou la diminution de la teneur aqueuse peut même inverser le sens du flux de charge (sa polarité).

La polarité (positive et négative relatives) de deux isolants en contact dépend de l'affinité électronique de chaque matériau. Les isolants peuvent être classés en fonction de leur affinité électronique et certaines valeurs sont fournies à titre d'exemple dans le tableau 40.3. L'affinité électronique d'un isolant est un facteur important pour les programmes de prévention évoqués plus loin dans le présent article.

Bien que certains aient tenté d'établir un classement triboélectrique dans lequel les matériaux qui acquièrent une charge positive, en entrant en contact avec d'autres, seraient classés avant ceux qui acquièrent une charge négative après un contact, aucun classement universellement reconnu n'a été établi.

Lorsqu'un solide et un liquide entrent en contact (pour former une *interface solide-liquide*), un transfert de charges se produit en raison de la migration des ions présents dans le liquide. Ces ions proviennent de la dissociation des impuretés éventuelles ou sont le résultat de réactions électrochimiques d'oxydoréduction. Dans la mesure où, en pratique, les liquides parfaitement purs n'existent pas, on trouve toujours au moins quelques ions positifs et négatifs dans le liquide qui peuvent se lier à l'interface solide-liquide. Plusieurs types de mécanismes peuvent permettre cette liaison (par exemple, l'adhérence électrostatique aux surfaces métalliques, l'absorption chimique, l'injection par effet électrolytique, la dissociation de groupes polaires et, si la paroi du récipient est isolante, les réactions solide-liquide).

Étant donné que les substances qui se dissolvent (se dissolvent) sont tout d'abord électriquement neutres, elles vont produire un

Tableau 40.2 • Equations de base en électrostatique

Equation 1: Charge par le contact d'un métal et d'un corps isolant

En général, la charge électrique surfacique (σ_s) à la suite d'un contact et d'une séparation peut être exprimée par:

$$\sigma_s = eN_E(\phi_m - \phi_i)$$

où
 e est la charge d'un électron
 N_E la densité d'états permis au niveau de la surface du corps isolant
 ϕ_i l'affinité électronique du corps isolant, et
 ϕ_m l'affinité électronique du métal

Equation 2: Charge à la suite d'un contact entre deux corps isolants

La forme générale de l'équation 1 s'applique au transfert de charges entre deux corps isolants avec des états d'énergie différents (les surfaces doivent être parfaitement propres):

$$\sigma_s = e \frac{N_{E1} \cdot N_{E2}}{N_{E1} - N_{E2}} (\phi_1 - \phi_2)$$

où N_{E1} et N_{E2} sont les densités d'états permis à la surface des deux corps isolants, et ϕ_1 et ϕ_2 sont les affinités électroniques des deux corps isolants.

Equation 3: Charge électrique surfacique maximale

La rigidité diélectrique (E_G) du gaz environnant impose une limite supérieure à la charge qui peut être créée sur une surface isolante plane. Dans l'air, E_G s'élève environ à 3 MV/m. La charge électrique surfacique maximale est donnée par:

$$\sigma_{max} = \epsilon_0 E_G = 2,66 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 = 2 \text{ 660 } \mu\text{C/cm}^2$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide.

Equation 4: Charge maximale d'une particule sphérique

La charge d'une particule sphérique atteint sa valeur maximale, Q_{max} (appelée limite de Pauthenier), lorsque cette particule est chargée par effet couronne:

$$Q_{max} = 4 \pi \epsilon_0 \rho E_G a^2$$

où
 Q_{max} est la charge maximale
 a le rayon de la particule
 ϵ_0 la permittivité du vide
 ϵ_1 la permittivité relative, et

$$\rho = \frac{3\epsilon_1}{\epsilon_1 + 2}$$

nombre équivalent de charges positives et négatives. L'électrisation a lieu uniquement si les charges, qu'elles soient positives ou négatives, se fixent de manière préférentielle à la surface du solide. Dans ce cas, une couche très compacte, connue sous le nom de couche de Helmholtz, se forme. Puisque cette couche est chargée, elle attire les ions de l'autre polarité. Ces ions vont s'agglutiner pour former une couche plus diffuse, appelée couche de Gouy, qui vient se fixer sur la couche de Helmholtz. L'épaisseur de la couche de Gouy s'accroît en fonction de la résistivité du liquide. Les liquides conducteurs forment des couches de Gouy très minces.

Cette double couche va se scinder si le liquide s'écoule: la couche de Helmholtz reste liée à l'interface, alors que la couche de Gouy est entraînée par le liquide en mouvement. Le plan de glissement de ces couches chargées crée une différence de potentiel (le *potentiel zêta*), et le courant induit par les charges mobiles est appelé *courant d'écoulement*. La quantité de charges qui s'accumule dans le liquide

Equation 5: Décharge à partir d'un conducteur

Le potentiel d'un conducteur isolé portant une charge Q est donné par la relation $V = Q/C$. L'énergie accumulée correspond à:

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

Equation 6: Evolution dans le temps du potentiel de la charge d'un conducteur

Si le conducteur est chargé par un courant constant d'intensité (I_G), le potentiel évolue en fonction du temps t selon la loi:

$$V = R_f I_G (1 - e^{-\frac{t}{R_f C}})$$

où R_f représente la résistance de fuite à la terre, et $e = 2,7183$

Equation 7: Potentiel total de la charge d'un conducteur

Pour des temps longs, $t \gg R_f C$, l'équation se ramène à:

$$V = R_f I_G$$

et l'énergie accumulée est donnée par:

Equation 8: Energie accumulée de la charge d'un conducteur

$$W = \frac{1}{2} C R_f^2 I_G^2$$

dépend de la vitesse de migration des ions vers l'interface et de la résistivité du liquide (ρ). Le courant d'écoulement reste néanmoins constant dans le temps.

Ni les liquides fortement isolants, ni les liquides conducteurs ne vont se charger; les premiers, parce qu'ils contiennent très peu d'ions, et les autres parce que les ions se recombinaient rapidement dans les liquides très conducteurs. En pratique, l'électrisation se produit uniquement dans les liquides dont la résistivité est supérieure à $10^7 \Omega\text{m}$ ou inférieure à $10^{11} \Omega\text{m}$, les valeurs maximales observées étant comprises entre $\rho = 10^9$ et $10^{11} \Omega\text{m}$.

Les écoulements de liquides vont induire une accumulation de charges lorsque les surfaces sur lesquelles ils s'écoulent sont isolantes. L'accumulation de la charge électrique surfacique est limitée par: 1) la rapidité avec laquelle les ions se recombinaient à l'interface solide-liquide; 2) la rapidité avec laquelle les ions, dans le liquide, traversent l'isolant; ou 3) le fait qu'un arc se produit en

Tableau 40.3 • Affinités électroniques de certains polymères¹

| Charge | Matériau | Affinité électronique |
|--------|------------------------------------|-----------------------|
| - | PVC Poly(chlorure de vinyle) | 4,85 |
| | Polyamide | 4,36 |
| | Polycarbonate | 4,26 |
| | PTFE (polytétrafluoroéthylène) | 4,26 |
| | PETP (polytéréphtalate d'éthylène) | 4,25 |
| | Polystyrène | 4,22 |
| + | Polyamide | 4,08 |

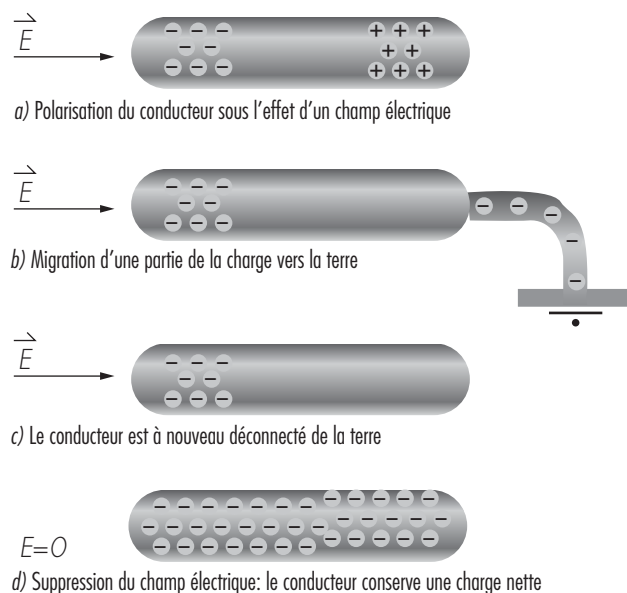
¹ Un matériau acquiert une charge positive lorsqu'il entre en contact avec un matériau situé plus haut que lui dans la liste et une charge négative lorsqu'il entre en contact avec un matériau situé plus bas. L'affinité électronique d'un isolant est toutefois multifactorielle.

surface ou transversalement à la surface isolante et que la charge est donc dissipée. Les écoulements turbulents et les écoulements sur surfaces rugueuses favorisent l'électrisation.

Lorsqu'une haute tension — disons plusieurs kilovolts — est appliquée sur un corps chargé (une électrode), qui possède un faible rayon de courbure (par exemple, un câble), le champ électrique, dans le voisinage immédiat du corps chargé, est élevé mais il décroît rapidement avec la distance. Si une décharge des charges stockées se produit, elle se limitera à la zone dans laquelle le champ électrique est plus intense que la rigidité diélectrique de l'atmosphère environnante; ce phénomène est connu sous le nom d'*effet couronne*, car l'arc émet également de la lumière (certaines personnes ont eu sans doute l'occasion de voir de petites étincelles se former lorsqu'elles ont personnellement fait l'expérience d'un choc dû à l'électricité statique).

