



Centre Universitaire d'Ain Temouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

Sécurité électrique en milieu médical

Préparé et enseigné par

Samir ZELMAT

2013-2014

Tables des matières

| | |
|---|----|
| Tables des matières | 2 |
| Avant-Propos | 3 |
| I. Introduction | 4 |
| I-1. Histoire du risque électrique | 4 |
| I-2. Histoire de la normalisation | 5 |
| II. Statistiques d'accidents électriques | 7 |
| II-1. Statistiques de l'INSERM..... | 8 |
| II-2. Statistiques de la CNAM | 8 |
| II-3. Statistiques du Comité Technique de l'Electricité | 10 |
| II-4. Statistiques de l'INRS | 11 |
| III. Effet du courant électrique sur le corps humain | 14 |
| III-1. Nature des accidents d'origine électrique | 14 |
| III-2. Effet du courant alternatif | 18 |
| III-3. Effet du courant continu | 20 |
| IV. Impédance électrique du corps humain..... | 22 |
| IV-1. Impédance interne du corps humain..... | 23 |
| IV-2. Cas particulier lié à la présence d'eau..... | 24 |
| IV-3. Effets physiologiques du courant au travers d'un corps immergé..... | 26 |
| V. Origine du risque..... | 29 |
| V-1. Contact direct..... | 29 |
| V-2. Contact indirect | 31 |
| V-3. Défauts sur les installations électriques | 33 |
| VI. Protection contre les contacts directs | 36 |
| VI-1. Mise hors de portée..... | 36 |
| VI-2. Très basse tension | 41 |
| VII. Protection contre les contacts indirects..... | 42 |
| VII-1. Architecture d'une distribution électrique..... | 42 |
| VII-2. Schémas de liaison à la terre | 46 |
| Annexes | 54 |
| Bibliographie..... | 60 |

Avant-Propos

Ce document s'adresse aux étudiants de la formation Master 2 « Electronique Biomédicale » dispensée au sein du département de Génie Electrique du Centre Universitaire d'Ain Temouchent. Il s'inscrit dans le cadre du module « Sécurité électrique en milieu médical » mais il peut être également utilisé en Licence et autres Master du domaine du Génie électrique. Il traite en effet la problématique de sécurité électrique que tout utilisateur de l'énergie électrique peut en être confronté soit en tant que professionnel du génie électrique ou même en tant qu'utilisateur domestique de l'électricité.

En effet, l'emploi généralisé de l'énergie électrique dans toutes ses applications et dans tous les domaines (depuis la production d'énergie électrique jusqu'au consommateur final) fait que le risque électrique est présent partout et doit être évalué et maîtrisé en toute occasion.

Samir ZELMAT

I. Introduction

I-1. Histoire du risque électrique

L'électricité, sous la forme de ses manifestations atmosphériques a été longtemps considérée comme l'esprit du mal. L'histoire abonde des tentatives tragiques de nombreux chercheurs et même, parmi eux, deux rois qui imaginèrent des systèmes de protection contre la foudre.

Vers 1790, l'anatomiste italien Galvani entra dans le domaine des réactions de l'organisme animal au courant électrique avec des expériences sur les grenouilles.

Les premières études scientifiques sur l'action physiologique du courant électrique s'engagèrent alors en France et les noms des chirurgiens des armées impériales Larrey et Bichat y sont attachés, tandis que le docteur Uré réalisa les premières expériences de réanimation des électrisés.

Des recherches sur les effets physiopathologiques du courant électrique ont été effectuées par de nombreux chercheurs. Ces travaux ont porté sur des animaux vivants dont les réactions peuvent être extrapolées par rapport à celles de l'homme. Des mesures de résistance ont également été effectuées sur des cadavres humains peu de temps après leur décès

Entre 1970 et 1980, le professeur autrichien Biegelmeier s'est livré sur lui-même à des mesures de courant et d'impédance sous des tensions allant de 10 à 220 V, entre différentes parties de son corps et dans différentes conditions d'humidité.

Il a ainsi effectué plus de 600 mesures qui ont permis d'améliorer de façon importante nos connaissances sur les effets du courant électrique sur le corps humain. Inutile de préciser que cet homme courageux s'était entouré de toutes les précautions nécessaires pour éviter tout risque d'accident ; en particulier, le circuit qui l'alimentait était protégé par quatre dispositifs différentiels de 30 mA en série, et son assistant disposait des moyens de réanimation nécessaires.

I-2. Histoire de la normalisation

En 1969, la Commission électrotechnique internationale (CEI), décida d'établir les seuils d'apparition de danger en fonction des divers paramètres qui agissent toujours en interdépendance étroite (en particulier le courant i et le temps t avec la charge $q = it$), afin notamment de permettre aux différents comités d'études de fixer avec précision les règles de sécurité que devaient respecter les matériels et installations électriques.

Cette étude fut confiée par la CEI à un groupe de travail composé de médecins, de physiologistes, d'ingénieurs de sécurité, qui publia dès 1974 un premier rapport portant l'indice 479 et donnant une première approche des dangers du courant électrique passant par le corps humain ; cette publication reconnaissait notamment que la probabilité d'apparition des accidents était très faible dans des circonstances habituelles, à des tensions inférieures ou égales à 50 V en courant alternatif à 50Hz et à 75 V en courant continu.

NB : CEI ou IEC en Anglais (International Electrotechnical Commission). La CEI a son siège en suisse. Son magasin en ligne (webstore) est disponible sur internet pour vendre les différentes publications et normes (<http://webstore.iec.ch>)

Après des études plus approfondies, une deuxième édition de la publication 479 était publiée en deux parties :

- le rapport 479-1, sur les valeurs de l'impédance électrique du corps humain, sur les effets du courant alternatif de 1,5 à 100 Hz, sur les effets du courant continu ;
- le rapport 479-2, sur les effets des courants de fréquence supérieure à 100 Hz, les formes d'onde spéciales, les impulsions de courte durée.

Tenant compte, d'une part, des plus récentes expériences du professeur Biegelmeier sur lui-même et, d'autre part, de nouvelles mesures effectuées sur des animaux ; la publication a été reprise en 5 documents :

- **CEI/TS 60479-1** : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1 : Aspects généraux (2005) ;

-
- **CEI/TS 60479-2** : Effets du courant sur l’homme et les animaux domestiques - Partie2 : Aspects particuliers (2007) ;
 - **CEI/TS 60479-3** : Effets du courant sur l’homme et les animaux domestiques - Partie3 : Effets du courant passant par le corps d’animaux domestiques (2000) ;
 - **CEI/TR 60479-4** : Effets du courant passant par le corps d’animaux domestiques – Partie4 : Effets de la foudre (2011) ;
 - **CEI/TR 60479-5** : Effets du courant passant par le corps d’animaux domestiques – Partie5 : Valeurs des seuils de tension de contact pour les effets physiologiques (2007)

Un aperçu du contenu de ces normes est présenté en annexe de ce document.

II. Statistiques d'accidents électriques

Il est difficile d'obtenir des statistiques sur les accidents électriques en Algérie par manque d'enquêtes, d'études et d'organismes de statistiques développés. Mais à travers les statistiques de France présentées dans ce qui suit, on peut se faire une idée sur la situation qui peut exister en Algérie.

Déjà en France, il est fait état d'absence de structure nationale permettant l'établissement d'une statistique exhaustive sur l'origine des accidents. Des éléments partiels sont disponibles auprès des divers organismes intéressés, susceptibles de donner une représentation assez cohérente.

Cependant, il est difficile de discerner les causes premières de ces accidents qui, sauf cas particuliers, ne sont pas connues avec suffisamment de précisions, et peuvent également faire l'objet d'interprétations diverses.

Exemples :

- Dans le cas d'une chute d'échelle causée par un choc électrique : le décès éventuel sera classé sous la rubrique « chutes ».
- Nombreux sont les incendies réputés provenir d'un court-circuit ; ce qui est certain, c'est que, en cas de feu, des courts-circuits se produisent. Mais sont-ils survenus avant ou après le départ du feu ? Cela reste à discerner!

Sont présentés ici des tableaux provenant de différents organismes et qui bien que portant sur des périodes différentes ont permis de croiser des informations et de proposer des conclusions qui montrent que la pédagogie des accidents d'origine électrique doit continuer tant que l'on n'atteint pas la suppression de tous ces accidents.