La densité de la charge sur une surface isolante peut également être modifiée par les électrons mobiles qui sont générés par un

Figure 40.1 • Mécanisme de chargement d'un conducteur par induction



champ électrique de haute intensité. Ces électrons vont donner naissance à des ions à partir de n'importe quelles molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère et avec lesquelles ils entrent en contact. Lorsque la charge électrique du corps est positive, le corps chargé va repousser tous les ions positifs qui ont été créés. Les électrons produits par des objets chargés négativement vont perdre leur énergie au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de l'électrode et vont se fixer aux molécules gazeuses dans l'atmosphère, formant ainsi des ions négatifs qui vont continuer à s'éloigner des points de charge. Ces ions positifs et négatifs peuvent se fixer sur toutes les surfaces isolantes et vont modifier la charge électrique surfacique. Ce type de charges est beaucoup plus facile à contrôler et est plus uniforme que les charges créées par friction. La quantité de charges qu'il est ainsi possible de créer est limitée. Cette limite est exprimée par l'équation 3 du tableau 40.2.

Pour créer des charges plus importantes, il faut augmenter la rigidité diélectrique de l'environnement soit en créant un vide, soit en métallisant l'autre surface de la couche isolante. Ce dernier procédé permet d'attirer le champ électrique dans l'isolant et, dès lors, de réduire l'intensité de champ du gaz environnant.

Lorsqu'un conducteur dans un champ électrique (E) est relié à la terre (voir figure 40.1), les charges peuvent être produites par induction. Dans ces conditions, le champ électrique induit une polarisation (une séparation entre les centres de gravité des ions négatifs et positifs et le conducteur). Un conducteur temporairement relié à la terre, en un seul point, sera porteur d'une charge nette lorsqu'il sera séparé du sol, en raison de la migration des charges à proximité de ce point. C'est la raison pour laquelle des particules conductrices, situées dans un champ uniforme, oscillent entre les électrodes en se chargeant et se déchargeant à chaque contact.

Les dangers associés à l'électricité statique

Les effets négatifs de l'accumulation d'énergie statique vont de la sensation désagréable que l'on ressent lorsqu'on touche un objet chargé (une poignée de porte, par exemple) aux lésions très graves et même aux accidents mortels qui peuvent être provoqués à la suite d'une explosion induite par l'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 et, surtout, par la densité du courant sur la peau.

Dans le présent article, nous allons décrire certains phénomènes qui provoquent la charge de surfaces et d'objets (électrisation). Lorsque le champ électrique induit est trop fort pour que le milieu environnant soit capable de résister à la charge (c'est-à-dire qu'il dépasse la rigidité diélectrique de l'environnement), il se produit une décharge (dans l'air, la rigidité diélectrique est décrite par la courbe de Paschen et est proportionnelle au produit de la pression et de la distance entre les corps chargés).

Les décharges disruptives peuvent prendre les formes suivantes:

- des étincelles ou des arcs qui shuntent deux corps chargés (deux électrodes métalliques);
- des décharges partielles ou en aigrette qui shuntent une électrode métallique et un ou même deux corps isolants; ces décharges sont appelées partielles, parce que le trajet de la conduction ne court-circuite pas totalement deux électrodes métalliques, mais est habituellement multiple et en aigrette;
- les décharges lumineuses, également connues sous le nom d'effets de pointe, qui apparaissent dans un champ électrique de haute intensité autour de corps ou d'électrodes chargés à faible rayon.

Les conducteurs isolés ont une capacité nette C par rapport à la terre. La relation entre la charge et le potentiel est illustrée par l'équation 5 du tableau 40.2.

Une personne portant des chaussures isolantes est un exemple type de conducteur isolé. Le corps humain est un conducteur électrostatique dont la capacité par rapport à la terre s'élève habituellement à environ 150 pF et dont le potentiel peut aller jusqu'à 30 kV. Puisqu'une personne peut être un conducteur isolé, elle peut subir des décharges électrostatiques qui se manifestent par des sensations plus ou moins douloureuses, parfois ressenties lorsqu'on approche la main d'une poignée de porte ou de tout autre objet métallique. Lorsque le potentiel atteint une valeur d'environ 2 kV, une énergie équivalente à 0,3 mJ sera ressentie; ce seuil varie cependant d'une personne à l'autre. Des décharges plus fortes sont susceptibles de provoquer des mouvements incontrôlables se soldant par une chute. Les travailleurs utilisant des outils peuvent avoir des mouvements réflexes involontaires qui risquent de les blesser ou de toucher d'autres personnes travaillant à proximité. Les équations 6 à 8 du tableau 40.2 décrivent l'évolution du potentiel dans le temps.

Un véritable arc va se produire lorsque l'intensité du champ électrique induit dépasse la rigidité diélectrique de l'air. En raison de leur migration rapide dans les conducteurs, toutes les charges se déplacent vers le point de décharge en libérant par une étincelle toute l'énergie qu'elles avaient accumulée. Ce phénomène peut avoir de graves conséquences lorsqu'il se produit pendant la manipulation de substances inflammables ou explosives ou dans une atmosphère inflammable.

Si l'on approche une électrode reliée à la terre d'une surface isolante chargée, le champ électrique se modifie et une charge est induite dans l'électrode. Lorsque les deux surfaces se rapprochent, l'intensité du champ s'accroît et peut finalement provoquer une décharge partielle provenant de la surface isolante chargée. Etant donné que les charges des surfaces isolantes ne sont pas très mobiles, seule une faible proportion de cette surface participe à la décharge et l'énergie libérée par ce type de décharges est, dès lors, bien moindre que pour les arcs.

Il semble que la charge et l'énergie transférée soient directement proportionnelles au diamètre de l'électrode métallique, qui peut atteindre jusqu'à 20 mm. La polarité initiale de l'isolant influence également la charge, ainsi que l'énergie transférée. Les décharges partielles, à partir de surfaces chargées positivement, sont moins énergétiques que celles qui proviennent de surfaces chargées négativement. Contrairement au cas des surfaces conductrices, il est impossible de quantifier a priori l'énergie transférée par une décharge à partir d'une surface isolante. En fait, comme la surface isolante n'est pas équipotentielle, il s'avère même impossible de définir les capacités qui entrent en jeu.

La décharge de fuite

L'équation 3 du tableau 40.2 permet de constater que la charge électrique surfacique d'une surface isolante dans l'air ne peut pas dépasser 2 660 pC/cm².

Si l'on considère une plaque ou une couche isolante d'une épaisseur a , déposée sur une électrode métallique ou possédant une face métallique, il est facile de démontrer que le champ électrique est attiré dans le corps isolant par la charge induite sur l'électrode, étant donné que les charges sont déposées sur la face non métallique. Par conséquent, le champ électrique dans l'air est très faible et moins important que si l'une des ces faces n'était pas métallique. Dans ce cas, la rigidité diélectrique de l'air ne limite pas l'accumulation de charges sur la surface isolante et il est possible d'atteindre des charges électriques surfaciques très importantes ($>2\ 660\ \text{pC}/\text{cm}^2$). Cette accumulation de charges augmente la conductivité superficielle du corps isolant.

Lorsqu'une électrode s'approche d'une surface isolante, il se produit une décharge de fuite impliquant une grande partie de la surface chargée qui est devenue conductrice. Etant donné l'importance de la surface impliquée, ce type de décharges libère de

grandes quantités d'énergie. Dans le cas de couches isolantes, le champ de l'air est très faible et il suffit que la distance entre l'électrode et la couche dépasse l'épaisseur de la couche pour qu'une décharge se produise. Une décharge de fuite peut également avoir lieu lorsqu'un corps isolant chargé est séparé de sa base métallique. Dans ce cas, le champ de l'air augmente soudainement et toute la surface du corps isolant se décharge pour rétablir l'équilibre.

Les décharges électrostatiques et les dangers d'incendie et d'explosion

En milieu explosif, des réactions d'oxydation exothermiques violentes, entraînant un transfert énergétique dans l'atmosphère, peuvent être déclenchées par:

- des flammes;
- des étincelles électriques;
- des étincelles de radiofréquence à proximité d'une source radio de haute intensité;
- des étincelles produites par des collisions (par exemple, entre du métal et du béton);
- des décharges électrostatiques.

Seul le dernier cas nous intéresse ici. Le point d'éclair (température à laquelle les vapeurs de liquides prennent feu en entrant en contact avec une flamme nue) de différents liquides, ainsi que la température d'auto-allumage de différentes vapeurs, sont indiqués dans le chapitre n° 104, «Aide-mémoire des substances chimiques», de la présente *Encyclopédie*. Le risque d'incendie associé aux décharges électrostatiques peut être évalué en se référant à la limite inférieure d'inflammabilité des gaz, des vapeurs et des aérosols solides ou liquides. Comme l'illustre le tableau 40.4, cette limite peut être très variable.

Un mélange d'air et de gaz ou de vapeur inflammables ne peut exploser que si la concentration de la substance inflammable dans l'atmosphère est située dans une fourchette comprise entre sa limite d'explosibilité supérieure et sa limite inférieure. Dans ce cas, l'énergie minimale d'inflammation (EMI), c'est-à-dire l'énergie qu'une décharge électrostatique doit posséder pour enflammer le mélange, dépend fortement de la concentration. Il a été démontré que cette énergie dépend aussi de la vitesse de libération de l'énergie et, par extension, de la durée de cette libération. Elle dépend également du rayon de l'électrode:

- les électrodes de petit diamètre (de l'ordre de quelques millimètres) donnent naissance à des décharges lumineuses plutôt qu'à des étincelles;
- pour les électrodes de plus grand diamètre (de l'ordre de quelques centimètres), leur masse sert à refroidir les étincelles.

En général, on obtient les EMI les plus faibles avec des électrodes dont le diamètre est assez important pour prévenir les décharges lumineuses.

L'EMI dépend également de la distance entre les électrodes; elle est la plus faible à la distance de pincement, distance à laquelle

Tableau 40.4 • Quelques limites inférieures d'inflammabilité

| Décharge | Limite |
|---|----------------------|
| Quelques poudres | Plusieurs joules (J) |
| Aérosols de soufre et d'aluminium à particules très fines | Quelques mJ |
| Vapeurs d'hydrocarbures et autres liquides organiques | 200 μJ |
| Hydrogène et acétylène | 20 μJ |
| Explosifs | 1 μJ |

l'énergie produite dans la zone de réaction est supérieure aux pertes thermiques au niveau des électrodes. On a démontré, de manière expérimentale, que toute substance inflammable possède une distance de sécurité maximale qui correspond à la distance minimale entre électrodes à laquelle une explosion peut se produire. Pour les hydrocarbures, elle est inférieure à 1 mm.

La probabilité d'explosions pulvérielles dépend de la concentration; elle est très élevée lorsque la concentration est de l'ordre de 200 à 500 g/m³. L'EMI dépend également de la taille des particules, les poudres fines explosant plus facilement. Pour les gaz et les aérosols, l'EMI décroît avec la température.

Quelques exemples industriels

De nombreuses opérations de routine, effectuées lors du traitement et du transport de produits chimiques, créent des charges électrostatiques. On peut notamment citer:

- le déversement de poudres à partir de sacs;
- la filtration;
- le transport en conduites;
- l'agitation de liquides, particulièrement en présence de phases multiples, de solides en suspension ou de gouttes de liquides non miscibles;
- la pulvérisation ou l'atomisation d'un liquide.

La création de charges électrostatiques peut entraîner des problèmes mécaniques, des risques de décharges électrostatiques pour les opérateurs et, même, en cas d'utilisation de produits contenant des solvants ou des vapeurs inflammables, des risques d'explosion (voir tableau 40.5).

Les hydrocarbures liquides, tels que le pétrole, le kérosène et de nombreux solvants usuels, ont deux caractéristiques qui les rendent particulièrement sensibles à l'électricité statique:

- une grande résistivité, qui leur permet d'accumuler une quantité importante de charges;
- des vapeurs inflammables, qui augmentent le risque de voir des décharges de faible énergie déclencher des incendies et des explosions.

Il peut y avoir création de charges électrostatiques pendant le transport (par exemple, dans les conduites, les pompes ou les vannes). Le passage par des filtres fins tels que ceux qui sont utilisés pour le remplissage des réservoirs d'avions est susceptible de produire des densités de charges de plusieurs centaines de microcoulombs par m³. La sédimentation des particules et la production de brouillards ou de mousses chargés, lors du remplissage à grand débit de réservoirs, risquent également de créer des charges.

Entre 1953 et 1971, l'électricité statique a été à l'origine de 35 incendies et explosions pendant ou après le remplissage de

réservoir de kérosène, et un nombre plus important d'accidents s'est même produit pendant le remplissage de réservoirs de camions. La présence de filtres ou des phénomènes de refoulement pendant le remplissage (dus à la production de mousse ou de brouillards) constituent les facteurs de risque les plus fréquemment identifiés. Des accidents se sont également produits à bord de pétroliers, surtout pendant le nettoyage des cuves.

Les principes de prévention de l'électricité statique

Tous les problèmes liés à l'électricité statique dérivent de:

- la production de charges électriques;
- l'accumulation de ces charges sur des corps isolants ou des conducteurs isolés;
- le champ électrique produit par ces charges, qui génère à son tour une force ou une décharge disruptive.

La meilleure stratégie de départ visant à éviter l'accumulation de charges électrostatiques consiste à éviter de produire de telles charges. Si c'est impossible, il faut essayer de relier les charges à la terre. Enfin, si des charges sont inévitables, les objets sensibles devraient être protégés de leurs effets.

La suppression ou la réduction de la création de charges électrostatiques

Il s'agit de la première approche de prévention électrostatique à adopter, car c'est la seule mesure préventive qui élimine le problème à la source. Cependant, comme nous l'avons expliqué plus haut, des charges sont générées chaque fois que deux matériaux, dont un au moins est isolant, entrent en contact et sont ensuite séparés. En pratique, des charges peuvent même être produites lors du contact ou de la séparation d'un matériau avec lui-même. En fait, la production de charges implique les couches superficielles des matériaux. Etant donné que la moindre différence au niveau de l'humidité ou de la contamination superficielles se traduit par la production de charges statiques, il est impossible d'éviter totalement leur formation.

Pour réduire la quantité de charges générées par des surfaces entrant en contact, il faut:

- éviter de mettre en contact des matériaux qui ont des affinités électroniques très différentes (c'est-à-dire s'ils sont très éloignés l'un de l'autre dans les listes triboélectriques). Par exemple, il faut éviter tout contact entre le verre et le Teflon (PTFE), ou entre le PVC et le polyamide (Nylon) (voir tableau 40.3);
- réduire le débit entre les matériaux, ce qui diminue la vitesse de cisaillement entre des matériaux solides. On peut, par exemple, réduire la vitesse d'extrusion de films plastiques ou la vitesse de déplacement de matériaux broyés sur un convoyeur, ou encore le débit de liquides dans une conduite.

Aucune limite de sécurité définitive n'a été fixée pour les débits. La norme britannique BS 5958-Partie 2, *Directives pratiques pour le contrôle de l'électricité statique (Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity)* recommande que le produit de la vitesse (en mètres par seconde) et du diamètre de la conduite (en mètres) soit inférieur à 0,38 pour les liquides dont la conductivité est inférieure à 5 pS/m (picosiemens par mètre) et à 0,5 pour les liquides dont la conductivité est supérieure à 5 pS/m. Ce critère n'est applicable qu'aux écoulements liquides monophasiques dont la vitesse ne dépasse pas 7 m/s.

Il faut souligner qu'une diminution du débit ou de la vitesse de cisaillement réduit non seulement la création de charges, mais contribue également à dissiper toutes les charges qui auraient été produites. En effet, lorsqu'on réduit un débit, les durées de séjour sont plus importantes que dans le cas de zones de relaxation où l'on diminue les débits en augmentant le diamètre des conduites. Cette méthode, à son tour, permet d'améliorer la mise à la terre.

Tableau 40.5 • Charges spécifiques associées à certaines opérations industrielles

| Opération | Charge spécifique (q/m) (C/kg) |
|--|--------------------------------------|
| Criblage | 10 ⁻⁸ – 10 ⁻¹¹ |
| Remplissage ou vidange de silos | 10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹ |
| Transport par convoyeur à vis sans fin | 10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸ |
| Broyage | 10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁷ |
| Micronisation | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁷ |
| Transport pneumatique | 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶ |

La mise à la terre de l'électricité statique

La règle de base en matière de prévention des charges électrostatiques consiste à éliminer les différences de potentiel entre les objets. Pour ce faire, on peut soit les raccorder, soit les mettre à la terre. Les conducteurs isolés peuvent cependant accumuler des charges et peuvent donc se charger par induction, caractéristique qui leur est propre. Les décharges provenant des conducteurs peuvent prendre la forme d'étincelles à haute tension (qui sont dangereuses).

Cette règle est conforme aux recommandations concernant la prévention des chocs électriques qui exigent également que toutes les parties métalliques d'un équipement électrique soient reliées à la terre, comme le demande la norme française: *Installations électriques à basse tension — Règles — Additif à la norme française homologuée NFC 15-100, juillet 1977*. Pour obtenir une sécurité électrostatique maximale, problème qui nous préoccupe ici, cette règle doit être généralisée à tous les éléments conducteurs, y compris les châssis métalliques des tables, les poignées de porte, les composants électroniques, les réservoirs utilisés dans l'industrie chimique et les châssis des véhicules servant au transport d'hydrocarbures.

Pour obtenir une sécurité électrostatique idéale, chaque élément devrait être conducteur et constamment relié à la terre; de ce fait, toutes les charges seraient transférées vers la terre. Dans ce cas, tous les éléments seraient toujours équipotentiels et le champ électrique (ainsi que le risque de décharge) serait, dès lors, nul. Il est toutefois presque impossible d'atteindre cet idéal pour les motifs suivants:

- tous les produits qui doivent être traités ne sont pas conducteurs et, souvent, on ne peut utiliser d'additifs pour les rendre conducteurs. Les produits agricoles et pharmaceutiques, ainsi que les liquides d'une grande pureté, entrent dans cette catégorie;
- les propriétés des produits finis, telles que la transparence optique ou la faible conductivité thermique, peuvent exclure l'utilisation de matériaux conducteurs;
- il est impossible de relier des équipements mobiles à la terre de façon permanente. C'est le cas, par exemple, des chariots métalliques, des outils électroniques sans fil, des véhicules et, même, des opérateurs humains.