II-1. Statistiques de l'INSERM

L'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) recense la plupart des cas mortels. Le Tableau 1 présente les données pour les années 1970 à 1999.

| Année | Hommes | Femmes | Total | Population (en 10 ⁶ habitants) |
|-------|--------|--------|-------|--|
| 1970 | 176 | 26 | 202 | 50,52 |
| 1975 | 144 | 29 | 173 | 52,65 |
| 1980 | 130 | 19 | 149 | 53,59 |
| 1985 | 146 | 22 | 168 | 55,06 |
| 1990 | 112 | 22 | 134 | 56,61 |
| 1995 | 76 | 10 | 86 | 58,02 |
| 1999 | 69 | 12 | 81 | 58,39 |

Tableau 1 : Accidents mortels

II-2. Statistiques de la CNAM

La CNAM (Caisse nationale de l'assurance maladie) couvre le domaine général des risques professionnels et publie des statistiques d'accidents du travail. Le Tableau 2 récapitule les données pour les années 1981 à 2010.

On observe sur la période 1996-2008 une moyenne de 862 accidents enregistrés ayant pour cause l'électricité, 79 accidents graves et 12 mortels, pour un nombre de journées perdues de 41 523. Pour se faire une idée de l'incidence du facteur électricité sur la population active on note que pour l'année 2008, 18 508 530 salariés ont été concernés, qu'il y a eu 703 976 accidents avec arrêt, 44 037 accidents graves, 569 décès et 37 422 365 journées perdues. Si on compare ces derniers chiffres avec les moyennes précédentes, on peut dire que l'électricité représente 0,12 % des accidents, 0,18 % des accidents graves, 2,11 % des accidents mortels et 0,11 % des journées perdues.

Bien que la tendance à la baisse apparaisse sur une longue période, il faut cependant constater que le nombre d'accidents mortels n'arrive plus à baisser significativement. Cette situation laisse penser qu'il faut maintenir en permanence une grande vigilance lors des opérations sur ou au voisinage des ouvrages et des installations électriques dans tous les usages de l'électricité, d'autant plus que le risque d'accident mortel est 10 fois plus grand que pour les autres accidents.

| Année | Accidents avec arrêt | Accidents graves | Accidents mortels | Nombre de journées perdues |
|-------|----------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| 1981 | 1 829 | 225 | 40 | |
| 1982 | 1 671 | 224 | 41 | |
| 1983 | 1 601 | 210 | 39 | |
| 1984 | 1 445 | 209 | 30 | |
| 1985 | 1 306 | 185 | 42 | |
| 1986 | 1 228 | 149 | 29 | |
| 1987 | 1 254 | 143 | 25 | |
| 1988 | 1 200 | 196 | 43 | |
| 1989 | 1 288 | 172 | 37 | |
| 1990 | 1 308 | 177 | 35 | |
| 1991 | 1 288 | 174 | 38 | |
| 1992 | 1 225 | 167 | 27 | |
| 1993 | 1 045 | 128 | 25 | |
| 1994 | 958 | 118 | 13 | |
| 1995 | 930 | 122 | 12 | |
| 1996 | 916 | 99 | 19 | 45 180 |
| 1997 | 906 | 86 | 17 | 39 484 |
| 1998 | 896 | 89 | 9 | 35 526 |
| 1999 | 861 | 81 | 11 | 40 538 |
| 2000 | 888 | 84 | 12 | 45 399 |
| 2001 | 874 | 69 | 16 | Non enregistré |
| 2002 | 915 | 97 | 8 | 50 817 |
| 2003 | 837 | 87 | 6 | 52 655 |
| 2004 | 865 | 79 | 22 | 49 935 |
| 2005 | 802 | 90 | 5 | 43 156 |
| 2006 | 834 | 74 | 11 | 48 018 |
| 2007 | 838 | 86 | 11 | 42 766 |
| 2008 | 771 | 82 | 9 | 47 917 |
| 2009 | 807 | 79 | 5 | 50 691 |
| 2010 | 713 | 74 | 5 | 44 662 |

Tableau 2 : Accidents du travail d'origine électriques

II-3. Statistiques du Comité Technique de l'Electricité

Ce comité publie aussi des statistiques telles qu'elles ressortent des enregistrements faits par les entreprises de transport et de distribution de l'électricité. Le Tableau 3 en récapitule les données pour les années 1997 à 2008.

Sur la période 1997-2008, on observe une moyenne de 208 accidents d'origine électrique dont 182 accidents graves et 26 accidents mortels. Ce dernier chiffre est plus élevé que celui de la CNAM (voir Tableau 2) car il comprend tout type de personnes, salariées ou non.

Ces statistiques montrent que 44 % des accidents sont dus à des contacts avec les réseaux nus et 43 % sont dus à des accrochages avec les réseaux isolés. On peut encore analyser que concernant les décès, 31 % sont dus à l'utilisation des engins, 27 % sont survenus pendant les loisirs, 23 % sont dus à des manipulations d'objets longs et lors de travaux et 19 % à des causes diverses.

Ces résultats montrent d'une part l'importance de la formation à la prévention du risque électrique qu'il faut prodiguer à tous les travailleurs, quelle que soit la nature des travaux, électriques ou non, et d'autre part l'information du public par des campagnes de sensibilisation.

| Année | Accidents graves | | | | | Accidents mortels | | | | |
|-------|------------------|------------------------|---------|--------|-------|-------------------|------------------------|---------|--------|-------|
| | Engins | Manutention et travaux | Loisirs | Divers | Total | Engins | Manutention et travaux | Loisirs | Divers | Total |
| 1997 | 48 | 16 | 10 | 9 | 83 | 8 | 10 | 10 | 2 | 30 |
| 1998 | 32 | 25 | 11 | 17 | 85 | 3 | 4 | 4 | 6 | 17 |
| 1999 | 49 | 38 | 22 | 19 | 128 | 9 | 13 | 8 | 5 | 35 |
| 2000 | 103 | 36 | 26 | 38 | 203 | 5 | 8 | 8 | 4 | 25 |
| 2001 | 81 | 21 | 33 | 27 | 162 | 9 | 6 | 11 | 5 | 31 |
| 2002 | 72 | 20 | 16 | 34 | 142 | 12 | 3 | 8 | 9 | 32 |
| 2003 | 86 | 26 | 22 | 47 | 181 | 8 | 2 | 6 | 5 | 21 |
| 2004 | 90 | 32 | 13 | 53 | 188 | 13 | 4 | 3 | 3 | 23 |
| 2005 | 120 | 24 | 21 | 50 | 215 | 1 | 5 | 6 | 6 | 18 |
| 2006 | 139 | 43 | 15 | 78 | 275 | 8 | 6 | 6 | 4 | 24 |
| 2007 | 149 | 33 | 19 | 45 | 246 | 12 | 4 | 7 | 6 | 29 |
| 2008 | 139 | 49 | 24 | 64 | 276 | 8 | 2 | 5 | 8 | 23 |

Tableau 3 : Accidents d'origines électriques CTE

II-4. Statistiques de l'INRS

L'INRS (Institut national de recherche et de sécurité) a repris les résultats publiés par la CNAM et a produit une analyse d'une centaine d'accidents sur des installations à basse tension, sur une quinzaine d'années (INRS ES 325). Cette analyse montre la répartition suivante :

▪ **Emplacement :**

- Ateliers 45 %.
- Autres 35 %.
- Chantiers 10 %.
- Non précisés 10 %.

La majorité des accidents a lieu sur des emplacements autres que les chantiers. Ce résultat n'est pas surprenant puisque ces accidents ne tiennent pas compte de ceux survenant avec des lignes aériennes des domaines à basse tension (BT) ou à haute tension (HT), qui sont très fréquents sur les chantiers.

▪ **Matériel en cause**

- Armoires, coffrets, prises de courant 45 %.
- Machines 45 %.
- Canalisations 10 %.

▪ **Nature du travail**

On constate que les accidents surviennent, dans la majorité des cas, au cours de dépannages, et souvent, au cours de travaux d'ordre non électrique :

- Dépannage 42 %.
- Installation, modification, rénovation 23 %.
- Travaux d'ordre non électrique 30 %.

-
- Nettoyage 2 %.
 - Non précisé 2 %.
 - Autres travaux 1 %.

▪ **Qualification du personnel accidenté**

- Qualification suffisante 50 %.
- Qualification sans rapport avec l'accident 30 %.
- Qualification insuffisante 20 %.

Les victimes ont dans leur majorité une qualification suffisante pour les travaux qui leur ont été fixés

▪ **Conséquences de l'accident**

- Brûlures 42 %.
- Chocs électriques 36 %.
- Décès 32 %.

▪ **Nature du contact**

- Contact direct 45 %.
- Court-circuit 30 %.
- Contact indirect 20 %.
- Non précisé 5 %.

Près de la moitié des accidents est due à des contacts avec des conducteurs ou pièces nues sous tension. Le tiers à la suite d'un court-circuit au cours de travaux. 20 % le sont par suite de défaut d'isolement

- **Travaux avec tension maintenue**

- Non nécessaires 45 %.
- D'ordre non électrique 30 %.
- Nécessaires 20 %.
- Non précisé 5 %.

- **Principaux facteurs déterminants**

- Travail mal organisé 35 % ;
- Installations défectueuses 28 % ;
- Opérateur non qualifié 15 % ;
- Non précisé 7 % ;
- Ignorance du risque 5% ;
- Matériel défectueux 4 % ;
- Matériel inadapté 3 % ;
- Fausse manœuvre 2 % ;
- Mouvement inopiné 1 %.

Conclusion :

Ces résultats montrent d'une part l'importance de la formation à la prévention du risque électrique qu'il faut prodiguer à tous les travailleurs, quelle que soit la nature des travaux, électriques ou non, et d'autre part l'information du public par des campagnes de sensibilisation.

III. Effet du courant électrique sur le corps humain

III-1. Nature des accidents d'origine électrique

- **Terminologie**

L'électrisation désigne tout accident électrique, mortel ou non. Elle peut se traduire par une simple commotion (choc/secousse) qui peut ne pas avoir de suite, ou à l'opposé, par un état de fibrillation ventriculaire entraînant la mort.

L'électrocution est un accident mortel, dû à l'électricité.

La fibrillation ventriculaire qui peut suivre l'électrisation est un état transitoire de l'organisme, dit état de mort apparente, qui correspond à un rythme de fonctionnement anarchique du cœur sous l'effet du passage d'un courant électrique de faible intensité (de l'ordre de quelques dizaines de mA). Ce régime cardiaque perturbé du cœur peut se prolonger et l'arrêt définitif du cœur se produire s'il n'y a pas d'intervention extérieure de réanimation (ventilation artificielle, massage cardiaque) permettant le maintien de la survie en attendant l'arrivée des secours médicalisés d'urgence.

NB : Si la fibrillation ventriculaire est considérée comme la cause principale de mort par choc électrique, il existe aussi des cas de mort par asphyxie dus à la téτανisation des muscles respiratoires ou par arrêt du cœur.

- **L'électrisation**

Les effets du courant électrique sur le corps humain dépendent de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer :

- la nature et l'intensité du courant qui traverse le corps humain (continu, alternatif, pulsé,...)
- les caractéristiques physiologiques de l'individu (âge, poids, sexe, etc.)
- la durée du passage et le trajet pris par le courant dans le corps humain

On définit un facteur de risque pour le cœur (dit facteur de courant de cœur) comme étant le rapport du courant I_{ref} (passant par le cœur pour un trajet de référence allant de la main gauche aux deux pieds), au courant I_h pour un trajet donné (voir Tableau 4).

| | |
|--|-----|
| Main gauche au pied gauche, droit, ou aux deux | 1 |
| Deux mains aux deux pieds | 1 |
| Main gauche à la main droite | 0,4 |
| Main droite au pied gauche, droit, ou aux deux | 0,8 |
| Dos à la main droite | 0,3 |
| Dos à la main gauche | 0,7 |
| Poitrine à la main gauche | 1,5 |
| Poitrine à la main droite | 1,3 |
| Siège à la main gauche, droite ou aux deux | 0,7 |

Tableau 4 : Facteurs de risque pour le cœur pour différents trajets du courant

▪ Effets sur les muscles

On distingue au niveau du corps humain deux types de muscles :

- les muscles moteurs commandés par le cerveau, tels que par exemple les muscles des membres inférieurs ou supérieurs ;
- les muscles auto-réflexes qui fonctionnent automatiquement, tels que la cage thoracique et le cœur.

- Muscles moteurs

Les muscles moteurs assurent par leur contractilité et leur élasticité les mouvements du corps. Les muscles antagonistes, par les actions opposées, permettent la flexion et l'extension des membres. C'est le cas du biceps et du triceps du bras, par exemple.

Lorsqu'un courant électrique traverse un muscle moteur, le cerveau ne contrôle plus ce dernier, ce qui a pour effet de provoquer de violentes contractions générant des mouvements intempestifs qui se traduisent par le non-lâcher de la pièce objet du contact ou par une répulsion, compte tenu de la nature du muscle sollicité (fléchisseur ou extenseur).

- Muscles de la cage thoracique

La cage thoracique fonctionne automatiquement sous le contrôle du cervelet qui commande les nombreux muscles concernés par la fonction respiration.

L'asphyxie d'origine respiratoire peut donc être due à l'action du courant électrique au niveau:

- des muscles thoraciques provoquant la téτανisation ;
- du cervelet entraînant l'arrêt respiratoire pur et simple.

A titre indicatif, on anesthésie certains animaux en abattoir (en occident) en leur appliquant une tension déterminée au niveau du cervelet provoquant ainsi l'arrêt respiratoire mais pas celui du cœur, ce qui permet de les saigner.

- Muscle cardiaque

Le cœur possède ses propres systèmes de commandes automatiques. Au cours du cycle cardiaque (d'une durée de 0,75s) il existe une phase critique durant laquelle le cœur est le plus vulnérable.

Si une électrisation de durée suffisante survient en fin de systole durant la phase critique, il peut en résulter un fonctionnement désordonné (Figure 1). C'est la fibrillation ventriculaire donc, et elle peut provoquer l'arrêt du cœur.

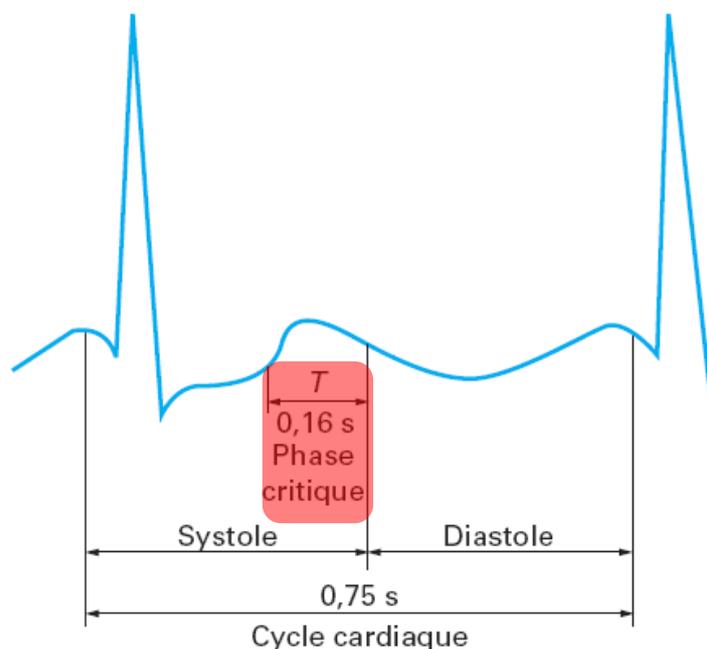


Figure 1 : Cycle cardiaque

NB : Systole : Phase du cycle cardiaque correspondant à la contraction du cœur.
Diastole : Période qui suit la systole et durant laquelle le cœur se remplit de sang

▪ Les brûlures

On distingue deux grandes familles de brûlure provoquées par le courant électrique : les brûlures internes et les brûlures externes.

- Brûlures internes

Ces brûlures de type électrothermique sont provoquées par la dissipation de l'énergie produite par effet Joule tout le long du trajet du courant dans le corps humain.

Cette énergie est fonction de la résistance que le courant traverse et du carré de la valeur efficace de l'intensité : $W = RI^2t$

avec W (J) énergie produite par effet Joule,

R (Ω) résistance,

I (A) courant,

t (s) temps.

Ces brûlures provoquent des nécroses internes situées plus particulièrement au niveau des muscles.

- **Brûlures externes**

Ces Brûlures ont principalement pour origine des arcs électriques. Elles sont provoquées par des projections de particules métalliques en fusion dues à l'intense chaleur dégagée par effet Joule au cours de la production de l'arc électrique. Ces brûlures ne diffèrent en rien des brûlures thermiques traditionnelles.

Elles sont généralement superficielles et localisées aux parties non protégées au moment où se produit l'arc électrique.

De plus un arc électrique émet des radiations ultraviolettes (UV) susceptibles de provoquer des brûlures mais également d'affecter la vision d'un opérateur situé à proximité et ne portant pas de protection oculaire anti-UV.

III-2. Effet du courant alternatif

Avant de traiter les effets du courant et leurs différents seuils, il est utile de connaître d'abord la définition de certains termes qu'on peut rencontrer en traitant ce sujet.

- **Le seuil de perception** dépend de plusieurs paramètres tels que la surface de contact, les conditions de contact (sécheresse, humidité, pression et température) ainsi que des caractéristiques physiologiques de l'individu. D'une façon générale, la valeur de **0,5 mA** est prise en compte pour caractériser ce seuil.