La protection contre les décharges électrostatiques

Il faut garder à l'esprit que le présent article concerne uniquement la protection des équipements sensibles à l'électricité statique pour lesquels des décharges sont inévitables, ainsi que la réduction et l'élimination des charges électrostatiques. Si l'on peut mettre en œuvre des moyens pour protéger les équipements, il reste, néanmoins, une obligation fondamentale: éviter l'accumulation de charges électrostatiques.

Comme illustré dans la figure 40.2, tous les problèmes électrostatiques font intervenir une source de décharge électrostatique (l'objet chargé au départ), une cible qui reçoit la décharge, et l'environnement traversé par la décharge (la décharge diélectrique). Il faut souligner que la cible ou l'environnement peuvent être sensibles à

Figure 40.2 • Schéma du phénomène de décharge

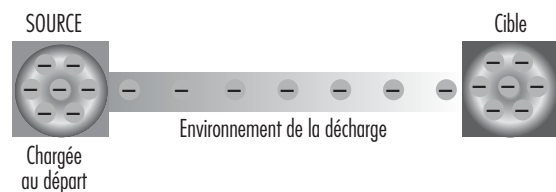


Tableau 40.6 • Exemples d'équipements sensibles aux décharges électrostatiques

| Élément sensible | Exemples |
|------------------|---|
| Source | Un opérateur qui touche une poignée de porte ou un châssis de voiture Un composant électronique chargé qui entre en contact avec un objet relié à la masse |
| Cible | Des composants ou matériaux électroniques entrant en contact avec un opérateur chargé |
| Environnement | Un mélange explosif mis à feu par une décharge électrostatique |

l'électricité statique. Le tableau 40.6 énumère quelques exemples d'éléments sensibles.

La protection du personnel

Le personnel qui pense avoir accumulé de l'électricité statique (par exemple, en descendant d'un véhicule par temps sec ou en marchant avec un certain type de chaussures) peut prendre certaines mesures de protection pour, par exemple:

- réduire la densité du courant au niveau de la peau, en touchant un conducteur relié à la terre avec un objet métallique (clé, outil, etc.);
- réduire la valeur de crête du courant en le déchargeant sur un objet dissipatif, s'il en existe un à proximité (le dessus d'une table ou un équipement spécial comme un bracelet de protection avec une résistance en série).

La protection en milieu explosif

En milieu explosif, c'est l'environnement lui-même qui est sensible aux décharges électrostatiques, qui peuvent provoquer un incendie ou une explosion. Dans ce cas, la protection consiste à remplacer l'air par un mélange gazeux dont la teneur en oxygène est plus faible que la limite d'explosibilité inférieure ou par un gaz inerte, tel que l'azote. Ce type de gaz a été utilisé dans des silos et des chambres de réaction dans l'industrie chimique et pharmaceutique. Dans ce cas, il faut prendre les précautions nécessaires pour que le personnel dispose d'une quantité d'air suffisante.

LA PRÉVENTION ET LES NORMES

Renzo Comini

Les dangers et les mesures préventives dans les installations électriques

Les nombreux éléments constituant les installations électriques présentent des degrés divers de robustesse. Sans tenir compte de leur fragilité inhérente, ils doivent cependant tous pouvoir fonctionner de manière fiable, même dans des conditions difficiles. Malheureusement, même dans les meilleures conditions, l'équipement électrique est susceptible de connaître des pannes qui risquent de blesser le personnel ou de provoquer des dégâts matériels.

Pour exploiter des installations électriques en toute sécurité, il faut, à la base, bien les concevoir et non pas seulement avoir recours à une amélioration ultérieure des systèmes de sécurité. D'où le corollaire suivant: le courant se déplace à la vitesse de la lumière, tandis que tous les systèmes électromécaniques et électro-

niques ont des temps de latence dus essentiellement à l'inertie thermique, à l'inertie mécanique et aux conditions de maintenance. Ces temps de latence, quelle que soit leur origine, sont suffisamment longs pour que leurs conséquences puissent entraîner des blessures pour le personnel et endommager les équipements (Lee, Capelli-Schellpfeffer et Kelley, 1994; Lee, Cravalho et Burke 1992; Kane et Sternheim, 1980).

Il est essentiel que les équipements soient installés et entretenus par du personnel qualifié. Les mesures techniques sont, il faut le souligner, nécessaires à la fois pour assurer le fonctionnement en toute sécurité des installations et pour protéger les humains et les équipements.

L'introduction aux dangers électriques

Pour fonctionner correctement, les machines, les équipements, les circuits et les lignes électriques doivent être protégés des dangers d'origine interne (par exemple, provenant de l'installation elle-même) et externe (Andreoni et Castagna, 1983). Parmi les dangers internes, on trouve:

- les surtensions;
- les courts-circuits;
- la modification de la forme d'onde du courant;
- l'induction;
- les interférences;
- les courants de surcharge;
- la corrosion, qui peut causer des fuites de courant électrique vers la terre;
- la surchauffe des matériaux de conduction et d'isolation qui peut être à l'origine de brûlures chez les opérateurs, d'émissions de gaz toxiques, d'incendies des composants et d'explosions en milieu inflammable;
- les fuites de fluides isolants tels que l'huile;
- la production d'hydrogène ou d'autres gaz susceptibles de former des mélanges explosifs.

Pour chaque type de danger, il existe des mesures de protection spécifiques dont certaines sont imposées par la loi ou par des règlements techniques internes. Les constructeurs doivent prendre des mesures techniques spécifiques pour réduire ces risques.

Les dangers externes sont les suivants:

- les facteurs mécaniques (chutes, chocs, vibrations);
- les facteurs physiques et chimiques (rayonnements naturels ou artificiels, températures excessives, produits pétroliers, liquides corrosifs, humidité);
- le vent, le givre, la foudre;
- la végétation (arbres et racines, secs ou humides);
- les animaux (en milieu urbain ou rural), car ils peuvent endommager l'isolation des lignes électriques et provoquer des courts-circuits ou des faux contacts;
- et, facteur non moins important,
- les adultes et enfants insoucians, imprudents ou ignorants des risques et des procédures d'exploitation.

Il existe d'autres dangers externes comme les interférences électromagnétiques provenant de sources telles que les lignes à haute tension, les émetteurs radio, les postes de soudure (susceptibles de provoquer des surtensions transitoires) et les solénoïdes.

Le plus souvent, les problèmes sont dus à la défaillance ou à la non-conformité:

- des appareils de protection mécanique, thermique ou chimique;
- des systèmes de ventilation, ainsi que des systèmes de refroidissement des machines, des appareils, des lignes ou des circuits;
- des isolants utilisés;
- des fusibles et des disjoncteurs automatiques.

Des fusibles ou des disjoncteurs automatiques protègent des défaillances «phase-neutre» mais, pour assurer une protection contre les défaillances «phase-terre», des disjoncteurs automatiques à courant résiduel sont nécessaires:

- utilisation de relais de tension et de parafoudres afin de protéger les systèmes de protection;
- utilisation de capteurs et de composants mécaniques ou électriques dans les systèmes de protection de l'installation;
- séparation des circuits se trouvant à des tensions différentes (des espaces suffisants doivent être maintenus entre les conducteurs; les connexions doivent être isolées; les transformateurs doivent être équipés de blindages reliés à la terre et d'une protection adéquate contre les surtensions; ils doivent également avoir des bobinages primaires et secondaires totalement séparés);
- utilisation de codes de couleur ou d'autres mesures adéquates pour éviter de confondre les câbles;
- ne pas confondre phase active et conducteur de protection, sous peine de provoquer une mise sous tension des parties conductrices de l'installation;
- utilisation d'équipements de protection contre les interférences électromagnétiques.

Ces mesures sont particulièrement importantes pour l'instrumentation et les lignes utilisées pour la transmission de données ou l'échange de signaux de protection et de contrôle. Des espaces suffisants doivent être maintenus entre les lignes ou les filtres et les blindages employés. Des câbles en fibre optique sont parfois utilisés dans les situations les plus critiques.

Le risque associé aux installations électriques s'accroît lorsque les équipements sont soumis à des conditions de fonctionnement difficiles, surtout dans le cas d'un environnement humide ou mouillé qui représente un danger électrique important.

Les fines couches liquides et conductrices qui se forment sur les surfaces métalliques et isolantes dans un environnement humide ou mouillé génèrent de nouveaux trajets irréguliers et dangereux du courant. L'infiltration d'eau réduit l'efficacité de l'isolation et risque de provoquer des dispersions d'électricité et des courts-circuits. Cela endommage non seulement les installations électriques, mais accroît aussi fortement les risques pour les humains. C'est pourquoi il est utile de concevoir des normes spécifiques aux travaux effectués dans des conditions difficiles, notamment sur les chantiers de construction en plein air, les installations agricoles, dans les salles de bain, les mines et les caves, ainsi que sur certains sites industriels.

Des équipements de protection contre la pluie, les éclaboussures latérales ou les immersions complètes sont disponibles. Idéalement, ces équipements devraient être protégés, isolés et garantis anticorrosion. Les boîtiers métalliques doivent être mis à la terre. Le mécanisme des défaillances en milieu mouillé est identique à celui en milieu humide, mais les conséquences peuvent être plus graves.

Les dangers électriques en milieu poussiéreux

Les fines poussières qui pénètrent dans les machines et les équipements électriques provoquent une abrasion, surtout au niveau des éléments mobiles. Les poussières conductrices risquent également de causer des courts-circuits, tandis que les poussières isolantes sont susceptibles d'interrompre le passage du courant et d'accroître la résistance de contact. L'accumulation de poussières plus ou moins fines sur les boîtiers des équipements constitue des réservoirs potentiels d'humidité et d'eau. La poussière sèche est un isolant thermique; elle réduit la dispersion de chaleur et augmente la température locale. Ce processus risque d'endommager les circuits électriques et de provoquer des incendies ou des explosions.

Des matériels étanches et antidéflagrants doivent être installés sur les sites industriels ou agricoles lorsque les travaux effectués génèrent beaucoup de poussières.

Les dangers électriques en milieu explosif ou sur des sites renfermant des matériaux explosifs

Les explosions, notamment celles qui se produisent dans des atmosphères renfermant des poussières et des gaz explosifs, peuvent être provoquées par l'ouverture et la fermeture de circuits électriques sous tension ou par tout autre procédé transitoire susceptible de causer des étincelles suffisamment puissantes.

Ce danger existe dans des sites tels que:

- les mines et les chantiers souterrains où des gaz, particulièrement le méthane, sont susceptibles de s'accumuler;
- les industries chimiques;
- les espaces de stockage de batteries au plomb où l'hydrogène risque de s'accumuler;
- l'industrie alimentaire, où des poudres organiques naturelles peuvent être générées;
- l'industrie des matériaux synthétiques;
- la métallurgie, surtout lorsqu'elle traite l'aluminium ou le magnésium.

Lorsqu'un danger d'explosion existe, le nombre de circuits et d'équipements électriques devrait être réduit au minimum, en éliminant par exemple les moteurs et les transformateurs électriques ou en les remplaçant par des équipements pneumatiques. Les matériels électriques qui ne peuvent pas être supprimés doivent être conçus spécialement pour pouvoir être utilisés dans les zones à risque d'explosion; suivant leur type de conception, on trouve les matériels antidéflagrants, les matériels à sécurité augmentée, les matériels à sécurité intrinsèque, les matériels à immersion dans l'huile, les matériels à surpression interne des enveloppes, les matériels à remplissage pulvérulent et les matériels à encapsulage.

Étant donné le coût des matériels utilisables dans les zones à risque d'explosion, les usines sont souvent divisées en zones électriques de danger. De cette manière, des matériels spécifiques sont mis en œuvre dans les zones à haut risque, tandis que des matériels ordinaires sont installés dans les autres.

La liaison équipotentielle

Si tous les conducteurs, y compris la terre, qui peuvent être touchés simultanément avaient le même potentiel, les humains ne courraient aucun danger. Les systèmes de liaison équipotentielle visent à atteindre cette situation idéale (Andreoni et Castagna 1983; Lee, Cravalho et Burke, 1992).

La liaison équipotentielle permet de relier par un conducteur de protection toutes les masses apparentes des équipements électriques; elle est elle-même reliée à la prise de terre. Il faut rappeler que les masses sont hors tension lors d'un fonctionnement normal, mais risquent d'être mises sous tension à la suite d'un défaut d'isolation. En réduisant la tension de contact, la liaison équipotentielle évite que les masses n'atteignent des tensions dangereuses à la fois pour les humains et les équipements.

En pratique, il peut s'avérer nécessaire de relier la même machine au réseau de liaison équipotentielle en plus d'un point. Les zones de mauvais contacts résultant, par exemple, de la présence d'isolants tels que des lubrifiants ou de la peinture doivent être soigneusement identifiées. De même, il est utile de connecter toutes les conduites utilitaires locales et externes (par exemple, eau, gaz et chauffage) au réseau de liaison équipotentielle des masses.

La mise à la terre

Pour éviter des accidents, il est nécessaire de réduire la différence de potentiel entre les masses de l'installation et la terre. Pour ce faire, il faut relier les masses à un conducteur de protection relié à la terre.

Il existe deux types de connexions à la terre:

- les connexions fonctionnelles, telles que la mise à la terre du conducteur neutre d'un système triphasé ou du point milieu du secondaire d'un transformateur;
- les connexions de protection, telles que la mise à la terre de toutes les masses d'une partie de l'équipement. Ce type de connexion vise à réduire les tensions des masses en créant un parcours préférentiel pour les courants de défaut.

Dans des conditions de fonctionnement normales, aucun courant ne passe par les connexions à la terre. Dans le cas d'une mise sous tension accidentelle des masses, le courant qui traverse la connexion à la terre à faible résistance est suffisamment important pour provoquer le déclenchement des dispositifs de protection (dispositifs différentiels ou, suivant les cas, fusibles ou disjoncteurs).

La tension de défaut maximale des réseaux équipotentiels permise par la plupart des normes est de 50 V en milieu sec, 25 V en milieu mouillé ou humide et 12 V pour les locaux ou emplacements dans lesquels une personne peut être immergée. Bien que ces valeurs soient purement indicatives, il faut souligner la nécessité d'assurer une mise à la terre suffisante sur les lieux de travail, dans les espaces publics et, surtout, dans les locaux d'habitation.

L'efficacité de la mise à la terre dépend du bon serrage des connexions, d'une section suffisante des conducteurs de liaison et d'une valeur suffisamment basse de la résistance de la prise de terre.

Les connexions des masses doivent être aussi fiables que les réseaux équipotentiels, et leur bon état doit être vérifié à intervalles réguliers.

La prise de terre doit être surveillée et mesurée à intervalles périodiques (tous les ans en général) pour s'assurer de son bon état. Les matériels à double isolation ne doivent pas être reliés à la terre; ils minimisent les risques de défaut d'isolation en prévoyant deux systèmes distincts d'isolation. Ils sont marqués d'un double carré.

Les disjoncteurs

La méthode la plus sûre pour réduire les dangers électriques pour les humains et les équipements consiste à réduire au minimum la durée de passage du courant de défaut et de la surtension; l'idéal serait d'agir avant même que l'énergie électrique n'ait commencé à augmenter. En général, les systèmes de protection des équipements électriques comprennent trois relais: un relais à courant résiduel pour agir contre les défaillances vers la terre, un relais magnétique et un relais thermique pour protéger des surcharges et des courts-circuits.

Dans les disjoncteurs (ou interrupteurs) à courant différentiel résiduel, les conducteurs du circuit sont bobinés autour d'un noyau magnétique qui détecte la somme vectorielle des courants entrant et sortant de l'équipement à protéger. Cette somme est égale à zéro en fonctionnement normal, mais égale au courant de défaut en cas de défaillance. Lorsque les courants de fuite atteignent le seuil de sensibilité du disjoncteur résiduel, ce dernier se déclenche. Les disjoncteurs de courant résiduel peuvent être déclenchés par des courants d'une intensité aussi faible que 6 mA, après un temps de latence de seulement 20 à 30 ms.

La quantité maximale de courant qui peut être transportée sans danger par un câble conducteur dépend de sa section, de son isolation et de son installation. Un échauffement dangereux se produit si la charge maximale est dépassée ou si la dissipation de chaleur est entraînée ou limitée. Les dispositifs de protection contre les surintensités, tels que les fusibles et les disjoncteurs magnétothermiques, coupent automatiquement le circuit en cas d'intensité excessive. Ils doivent interrompre le courant dès que ce dernier dépasse la capacité du conducteur.

La sélection des dispositifs de protection pour protéger le personnel et les équipements est l'une des tâches les plus importantes dans la gestion des installations électriques. Elle doit non seulement tenir compte du courant admissible par les conducteurs, mais également des caractéristiques des circuits et des équipements connectés.

Les fusibles

Plusieurs types de fusibles sont disponibles, chacun d'eux ayant été conçu pour une application spécifique. L'utilisation d'un mauvais type de fusible ou d'un fusible ayant un calibre non adapté risque de provoquer des accidents ou d'endommager les équipements. L'utilisation d'un fusible surcalibré occasionne souvent un échauffement anormal des câbles ou de l'équipement qui, à son tour, risque de provoquer des incendies.

Avant de remplacer des fusibles, il faut couper et verrouiller (consigner) le circuit et, ensuite, le tester pour vérifier qu'il est bien hors tension. Cette vérification peut sauver des vies. Il faut ensuite identifier la cause des courts-circuits ou des surcharges éventuelles et remplacer les fusibles qui ont fondu par d'autres du même type et du même calibre. Il ne faut jamais insérer de fusibles dans un circuit sous tension.

Les disjoncteurs

Bien que les disjoncteurs soient depuis longtemps utilisés dans les circuits haute tension, ils le sont de plus en plus souvent pour de nombreux autres types de circuits basse tension. Il en existe de différents types: à déclenchement immédiat ou différé, et à commande locale ou à distance.

Il existe deux grandes catégories de disjoncteurs: à déclencheur thermique ou magnétique.

Les disjoncteurs thermiques réagissent uniquement à l'élévation de température d'un bilame parcouru par le courant à surveiller. Les variations de la température ambiante du circuit vont donc avoir une influence, minime il est vrai, sur le seuil de déclenchement. Le temps de réaction d'un tel disjoncteur est relativement long.

Par contre, les disjoncteurs magnétiques réagissent instantanément à une augmentation brusque de l'intensité du courant qui traverse le circuit. En général, un disjoncteur est équipé des deux déclencheurs, l'un magnétique et l'autre thermique.