- **Le seuil de non-lâcher** dépend lui aussi de plusieurs paramètres, parmi lesquels on peut citer la surface de contact, la forme et les dimensions des électrodes, ainsi que les caractéristiques physiologiques de la personne. La valeur de **10 mA** est couramment retenue pour ce seuil.

- **Le seuil de fibrillation ventriculaire** (se situe à **~50 mA**) dépend autant de paramètres physiologiques (anatomie du corps, état des fonctions cardiaques...) que de paramètres électriques. En courant alternatif, il décroît considérablement si la durée de passage du courant est prolongée au-delà d'un cycle cardiaque ($> 0,75s$).

Les effets sur l'homme dépendent de la valeur du courant mais aussi du temps de passage dans le corps humain comme le montrent la Figure 2 et le Tableau 5.

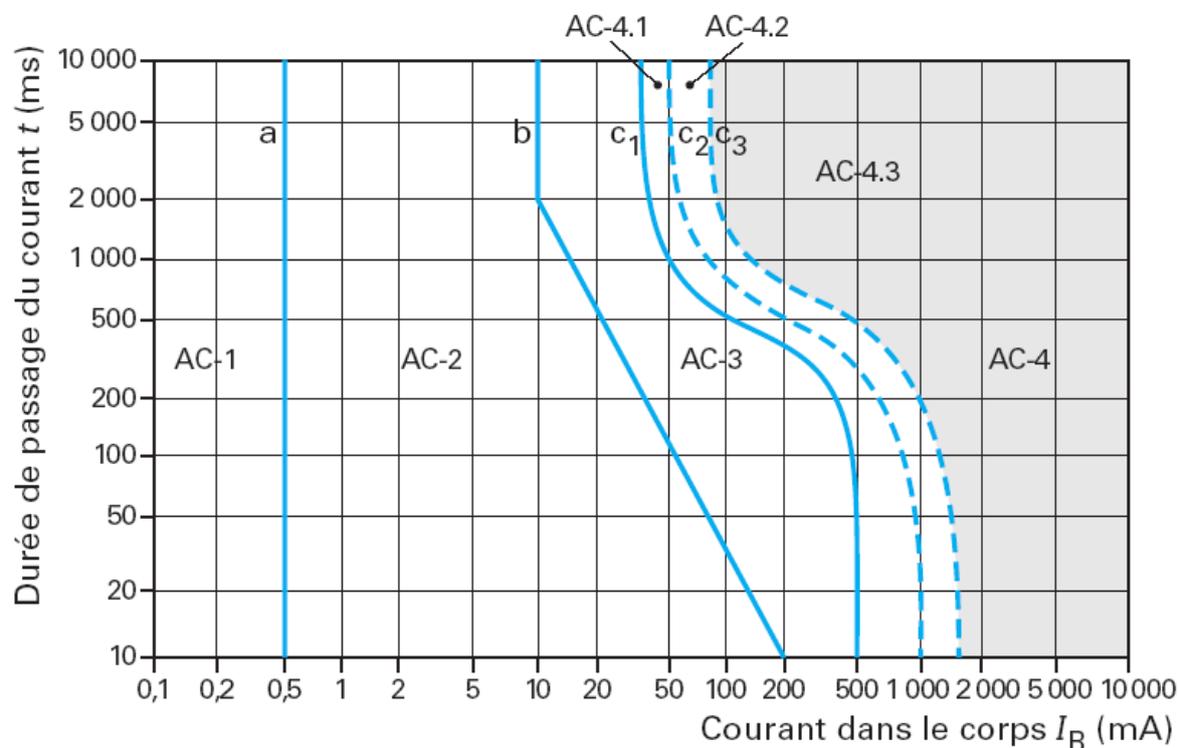


Figure 2 : Zones temps/courant des effets des courants en tension alternative 15 Hz à 100 Hz

| Désignation de la zone (figure 25) | Limites de la zone | Effets physiologiques |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| AC-1 | Jusqu'à 0,5 mA ligne a | Habituellement aucune réaction |
| AC-2 | De 0,5 mA jusqu'à la ligne b (1) | Habituellement, aucun effet physiologique dangereux |
| AC-3 | De la ligne b jusqu'à la courbe c_1 | Habituellement aucun dommage organique. Probabilité de contractions musculaires et de difficultés de respiration pour des durées de passage du courant supérieures à 2 s. Des perturbations réversibles dans la formation et la propagation des impulsions dans le cœur, y compris la fibrillation auriculaire et des arrêts temporaires du cœur sans fibrillation ventriculaire, augmentant avec l'intensité du courant et le temps |
| AC-4 | Au-delà de la courbe c_1 | Augmentant avec l'intensité et le temps, des effets pathophysiologiques tels que l'arrêt du cœur, l'arrêt de la respiration, des brûlures graves peuvent se produire en complément avec les effets de la zone AC-3 |
| AC-4.1 | $c_1 - c_2$ | Probabilité de fibrillation ventriculaire (2) augmentant jusqu'à 5 % |
| AC-4.2 | $c_2 - c_3$ | Probabilité de fibrillation ventriculaire (2) augmentant jusqu'à environ 50 % |
| AC-4.3 | Au-delà de la courbe c_3 | Probabilité de fibrillation supérieure à 50 % |

(1) AC courant alternatif (*alternating current*).
Pour des durées de passage de courant inférieures à 10 ms, la limite du courant traversant le corps pour la ligne b reste constante et égale à 200 mA.

(2) En ce qui concerne la fibrillation ventriculaire, la figure 25 se rapporte aux effets du courant passant de la main gauche aux deux pieds. Les valeurs de seuil pour une durée inférieure à 0,2 s ne sont applicables qu'au passage du courant pendant la période vulnérable (phase critique) du cycle cardiaque.

Tableau 5 : Effets des courants en tension alternative 15 Hz à 100 Hz en fonction du temps

En résumé et afin de garder à l'esprit quelques ordres de grandeurs des effets du courant alternatif et les seuils qui leur correspondent, le tableau suivant les récapitule d'une manière plus synthétique afin de faciliter leur mémorisation.

| Résumé des effets du courant alternatif sur l'homme | |
|---|---|
| Intensité (mA) | Effets |
| 0,5 | Perception cutanée |
| 5 | Secousse électrique |
| 10 | Contracture entraînant une incapacité de lâcher prise |
| 25 | Tétanisation des muscles respiratoires (asphyxie si > 3 min.) |
| 40 (5 s) | Fibrillation ventriculaire |
| 50 (1 s) | Fibrillation ventriculaire |
| 2 000 | Inhibition des centres nerveux |

Tableau 6 : Résumé des effets du courant alternatif sur l'homme

III-3. Effet du courant continu

Les seuils de perception, de non-lâcher et de fibrillation ventriculaire en courant continu sont plus élevés par rapport au courant alternatif. Cette différence provient du fait que, sur le corps humain, les excitations musculaires provoquées par le courant (effets excito-moteurs) sont liées aux variations d'intensité.

Pour produire les mêmes effets, les intensités en courant continu sont généralement de deux à quatre fois supérieures à celles du courant alternatif.

Comme en courant alternatif, les effets sur l'homme dépendent de la valeur du courant mais aussi du temps de passage dans le corps humain comme le montrent la Figure 3 et le Tableau 7.

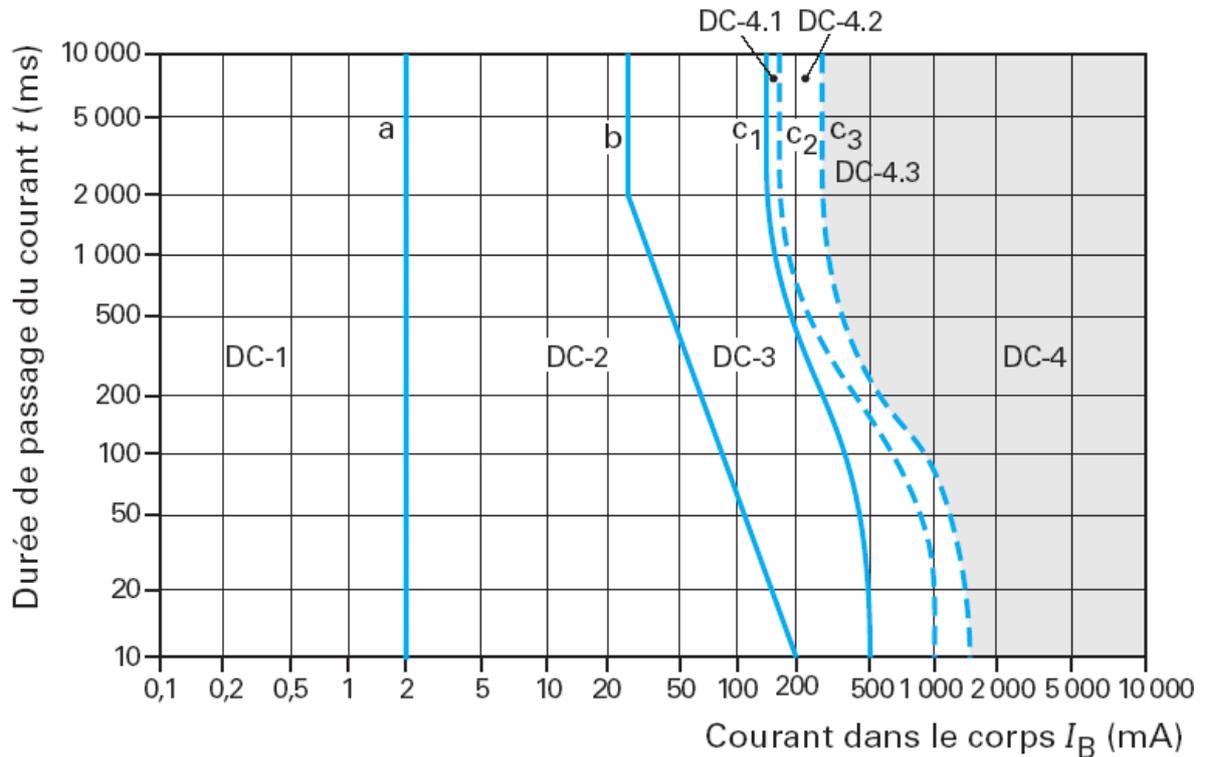


Figure 3 : Zones temps/courant des effets du courant continu

| Désignation de la zone (figure 26) | Limites de la zone | Effets physiologiques |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| DC-1 | Jusqu'à 2 mA ligne a | Habituellement pas d'effet de réaction. Légère sensation de picotement à l'établissement et à l'interruption du courant |
| DC-2 | De 2 mA jusqu'à la ligne b (1) | Habituellement, pas d'effet physiologique nocif |
| DC-3 | De la ligne b jusqu'à la courbe c_1 | Habituellement pas de dégât organique. L'accroissement du courant et du temps est susceptible de provoquer des perturbations réversibles de formation et de conduction des impulsions dans le cœur |
| DC-4 | Au-delà de la courbe c_1 | L'accroissement du courant et du temps provoquent des effets pathophysiologiques dangereux, par exemple, des brûlures profondes surviennent en complément avec les effets de la zone DC-3 |
| DC-4.1 | $c_1 - c_2$ | Probabilité de fibrillation ventriculaire (2) augmentant jusqu'à 5 % |
| DC-4.2 | $c_2 - c_3$ | Probabilité de fibrillation ventriculaire (2) augmentant jusqu'à 50 % |
| DC-4.3 | Au-delà de la courbe c_3 | Probabilité de fibrillation ventriculaire (2) au-dessus de 50 % |

(1) DC courant continu (*direct current*). Pour des durées de passage de courant inférieures à 10 ms, la limite du courant passant à travers le corps pour la ligne b reste constante à une valeur égale à 200 mA.

(2) Concernant la fibrillation ventriculaire, cette figure est relative aux effets d'un courant longitudinal avec un trajet main gauche aux deux pieds et pour un courant montant. Les valeurs de seuil pour une durée inférieure à 0,2 s ne sont applicables qu'au passage du courant pendant la période vulnérable du cycle cardiaque.

Tableau 7 : Zones temps/courant des effets du courant continu

IV. Impédance électrique du corps humain

L'impédance présentée par un corps humain au passage du courant dépend (en dehors des caractéristiques propres à chaque personne) :

- de **la tension** (en raison de la résistance de la peau, qui s'annule au-delà d'un certain seuil).
- des **conditions d'environnement**, susceptibles de réduire cette résistance : la présence d'eau, en particulier, et la résistance des sols et des parois avec lesquels les personnes sont en contact et par l'intermédiaire desquels la boucle de défaut (trajet total du passage de courant entre le générateur et la personne) se ferme.

Généralement, on estime qu'il y a trois situations caractéristiques d'environnement :

- la situation normale
- la situation particulière
- la situation immergée

La situation normale, correspondant aux emplacements secs ou humides, la peau étant sèche (en tenant compte de la présence éventuelle de sueur), le sol présentant une résistance importante (**1 000 Ω au moins**) ;

La situation particulière, les personnes se trouvant exposées à des conditions particulières d'humidité, par exemple dans les locaux mouillés, la peau étant mouillée et le sol présentant une résistance faible (**de l'ordre de 200 Ω**) ;

La situation immergée, lors de laquelle on ne peut plus compter sur la résistance de la peau et du sol.

Ces trois situations caractéristiques se traduisent par des conditions de temps de coupure du courant, par les dispositifs de protection (pour les deux premières) ou par des mesures de sécurité particulières telles que la très basse tension de sécurité limitée à 12 V (pour la troisième).

IV-1. Impédance interne du corps humain

L'impédance interne du corps humain peut être considérée comme essentiellement résistive. Sa valeur dépend principalement du trajet du courant dans le corps ainsi que de la surface de contact.

▪ Impédance de la peau :

Elle peut être considérée comme un ensemble de résistance et de capacité. De nombreux facteurs peuvent influencer sa valeur :

- tension ;
- fréquence ;
- durée de passage du courant ;
- surface de contact ;
- pression de contact ;
- état d'humidité de la peau ;
- température et type de peau.

▪ Impédance totale du corps humain :

Comme le montre le Tableau 8, l'impédance du corps humain varie d'un individu à l'autre en fonction de la tension de contact.

La fréquence a aussi une influence pour des tensions inférieures à 150 V.

| Tension de contact (1) (V) | Valeurs de l'impédance du corps humain qui ne sont pas dépassées par x % de la population | | | | | |
|-------------------------------|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 % | | 50 % | | 95 % | |
| | CA (2) | CC (3) | CA | CC | CA | CC |
| 25 | 1 750 | 2 200 | 3 250 | 3 875 | 6 100 | 8 800 |
| 100 | 1 200 | 1 340 | 1 875 | 2 070 | 3 200 | 3 400 |
| 220 | 1 000 | 1 000 | 1 350 | 1 350 | 2 125 | 2 125 |
| 1 000 | 700 | 700 | 1 050 | 1 050 | 1 500 | 1 500 |
| Valeur asymptotique | 650 | | 750 | | 850 | |

(1) Trajet du courant main-main
(2) CA courant alternatif 50/60 Hz
(3) CC courant continu

Tableau 8 : Impédance du corps humain en fonction de la tension de contact.

Le Tableau 9 résume les seuils de courant suivant la fréquence. On remarque en particulier que les seuils de courant augmentent avec la fréquence. Autrement dit, plus la fréquence est faible, plus c'est dangereux.

| Effet | | Courants seuils (mA) à la fréquence | |
|--|-----------|--|-----------|
| Effet indirect | 50/60 Hz | 1 kHz | 100 kHz |
| Sensation tactile | 0,2 à 0,4 | 0,4 à 0,8 | 25 à 40 |
| Sensation douloureuse au contact avec le doigt | 0,9 à 1,8 | 1,6 à 3,3 | 33 à 55 |
| Choc douloureux/ seuil de relaxation musculaire | 8 à 16 | 12 à 24 | 112 à 224 |
| Choc sévère/ difficulté à respirer | 12 à 23 | 21 à 41 | 160 à 320 |

Tableau 9 : Seuil de courants en fonction de la fréquence

IV-2. Cas particulier lié à la présence d'eau

L'eau pure est essentiellement non conductrice mais, lorsque des impuretés telles que des sels sont ajoutées à l'eau, la résistivité de la solution peut diminuer de façon significative. Le tableau suivant montre des valeurs de résistivité, par exemple de solutions typiquement aqueuses dans lesquelles des personnes peuvent être partiellement ou totalement immergées.

| Solutions aqueuses | Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$) |
|--|---|
| Eau de pluie | 254 à 420 000 |
| Eau dure « normale » | 1 780 |
| Eau du robinet (USA) | 1 290 à 16 000 |
| Eau de lessive (eau du robinet + lessive) | 520 |
| Eau de piscine | 300 |
| Solution saline isotonique (normale) | 60 |
| Eau de mer (océan atlantique, proximité de New York) | 22 |
| Les valeurs de conductivité de ce tableau sont données, de façon approchée et pour des solutions à température normale. Elles varient avec la température. | |

Tableau 10 : Résistivité des solutions aqueuses

Lorsque le corps humain est immergé dans l'eau conduisant un courant électrique, le cheminement du courant électrique au travers de l'eau est modifié par la résistivité du corps et celle de l'eau :

- Lorsque **l'eau est moins** résistive que le corps immergé (par exemple, de l'eau de mer), la plus grande partie du courant qui aurait circulé dans l'eau à la place du corps circule à la **périphérie de ce corps** plutôt qu'à travers lui.
- Lorsque **l'eau est plus résistive que le corps** (par exemple, de l'eau fraîche d'un lac), une plus grande partie du courant circule au travers de la partie de moindre résistance et se **concentre au travers du corps**.