Il faut rappeler qu'un disjoncteur ne peut faire la différence entre un matériel raccordé au circuit et une personne entrant en contact simultané avec chacune des phases ou entre phase et neutre.

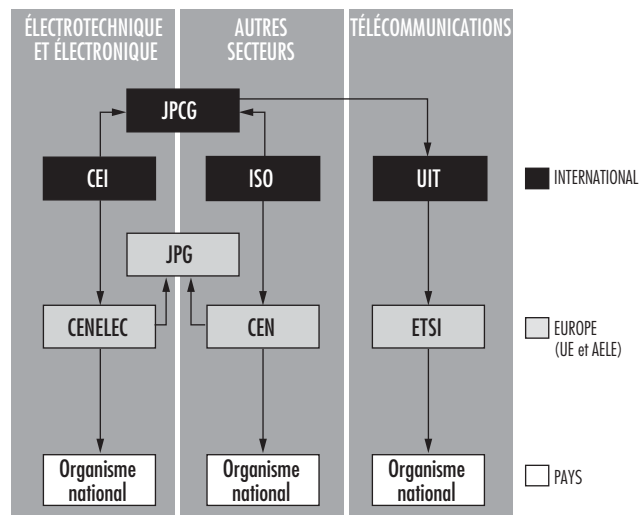
Les normes et la réglementation

Les différents organismes compétents en matière de normalisation et de réglementation internationales sont mentionnés à la figure 40.3 (Winckler, 1994). Les lignes horizontales correspondent à la portée géographique des normes (mondiale (internationale), continentale (régionale ou nationale), tandis que les colonnes correspondent à leurs domaines d'application. La Commission électrotechnique internationale (CEI) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) sont toutes deux coordonnées par un groupe mixte de coordination des présidents (JPCG); l'équivalent européen est le Groupe mixte des présidents (JPG).

Tous les organismes de normalisation organisent régulièrement des réunions internationales. Leur composition reflète l'évolution de la normalisation.

Le CENELEC, ou Comité européen de normalisation électrotechnique, a été fondé par les comités de génie électrique des pays signataires du Traité de Rome de 1957, lequel est à l'origine de la Communauté économique européenne (CEE). Ses six membres fondateurs ont été rejoints par les membres de l'Association euro-

Figure 40.3 • Organismes compétents en matière de normalisation et de réglementations internationales



JPCG = Groupe mixte de coordination des présidents JPG = Groupe mixte des présidents
 CEI = Commission électrotechnique internationale CENELEC = Comité européen de normalisation électrotechnique
 ISO = Organisation internationale de normalisation CEN = Comité européen de normalisation
 UIT = Union internationale des télécommunications ETSI = Institut européen des normes de télécommunications

péenne de libre-échange (AEE). Le CENELEC, dans sa forme actuelle, fut créé le 13 février 1972.

Contrairement à la CEI, le CENELEC se concentre sur l'application des normes internationales dans les pays membres, plutôt que sur la création de nouvelles normes. Il importe de rappeler que l'adoption des normes de la CEI par les pays membres est libre, tandis que, dans l'Union européenne, l'adoption des normes et des réglementations du CENELEC est obligatoire. Plus de 90% des normes du CENELEC sont inspirées des normes de la CEI, et plus de 70% d'entre elles sont les mêmes. Le CENELEC a également suscité l'intérêt des pays de l'Europe de l'Est, dont la plupart sont devenus membres en 1991.

L'Association internationale d'essai des matériaux (International Association for Testing and Materials (IATM)), précurseur de l'ISO, a été créée en 1886 et est demeurée active jusqu'à la première guerre mondiale, date à laquelle elle a cessé de fonctionner en tant qu'association internationale. Quelques organisations nationales ont survécu, comme la Société américaine d'essai des matériaux (American Society for Testing and Materials (ASTM)). En 1926, l'Association internationale des normes (International Standards Association (ISA)) a été fondée à New York et est restée active jusqu'à la deuxième guerre mondiale. En 1946, elle a été remplacée par l'ISO, dont la compétence couvre tous les domaines, à l'exception du génie électrique et des télécommunications. Le Comité européen de normalisation (CEN) est l'équivalent européen de l'ISO et a la même fonction que le CENELEC; seulement 40% des normes CEN sont reprises des normes ISO.

Dans le cadre de la consolidation économique internationale, il devient urgent de constituer des bases de données techniques communes dans le domaine de la normalisation. Ce processus est en cours dans plusieurs parties du monde, et de nouveaux organismes de normalisation vont vraisemblablement se développer en dehors de l'Europe. Le CANENA (Council for Harmonization of Electrotechnical Standardization of the Nations of the Americas) est un organisme régional de normalisation, qui a été créé par les pays de

l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) et qui comprend le Canada, les États-Unis et le Mexique. Aux États-Unis, le câblage des locaux est régi par le Code national de sécurité électrique (National Electrical Safety Code (NESC)), ANSI/NFPA 70-1996. Ce code est également utilisé dans plusieurs autres pays d'Amérique du Nord et du Sud. Il spécifie les prescriptions à suivre pour le câblage de locaux au-delà du point de livraison de l'énergie électrique par la compagnie de distribution. Il s'applique à l'installation de conducteurs et d'équipements électriques dans ou sur des bâtiments publics et privés, y compris les grandes caravanes tractables («mobile homes»), les édifices flottants, les parcs à bestiaux, les installations foraines, les parcs de stationnement et autres, ainsi que les sous-stations industrielles. Il ne s'applique cependant pas aux installations électriques à bord des bateaux, au matériel roulant des chemins de fer, aux aéronefs et aux véhicules à moteur. Il ne s'applique pas non plus aux domaines qui sont normalement couverts par le NESC: installations de télécommunications ou des compagnies de distribution d'électricité, etc.

Les normes européennes et américaines pour l'exploitation des installations électriques

La norme européenne EN 50110-1, *Exploitation des installations électriques* (CEN, 1997a), préparée par le Groupe de travail 63-3 du CENELEC, constitue le document de base régissant l'exploitation en sécurité des installations électriques et la réalisation en sécurité des travaux effectués sur, avec ou dans l'environnement de ces installations. Elle définit des exigences minimales pour tous les pays appartenant au CENELEC (CEN, 1997b) et fait l'objet d'une brève analyse ci-après.

La norme équivalente aux États-Unis est le Code national de sécurité électrique (NESC) de l'Institut national américain de normalisation (American National Standards Institute (ANSI) (ANSI, 1990). Il s'applique aux installations de distribution d'électricité, depuis la production du courant et les signaux de transmission sur le réseau de transport de l'énergie électrique jusqu'à la livraison aux utilisateurs. Certaines installations, notamment celles des mines et des bateaux, ne sont pas concernées par le NESC, dont les directives visent à assurer la sécurité du personnel chargé de l'installation, de l'exploitation ou de la maintenance des lignes de transmission et des équipements associés. Ces directives fixent les normes minimales de sécurité à respecter sur les lieux de travail et dans les espaces publics sous certaines conditions particulières. Le code n'a pas été conçu comme une recommandation de conception ou un manuel d'instructions, mais comme un code national de sécurité.

La norme européenne de 1997

Les définitions

Cette norme s'applique aux installations électriques conçues pour la production, le transport, la conversion, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique, qu'elles soient permanentes et fixes, temporaires ou mobiles. Elle couvre toutes les installations fonctionnant à des niveaux de tension allant de la très basse tension à la très haute tension.

Les dispositions de la norme s'appliquent aux procédures d'exploitation, de travail et de maintenance, de même qu'aux travaux non électriques — tels que les travaux de construction — effectués près des lignes aériennes ou des câbles souterrains. Elles ne visent pas, par contre, les aéronefs, les bateaux, les systèmes de traction électrique, les systèmes électroniques de télécommunication ou d'information.

La norme ne définit que les termes les plus courants. Des informations supplémentaires sont fournies par la CEI (CEI, 1998).

Selon cette norme, une installation électrique comprend tous les matériels électriques utilisés pour la production, le transport, la conversion, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique, y compris les sources d'énergie telles que les batteries et les condensateurs (ENEL SpA, 1994; EDF-GDF, 1991). Le risque électrique est défini comme la source des dommages corporels et des atteintes à la santé dus à une installation électrique ou à la présence d'énergie électrique.

Les principes fondamentaux

Sécurité: la réalisation en toute sécurité des travaux effectués sur, avec ou à proximité d'une installation électrique exige une évaluation des risques électriques avant le début des travaux.

Personnel: toute personne travaillant sur, avec ou à proximité d'une installation électrique doit être instruite des prescriptions et des règles de sécurité ainsi que des consignes internes de l'entreprise applicables à ce travail. Lorsque le travail est long ou complexe, ces consignes doivent être rappelées. Une personne est dite «qualifiée» lorsqu'elle possède une instruction et une expérience appropriées pour lui permettre d'éviter les dangers que peut présenter l'électricité. Une personne est dite «avertie» lorsqu'elle a été suffisamment informée par une personne qualifiée pour lui permettre d'éviter ces mêmes dangers.

Organisation: chaque installation électrique doit être placée sous la responsabilité d'une personne désignée chargée de l'installation. Lorsque les travaux concernent plusieurs installations ayant des frontières communes, il est essentiel que les personnes désignées chargées de chaque installation se mettent d'accord sur les mesures à prendre.

Tous les travaux sont placés sous la responsabilité de la personne désignée chargée des travaux. Lorsqu'ils incluent des tâches secondaires, des personnes sont désignées pour assurer la sécurité de chaque tâche.

Communication: celle-ci inclut tous les moyens de transmission ou d'échange de l'information entre plusieurs personnes, c'est-à-dire par la parole (y compris le téléphone, la radio ou les échanges verbaux), par écrit (y compris la télécopie) et par voie audiovisuelle (y compris les écrans de visualisation, les panneaux d'affichage et les signaux sonores et lumineux).

Toutes les informations nécessaires pour que l'installation électrique fonctionne sans danger, comme la configuration du réseau, l'état de l'appareillage (fermé, ouvert, mis à la terre) et la position des dispositifs de sécurité seront notifiées formellement.

Zone de travail: un espace de travail suffisant, des moyens d'accès et un éclairage adéquat seront assurés pour toute installation électrique sur, avec ou à proximité de laquelle des travaux vont être effectués.

Outils, équipements et dispositifs: les outils, équipements et dispositifs seront conformes aux normes européennes, nationales et internationales appropriées, lorsqu'elles existent.

Plans et dossiers: les plans et dossiers de l'installation seront mis à jour et tenus à disposition.

Signalisation: si nécessaire, une signalisation adéquate sera mise en place pour attirer l'attention sur les risques présents pendant la durée des travaux.

Les procédures d'exploitation courantes

Manœuvres: certaines manœuvres visent à modifier l'état électrique d'une installation. Il en existe de deux types:

- les manœuvres visant à modifier l'état électrique d'une installation, par exemple afin d'utiliser un équipement, de fermer ou d'ouvrir un circuit, de mettre en route ou d'arrêter une installation ou une partie de l'installation pour effectuer des travaux. Ces manœuvres peuvent être effectuées localement ou à distance;

- la séparation avant, ou la reconnexion après la réalisation de travaux hors tension. Ces opérations seront effectuées par un personnel qualifié ou averti.

Vérifications de fonctionnement: les mesures à prendre incluent les procédures de mesurage, d'essai et de vérification.

Par mesurage, on entend toutes les opérations servant à mesurer des données physiques dans une installation électrique. Le mesurage sera confié à un personnel qualifié ou averti.

Les essais comprennent toutes les opérations conçues pour vérifier le fonctionnement ou l'état électrique, mécanique ou thermique d'une installation électrique. Ces essais seront effectués par un personnel qualifié ou averti.

L'objet des vérifications est de s'assurer qu'une installation électrique est conforme aux réglementations techniques et de sécurité qui s'appliquent en la matière. La vérification peut comprendre le contrôle de l'état normal de l'installation.

Les procédures de travail

Généralités: la personne désignée chargée de l'installation électrique ou la personne désignée chargée des travaux doivent s'assurer que le personnel a reçu des consignes spécifiques et détaillées avant le début et après la fin des travaux.

Avant le début des travaux, la personne désignée chargée des travaux informe celle chargée de l'installation électrique de la nature et de l'emplacement des travaux ainsi que de leurs conséquences sur l'installation électrique. L'information sera fournie de préférence par écrit, surtout lorsque les opérations à effectuer sont complexes.

Les travaux peuvent être répartis en trois catégories: les travaux hors tension, les travaux sous tension et les travaux au voisinage de pièces sous tension. Des mesures de protection contre les chocs électriques, les courts-circuits et les arcs ont été mises au point pour chaque catégorie.

Induction: les précautions ci-après seront prises lors de travaux sur des lignes électriques exposées à une induction de courant:

- mise à la terre, à des intervalles adéquats; cette mesure permet de réduire le potentiel entre les conducteurs et la terre à un niveau de sécurité acceptable;
- mise à la terre et équipotentialité de la zone de travail, afin d'éviter que les travailleurs aient la possibilité de s'insérer dans une bouche d'induction.

Conditions atmosphériques: en cas d'éclairs ou de tonnerre, on ne doit ni commencer ni poursuivre des travaux sur des conducteurs exposés d'installations ou sur des appareils directement reliés à des conducteurs exposés.

Les travaux hors tension

Pendant la durée des travaux, les mesures ci-après visent à maintenir les installations électriques de la zone de travail hors tension. A moins d'une raison essentielle de procéder autrement, ces mesures seront appliquées dans l'ordre indiqué:

Séparation: la partie de l'installation sur laquelle les travaux vont être effectués sera séparée de toute source d'alimentation.

Exclusion de toute possibilité de réalimentation: tous les dispositifs de manœuvre utilisés pour séparer l'installation électrique pendant les travaux seront verrouillés, de préférence en bloquant leur mécanisme de manœuvre.

Vérification de l'absence de tension: l'absence de tension sera vérifiée sur toutes les phases de l'installation électrique, sur la zone même des travaux ou aussi près que possible de celle-ci.

Mise à la terre et en court-circuit: sur les installations haute tension et, dans certains cas, sur les installations basse tension, toutes les sections de l'installation concernées par les travaux seront mises à

la terre et en court-circuit après avoir été déconnectées. Les équipements de mise à la terre et de mise en court-circuit seront préalablement reliés à la terre. Les conducteurs et les matériels qui doivent être mis à la terre seront reliés à l'équipement de mise à la terre seulement après que ce dernier aura été relié à la terre. Dans la mesure du possible, les équipements de mise à la terre et en court-circuit devraient être visibles de la zone de travail.

Protection contre les pièces voisines sous tension: des mesures de protection supplémentaires sont nécessaires si certaines parties d'une installation électrique au voisinage de la zone de travail ne peuvent pas être mises hors tension. Le personnel ne sera autorisé à commencer à travailler qu'après avoir reçu l'accord de la personne désignée chargée des travaux, qui devra elle-même avoir reçu l'autorisation de la personne désignée chargée de l'installation électrique. Une fois les travaux terminés, le personnel quittera la zone de travail; les outils et les équipements seront rangés et les dispositifs de mise à la terre et de mise en court-circuit seront enlevés. La personne désignée chargée des travaux notifiera alors à la personne désignée chargée de l'installation électrique que la remise sous tension peut avoir lieu.

Les travaux sous tension

Généralités: les travaux sous tension sont ceux qui sont effectués sur des conducteurs sous tension. Les directives concernant les dimensions d'une zone sous tension figurent dans la norme européenne EN 50179. Les mesures de protection contre les chocs électriques, les arcs et les courts-circuits seront appliquées.

Formation et qualification: des programmes de formation spécifiques seront définis afin de développer et d'entretenir la compétence du personnel qualifié ou averti pour la réalisation de travaux sous tension. A l'issue de la formation, un certificat sera délivré attestant que le personnel est capable d'entreprendre le travail sous tension pour lequel il a été formé et en fonction de son niveau de formation.

Maintien de l'aptitude du personnel: l'aptitude à effectuer des travaux sous tension sera entretenue par la pratique ou par une nouvelle formation.

Méthodes de travail: il existe trois méthodes reconnues qui se distinguent par la position du travailleur par rapport aux éléments sous tension et par les moyens appliqués pour la protection contre les chocs électriques, les arcs et les courts-circuits:

- le travail à distance;
- le travail au contact;
- le travail au potentiel.

Chaque méthode requiert une préparation, un équipement et des outils différents; le choix de la méthode la plus appropriée dépend des caractéristiques des travaux à effectuer.

Outils et équipements: les caractéristiques, l'utilisation, le stockage, la maintenance, le transport et le contrôle des outils, des équipements et des dispositifs feront l'objet de spécifications.

Conditions météorologiques: en cas de mauvais temps, on appliquera des restrictions au travail sous tension, car les propriétés isolantes ainsi que la visibilité et la mobilité du personnel sont réduites.

Organisation du travail: le travail sera préparé d'une manière adéquate. En cas de travaux complexes, une préparation comprendra une notification écrite préalable. La personne désignée chargée des travaux informera celle chargée de l'installation électrique de la nature des travaux et de la partie de l'installation sur laquelle ils doivent se dérouler. Avant le commencement des travaux, le personnel sera informé de leur nature, des mesures de sécurité à appliquer, du rôle de chaque travailleur ainsi que des outils et des équipements à utiliser.

Des mesures spécifiques sont indiquées pour les installations à haute, à basse et à très basse tension, respectivement.

Les travaux au voisinage de pièces sous tension

Généralités: les travaux au voisinage de pièces sous une tension nominale supérieure à 50 V en courant alternatif ou 120 V en courant continu ne seront entrepris que lorsque des mesures de sécurité garantissent que des pièces sous tension ne peuvent être touchées ou que la zone de travail sous tension ne peut être atteinte. Pour ce faire, on peut avoir recours à des écrans, des barrières, des enveloppes ou des protecteurs isolants.

Avant le début du travail, la personne désignée chargée des travaux informera le personnel, et particulièrement les personnes qui n'ont pas l'habitude de travailler au voisinage de pièces sous tension, des distances de sécurité à respecter, des principales précautions à observer et de la nécessité d'adopter un comportement conforme à la sécurité. Les limites de la zone de travail seront définies et délimitées avec précision, et les conditions de travail inhabituelles seront signalées. Les distances de sécurité proposées sont indiquées dans des annexes.

Les travailleurs feront en sorte qu'aucune partie de leur corps et qu'aucun objet ou outil qu'ils utilisent ne pénètrent dans la zone de travail sous tension. Ils seront particulièrement attentifs lors de la manipulation d'objets longs (extrémités de câbles, tuyaux, échelles, etc.)