Le Tableau 11 montre les valeurs approchées de résistivité, pour des exemples de parties de corps humain à la température normale du corps. Les valeurs s'appliquent pour des courants alternatifs à basse fréquence ou pour du courant continu.

| Tissus du corps humain | Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$) |
|---|---|
| Sang | 62,9 (1) |
| Fluide cérébro-spinal | 64,6 |
| Bras (partie du corps) | 160 |
| Muscles du squelette | 240 |
| Cou (partie du corps) | 280 |
| Doigts de la main (partie du corps) | 280 |
| Thorax (partie du corps) | 375 à 455 |
| Tronc | 415 |
| Cerveau | 588 |
| Tête (partie du corps) | 840 |
| Muscle cardiaque | 925 à 1 150 |
| Os | 16 000 |
| <p>Le corps humain est hétérogène dans sa constitution et par conséquent dans sa résistivité. Il convient que les valeurs données dans ce tableau, particulièrement pour les valeurs correspondant aux parties du corps, soient considérées comme des valeurs moyennes.</p> <p>(1) Cette valeur s'applique dans cet exemple au plasma sans les cellules. Lorsque, dans cet exemple, le nombre de cellules augmente, la résistivité augmente jusqu'à une valeur pouvant atteindre $300 \Omega \cdot \text{cm}$.</p> | |

Tableau 11 : Résistivité des tissus du corps humain

IV-3. Effets physiologiques du courant au travers d'un corps immergé

La perception et la réaction sont improbables lorsque le corps est totalement immergé dans l'eau. Lorsque le corps est entièrement immergé et qu'il conduit un courant, la densité de courant au travers de la peau est habituellement faible alors même que le courant qui se concentre dans le corps et traverse certaines parties internes des tissus du corps (muscles, sang, nerfs, etc.) peut être important.

À cause de la faible densité de courant dans la peau, des courants de niveaux dangereux peuvent circuler au travers des parties internes d'une personne immergée sans aucune sensation normalement associée au choc électrique.

- Tétanisation :

Les effets physiologiques du courant au travers du corps pouvant induire une tétanisation musculaire (immobilisation) peuvent être particulièrement dangereux lorsque le corps est immergé puisqu'il interfère avec la capacité de la personne à nager, ou peuvent interférer avec la possibilité de garder la tête hors de l'eau.

La noyade peut survenir selon l'interférence avec le contrôle des muscles.

- La fibrillation ventriculaire peut survenir lorsqu'un courant d'amplitude suffisante circule au travers du corps dans la région du cœur. Par exemple, le courant peut circuler directement au travers de la poitrine et sortir par le bras gauche selon l'endroit du corps en contact avec les électrodes situées dans l'eau.

- Des lésions par **brûlures électriques** sont moins probables lorsque le corps est immergé car la peau est refroidie par l'eau. Dans la mesure où une personne est complètement immergée dans l'eau, le courant circulant dans la tête peut produire un certain nombre d'autres effets physiologiques. De **faibles courants** peuvent produire un picotement ou une sensation de brûlure sur la peau.

- Des courants **plus élevés** peuvent stimuler les muscles faciaux. Des courants encore plus élevés peuvent stimuler des nerfs optiques et créer des **phosphènes**. Les phosphènes sont des images de lumière produites par une stimulation externe qui n'implique pas la lumière – dans ce cas, il s'agit du courant (une pression mécanique exercée sur un œil fermé peut également produire des phosphènes). Bien que les phosphènes eux-mêmes ne soient pas dangereux, ils peuvent être effrayants pour une personne qui ne se doute de rien, et pourraient causer une

réaction inconsidérée ou même une réaction de panique, ce qui pourrait engendrer d'autres dangers tels que la noyade.

Les effets directs du courant sont instantanément réversibles lorsque le courant s'arrête ; cependant, un courant plus élevé peut occasionner des douleurs en haut du visage.

- Seuil de courant

Le seuil en courant des effets physiologiques pour une personne dont le corps est immergé dans de l'eau n'a pas une seule valeur. De trop nombreuses variables peuvent influencer sur la valeur de l'impédance du corps humain et modifier constamment le cheminement du courant et l'amplitude du courant tant que le corps bouge dans l'eau par rapport aux électrodes de la source.

Des essais sur le corps d'une personne immergée ont été effectués dans une eau de faible résistivité, égale à $22 \Omega \cdot \text{cm}$ (assimilée à l'eau de mer et préparée par ajout de NaCl dans de l'eau du robinet).

En général, lorsqu'un courant 50/60 Hz supérieur à 5 mA entre et traverse le corps d'une personne immergée, il peut engendrer une téτανisation musculaire qui peut interférer avec la possibilité de nager, interférer avec la respiration ou même provoquer la fibrillation ventriculaire.

V. Origine du risque

Toute personne qui utilise, travaille ou intervient sur une installation ou un ouvrage électrique est soumise à différents risques, parmi lesquels on peut citer :

- le risque de contact avec des pièces nues sous tension
- le risque de contact avec des pièces mises accidentellement sous tension
- le risque de brûlure par projection de matière en fusion lors d'un court-circuit par exemple

Le risque de contact avec des pièces nues sous tension ou mises accidentellement sous tension peut avoir pour conséquence une électrisation, éventuellement accompagnée de brûlures ou dans les cas ultimes une électrocution (décès).

Suivant la nature du contact, on parle de contact **direct** ou de contact **indirect**. Qu'il s'agisse de contact direct ou de contact indirect, le risque principal pour les personnes est une électrisation ou électrocution.

V-1. Contact direct

C'est le contact de personnes avec une partie active d'un circuit électrique.

C'est par exemple le contact avec une partie conductrice d'une borne d'appareil, avec l'âme d'un conducteur **dénudé**.

Le seul fait de toucher un conducteur nu sous tension n'est pas suffisant pour mettre la personne en situation dangereuse. Il faut que le courant puisse circuler dans le corps humain et donc retourner à la source.

- **1^{er} cas** : Sur la Figure 4, la personne qui touche la phase 3 est située sur un tabouret isolant. De ce fait, le courant ne peut pas circuler dans le corps et par conséquent il n'y a pas de risque pour la personne. La personne est portée au potentiel de la phase 3, mais aucun courant (ou un courant très faible) ne circule à l'intérieur du corps.

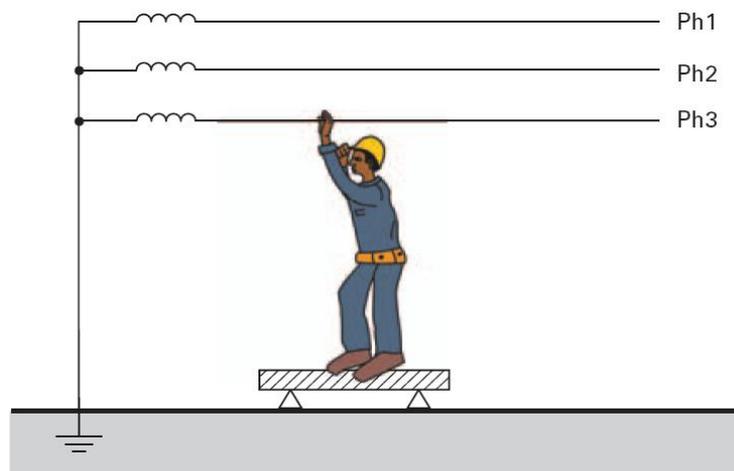


Figure 4 : Courant direct : 1^{er} cas

2^{ème} cas : Contrairement au cas précédent, la Figure 5 montre que la personne ne repose plus sur le tabouret isolant, et un courant de défaut (I_d) circule dans le corps de l'opérateur via le circuit de terre.

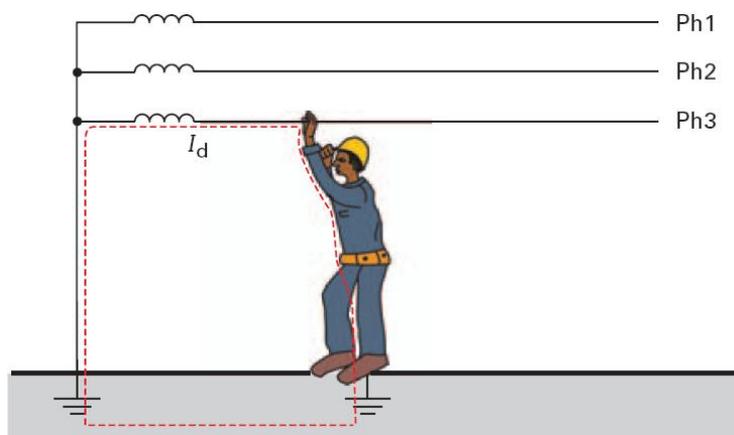


Figure 5 : Courant direct : 2^e cas

- **3^{ème} cas** : Comme dans le 1^{er} cas, la personne se trouve sur un tabouret isolant mais touche simultanément 2 conducteurs actifs (ph2 et ph3, dans ce cas). Le courant de défaut I_d qui traverse le corps de la personne est important (Figure 6).

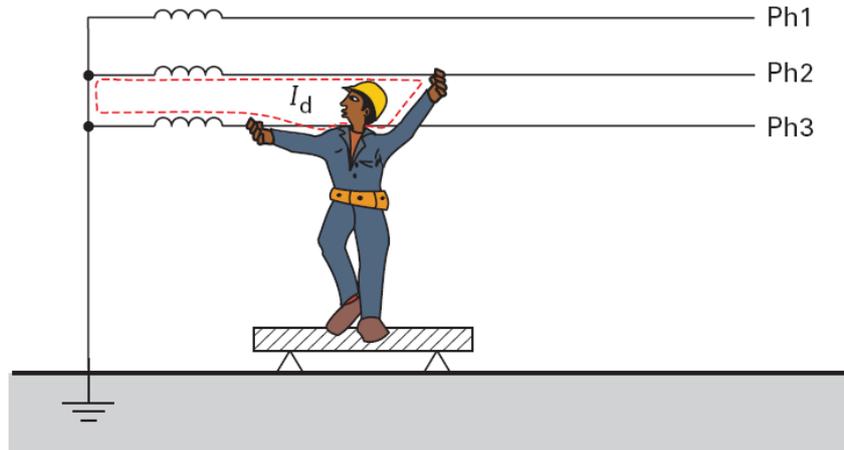


Figure 6 : Courant direct : 3^e cas

V-2. Contact indirect

C'est le contact de personnes avec une masse mise sous tension par suite d'un défaut d'isolement. Suivant le type de schéma de liaison à la terre, un défaut d'isolement peut, ou non, provoquer un risque de contact indirect.

- **1^{er} cas** : Dans le schéma présenté dans la Figure 7, le point neutre du transformateur est relié directement à la terre. Un défaut d'isolement de la phase 3 dans le récepteur M va provoquer une tension de défaut par rapport à la terre (U_d) ; cette tension est dangereuse pour la personne si cette dernière touche la masse de M.

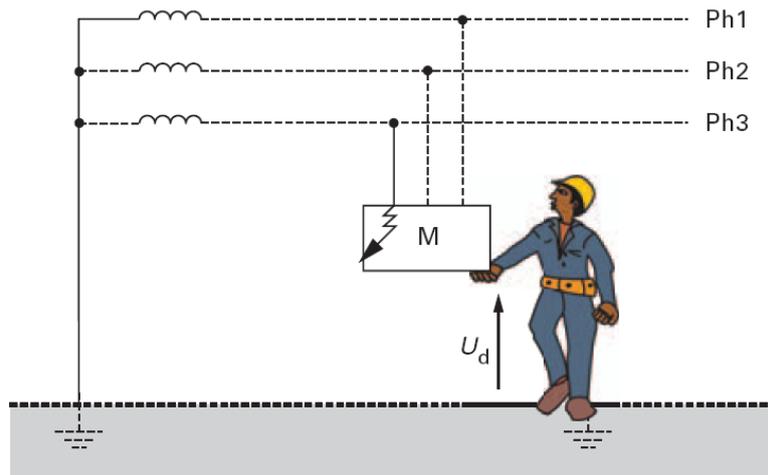


Figure 7 : Contact indirect 1^{er} cas

- **2^{ème} cas :** Contrairement au cas précédent, un défaut d'isolement de la phase 3 dans le récepteur M ne va pas provoquer de situation dangereuse, car le point neutre du transformateur d'alimentation est isolé de la terre (voir Figure 8).

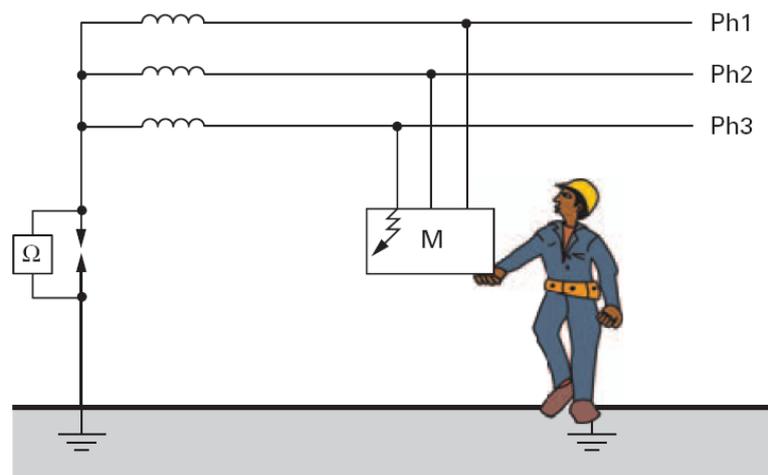


Figure 8 : Contact indirect : 2^e cas

- **3^{ème} cas :** Comme dans le 2^{ème} cas, le neutre du transformateur d'alimentation est isolé de la terre. L'apparition de deux défauts d'isolement (Ph3 sur masse M1 et Ph2 sur masse M2) va provoquer une situation dangereuse pour la personne si celle-ci touche simultanément les 2 masses. Dans ce cas, elle est soumise à la tension entre phases (Figure 9).

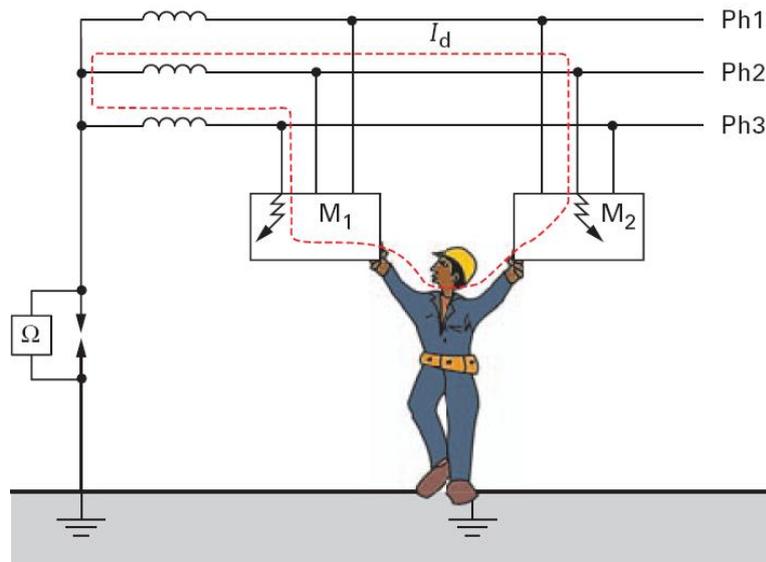


Figure 9 : Contact indirect : 3^e cas

V-3. Défaits sur les installations électriques

▪ Court-circuit

Un court-circuit est un contact accidentel entre deux conducteurs portés à un potentiel différent (par exemple deux phases, ou une phase et le neutre). Il peut être dû :

- à une mauvaise manipulation ;
- à l'usure des isolants ;
- à une surtension ayant entraîné une rupture de l'isolation.

L'intensité du courant n'est alors limitée que par l'impédance des conducteurs et du transformateur. Celle-ci est d'autant plus importante que le court-circuit se situe près du poste de distribution (de quelques kA en domestique à la centaine de kA en industriel).

Vu la valeur de l'intensité du courant, l'énergie dissipée par effet Joule dans les éléments de l'installation (câbles, contacts...) est très importante. Elle est proportionnelle au carré du

courant et au temps. Le produit I^2t s'appelle la contrainte thermique ; il donne une image de l'échauffement.

Le court-circuit peut entraîner la destruction de l'appareillage, des risques d'incendie ou d'explosion s'il n'est pas éliminé rapidement.