Protection par écrans, barrières, enveloppes ou protecteurs isolants: la sélection et l'installation de ces dispositifs de protection assureront une protection suffisante contre les contraintes électriques et mécaniques prévisibles. Ces équipements seront bien entretenus et maintenus solidement en place pendant la durée des travaux.

La maintenance

Généralités: le but de la maintenance est de conserver l'installation électrique dans l'état requis. Elle peut être préventive (effectuée régulièrement de manière à prévenir les pannes et à assurer le bon état de fonctionnement), ou corrective (effectuée dans le but de réparer le matériel ou de remplacer des pièces défectueuses).

Les travaux de maintenance peuvent être répartis en deux catégories de risques:

- travaux présentant un risque de choc électrique, de court-circuit ou d'arc pour lesquels les procédures applicables aux travaux sous tension et au voisinage de pièces sous tension doivent être respectées;
- travaux pour lesquels il n'est pas nécessaire de suivre toutes les procédures relatives aux travaux sous tension. Il s'agit des travaux hors tension.

Personnel: le personnel affecté aux travaux de maintenance sera suffisamment qualifié ou formé et disposera d'outils et de dispositifs de mesure et d'essai appropriés, et, le cas échéant, d'un équipement approprié de protection individuelle.

Travaux de réparation: les travaux de réparation se dérouleront selon les étapes suivantes: localisation du défaut, élimination du défaut, remplacement des composants défectueux, remise en service de la partie réparée de l'installation. Il pourra être nécessaire d'appliquer des procédures différentes lors de chaque étape.

Travaux de remplacement: les remplacements de matériel seront effectués le plus possible hors tension, sur l'installation consignée. Dans certains cas, si l'installation ne présente aucun risque d'électrisation, certains remplacements peuvent être effectués sous tension (fusibles, lampes, etc.).

La formation du personnel aux dangers d'origine électrique

Une bonne organisation du travail et une formation solide à la sécurité sont des éléments clés de tout programme de prévention.

C'est à la direction qu'incombe la responsabilité d'assurer la formation des employés. Elle doit, pour ce faire, mettre au point une politique de formation et des programmes concrets comprenant une phase de formation et une phase de qualification.

Les programmes relatifs aux travaux sous tension devraient inclure les éléments ci-après:

Formation: dans certains pays, les programmes et les outils de formation doivent être approuvés formellement par un comité des travaux sous tension ou un organisme similaire. Les programmes sont basés surtout sur l'expérience pratique, complétée par des cours techniques. La formation consiste en exercices d'application effectués sur des installations types, intérieures ou extérieures, similaires aux installations réelles.

Qualifications: les procédures applicables aux travaux sous tension sont très rigoureuses et exigent un personnel possédant les qualifications spécifiques requises. Toute personne affectée à des travaux sous tension ne devrait travailler que sur des installations dont la nature et la complexité correspondent à son niveau de qualification. Dans certains pays, les qualifications des électriciens sont régies par des normes nationales.

Par ailleurs, ces travailleurs devraient avoir suivi des cours et acquis une formation pratique dans le domaine des premiers secours. On se référera à ce sujet au chapitre n° 14, «Les premiers secours et les services médicaux d'urgence», de la présente *Encyclopédie*.

Références bibliographiques

- American National Standards Institute (ANSI), 1990: *National Electrical Safety Code, ANSI C2* (New York).
- Andreoni, D. et Castagna, R., 1983: *L'ingegnere e la sicurezza*, vol. 2 (Rome, Edizioni Scientifiche).
- Comité européen de normalisation (CEN), 1997a: *Exploitation des installations électriques*, EN 50110-1 (Bruxelles).
- , 1997b: *Exploitation des installations électriques (annexes nationales)*, EN 50110-2 (Bruxelles).
- Commission électrotechnique internationale (CEI), 1987: *Effets du courant passant par le corps humain. Deuxième partie: Aspects particuliers*, CEI/TR 60479-2 (Genève).
- , 1994: *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques. Partie 1: Aspects généraux*, CEI/TR2 60479-1 (Genève).
- , 1998: *Partie 891: «Electrobiologie»*, CEI 60050-891, dans *Vocabulaire électrotechnique international* (Genève).
- Electricité de France-Gaz de France (EDF-GDF), 1991: *Carnet de prescriptions au personnel — Prévention du risque électrique* (Paris).

- ENEL SpA, 1994: *Disposizioni per la Prevenzione dei Rischi Elettrici* (Milan).
- Folliot, D., 1982: *Les accidents d'origine électrique*, Collection Monographie de médecine du travail (Paris, Masson).
- Gilet, J.C. et Choquet R., 1990: *La sécurité électrique: techniques de prévention* (Grenoble, Société alpine de publication).
- Gourbière, E., Lambrozo, J., Folliot, D. et Gary, C., 1994: «Complications et séquelles des accidents dus à la foudre», *Revue générale de l'électricité*, vol. 6 (juin).
- Kanc, J.W. et Sternheim, M.M., 1980: *Fisica Biomedica. Corso introduttivo*, vol. II (Rome, EMSI).
- Lee, R.C., Capelli-Schellpfeffer, M. et Kelley, K.M., 1994: «Electrical injury: A multidisciplinary approach to therapy, prevention and rehabilitation», *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 720 (New York).
- Lee, R.C., Cravalho, E.G. et Burke, J.F., 1992: *Electrical Trauma* (Cambridge, Cambridge University Press).
- Winckler, R., 1994: *Electrotechnical Standardization in Europe: A Tool for the Internal Market* (Bruxelles, CENELEC).

Références complémentaires

- Association suisse des électriciens (ASE), 1990: *Basic Safety Requirements for Low-Voltage Electric Equipment* (Zurich).
- Casini, V.J., 1993: «Occupational electrocutions: Investigation and prevention», *Professional Safety*, vol. 38, n° 1, pp. 34-39.
- Commission électrotechnique internationale (CEI), 1990: *Sécurité des machines-outils électriques semi-fixes. Première partie: Règles générales*, CEI 61029-1 (Genève).
- , 1994: *Marquage des matériels électriques avec des caractéristiques assignées relatives à l'alimentation électrique. Prescriptions de sécurité*, CEI 61293 (Genève).
- , 1998a: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Partie 1: Vue d'ensemble et application*, CEI 60417-1 (Genève).
- Communauté économique européenne (CEE), 1989: «Directive 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail», *Journal Officiel* n° L183 du 29 juin 1989, pp. 0001-0008 (Luxembourg).

- Donnachie, P.E., 1994: «Dangers de l'électricité — Introduction», *Health and Safety Data File*, juin, pp. C1-C4.
- Fraser, D., 1990: «Unit: Safety technology-module: Electrical safety», dans *Occupational Health and Safety* (Portsmouth, Portsmouth Polytechnic).
- Garside, R., 1990: *Electrical Apparatus and Hazardous Areas* (Aylesbury, Hexagon Technology).
- Grube, B.J., Heimbach, D.M., Engrav, L.H. et Copass, M.K., 1990: «Neurologic consequences of electrical burns», *Journal of Trauma*, vol. 30, n° 3, pp. 254-258.
- Harvey-Sutton, P.L., Driscoll, T.R., Frommer, M.S. et Harrison, J.E., 1992: «Work-related electrical fatalities in Australia, 1982-1984», *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 18, n° 5, pp. 293-297.
- Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HGBV), 1989: *Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen. Richtlinien statische Elektrizität* (Cologne, Carl Heymanns Verlag).
- Health and Safety Executive, 1993: *Electricity at Work: Safe Working Practices* (Londres, HMSO).
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 1993: *Accidents d'origine électrique* (Paris).
- Jenkins, B.D., 1993: *Touch Voltages in Electrical Installations* (Oxford, Blackwell Scientific Publications).
- Kinloch, C.D., 1987: *Electrical Installation: Snags and Solutions* (Royaume-Uni, Reed Business Publishing).
- Omeish, T.M. et Sebastian M., 1991: «Overcoming electrical risks in hazardous process areas», *Fire Prevention* n° 245, déc., pp. 21-26.
- Paureau, J. et Rollin, M., 1990: «Chaussures de sécurité anti-électrostatiques. Evaluation des principales méthodes de détermination de la résistance d'isolement», *Cahiers de notes documentaires — Sécurité et hygiène du travail*, 2^e trimestre, n° 139, note n° 1781-139-90, pp. 405-419.
- Pineault, M., Rossignol, M. et Barr R.G., 1994: «Inter-rater analysis of a classification scheme of occupational fatalities by electrocution», *Journal of Safety Research*, vol. 25, n° 2, pp. 107-115.
- Reilly, J.P. et Antoni, H., 1992: *Electrical Stimulation and Electropathology* (Cambridge, Cambridge University Press).
- Suruda, A. et Smith, L., 1992: «Work-related electrocutions involving portable power tools and appliances», *Journal of Occupational Medicine*, vol. 34, n° 9, pp. 887-892.
- Tilley, L., 1992: «Electrocution — A shock to the system», *Australian Safety News*, vol. 63, n° 11, pp. 58-59.
- Walker, E., 1992: *Safety Managers Pocket Guide to Electrical Inspection* (Rotherham, Saxton Safety Services).
- Yakuboff, K.P. et Kleinert, H.E., 1991: «Electrical injuries», dans M.L. Kasdan (directeur de publication): *Occupational Hand and Upper Extremity Injuries and Diseases* (Philadelphie, Hanley and Belfus).