Les courants de court-circuit entraînent également des efforts électromagnétiques importants qui peuvent provoquer l'arrachement des conducteurs ou la destruction de l'appareillage.

L'intensité de court-circuit est un élément déterminant du dimensionnement d'une installation électrique. Pour évaluer ce risque, on parle aussi de puissance de court-circuit de la ligne en un point donné :

$$S_{cc} = U_{20} I_{cc} \quad \text{en monophasé}$$

$$S_{cc} = \sqrt{3} U_{20} I_{cc} \quad \text{en triphasé} \quad (\text{avec } U_{20} \text{ tension à vide de l'installation})$$

Nous pouvons avoir : un court-circuit entre phase et neutre I_{k1} ; un court-circuit entre deux phases I_{k2} ou un court-circuit sur les trois phases I_{k3} .

Suivant le type de schéma de liaison à la terre, un défaut d'isolement peut provoquer un court-circuit

▪ Surcharges

On appelle surcharge une consommation d'intensité (appel de courant) supérieure à l'intensité nominale du circuit.

Cela peut être dû :

- à un nombre trop important de consommateurs branchés sur ce circuit (lampe, prise...)
- à la consommation excessive d'un actionneur (moteur).

Suivant son importance, le circuit peut la supporter pendant un temps plus ou moins long. Le risque principal est la destruction de l'isolant. La surcharge peut ensuite évoluer en court-circuit ou en défaut d'isolement.

L'échauffement peut également provoquer un incendie.

- **Défaut d'isolement**

Dans une installation, un défaut d'isolement peut rendre accessibles des conducteurs portés à un potentiel dangereux.

Les masses métalliques des appareils d'utilisation peuvent entrer en contact avec des conducteurs actifs et être ainsi, à leur tour, portées à des potentiels élevés, ce qui est particulièrement dangereux pour l'utilisateur.

Dans ce cas, le risque est d'avoir un contact indirect.

VI. Protection contre les contacts directs

Les mesures de protection contre les contacts directs sont destinées à rendre impossible un contact avec des parties actives de l'installation électrique. Les principes de protection les plus utilisées sont les mises hors de portée (éloignement, obstacles, isolation, dispositif différentiel à haute sensibilité) ou l'utilisation d'une très basse tension

VI-1. Mise hors de portée

- **Eloignement**

Ce mode de protection implique de prévoir, entre les parties actives et les personnes exposées, une distance telle qu'un contact fortuit soit impossible directement ou indirectement par l'intermédiaire d'objets conducteurs (perches, bornes ou tubes métalliques par exemple).

Pour les chantiers, ces distances sont respectivement de :

- 3 m pour une tension inférieure à 50 kV;
- 5 m pour une tension de 50 kV et plus.

D'autres distances de sécurité existent, en particulier pour les locaux ou emplacements de travail réservés à la production, la conversion ou la distribution de l'électricité.

Exemples :

- 2,30 m pour les installations inférieures à 1 kV ;
- 2,50 m pour les installations inférieures à 30 kV ;
- 2,60 m pour les installations dont la tension nominale se situe entre à 30 et 45kV.

- **Obstacles**

La protection par obstacle est utilisée, entre autres, lorsque la protection par éloignement n'est pas possible. Elle consiste à disposer des obstacles efficaces entre les personnes et les parties sous tension.

Ces obstacles constituent une **enveloppe** du matériel électrique. Ils peuvent être des parois pleines (cuve de transformation par exemple), percées de trous, ou des grillages, sous réserve que la dimension des trous ou des mailles n'en compromette pas l'efficacité.

Cette efficacité est caractérisée par le degré de protection tel que défini dans la norme EN 60529, et qui porte sur :

- la protection des personnes contre les contacts directs avec les parties sous tension, ainsi que celle du matériel électrique contre la pénétration des corps solides étrangers et des poussières à l'intérieur des enveloppes.
- la protection du matériel contre la pénétration des liquides à l'intérieur des enveloppes.

Le degré (ou l'indice) de protection procuré par les enveloppes est symbolisé par les lettres IP (International Protection) suivies de deux chiffres. Exemple : « IP 34 » signifie :

- IP : appareil protégé contre,
- 3 : la pénétration des corps étrangers solides (degré 3),
- 4 : la pénétration des liquides (degré 4).

Lorsqu'il est requis d'indiquer un degré de protection au moyen seulement d'un chiffre caractéristique, le chiffre non précisé est remplacé par la lettre X.

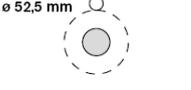
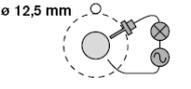
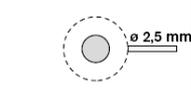
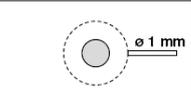
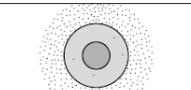
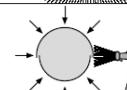
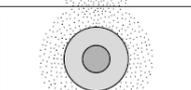
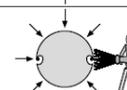
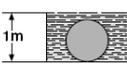
Exemple : IPX5 ou IP2X.

Le Tableau 14 présente la signification des chiffres qui caractérise le degré de protection.

Pour la résistance aux chocs mécaniques, il existe un autre indice de protection mécanique « IK » défini par la norme EN 62262. Le Tableau 12 présente la correspondance entre les indices IK et la classification « AG ».

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------|-----|-------|------|-------|-----|-----|---|-----|---|-----|----|-----|
| Energie de choc (J) | 0 | 0,15 | 0,2 | 0,225 | 0,35 | 0,375 | 0,5 | 0,7 | 1 | 2 | 5 | 6 | 10 | 20 |
| Degré IK | 0 | 1 | 2 | | 3 | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | 9 | 10 |
| Classification AG (NF C 15100) | | | AG1 | | | | | | | AG2 | | AG3 | | AG4 |

Tableau 12 : Correspondance entre les indices de protection mécanique IK et AG.

| 1 ^{er} CHIFFRE PROTECTION CONTRE LA PENETRATION DES CORPS SOLIDES | | | 2 ^e CHIFFRE PROTECTION CONTRE LA PENETRATION DES LIQUIDES | | | LETTRE ADDITION- NELLE (2) | DEGRES DE PROTECTION |
|--|---|---|---|---|--|----------------------------------|---|
| IP | Tests | | IP | Tests | | | DESCRIPTION ABREGEE |
| 0 | | Pas de protection | 0 | | Pas de protection | | |
| 1 |  | Protégé contre les corps solides de diamètre supérieur ou égal à 50 mm | 1 |  | Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation) | A | Protégé contre l'accès avec le dos de la main |
| 2 ⁽¹⁾ |  | Protégé contre les corps solides de diamètre supérieur ou égal à 12 mm | 2 |  | Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale | B | Protégé contre l'accès avec un doigt |
| 3 |  | Protégé contre les corps solides de diamètre supérieur ou égal à 2,5 mm | 3 |  | Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale | C | Protégé contre l'accès avec un outil |
| 4 |  | Protégé contre les corps solides de diamètre supérieur ou égal à 1 mm | 4 |  | Protégé contre les projections d'eau de toutes directions | D | Protégé contre l'accès avec un fil |
| 5 |  | Protégé contre les poussières (pas de dépôts nuisibles) | 5 |  | Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance | | |
| 6 |  | Totalement protégé contre les poussières | 6 |  | Protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer | | |
| Les deux premiers chiffres caractéristiques sont définis de façon identique par les normes NF EN 60529, CEI 60529 et DIN 40050 | | | 7 |  | Protégé contre les effets de l'immersion | | |

Nota :

(1) Le chiffre 2 est déterminé par deux essais :

- non pénétration d'une sphère de diamètre 12,5 mm
- non accessibilité du doigt d'épreuve de diamètre 12 mm.

(2) La lettre additionnelle définit l'accès à des parties dangereuses uniquement.

Exemple : un appareil est muni d'une ouverture permettant l'accès avec un doigt. Il ne sera pas classé IP2x. Par contre, si les parties accessibles au doigt ne sont pas dangereuses (choc électrique, brûlure,...), l'appareil pourra être classé xxB.

Tableau 13 : Signification des chiffres caractéristiques de l'indice de protection.

▪ Isolation

Cette mesure, qui intervient lorsque l'éloignement et les obstacles ne peuvent être utilisés, consiste à recouvrir les conducteurs et les parties actives par une isolation appropriée.

Cette isolation doit être adaptée à la tension et il doit être tenu compte dans son choix des dégradations éventuelles auxquelles elle peut être soumise.

- Isolation du Matériel électrique

Dans le cadre de la construction du matériel en vue de la protection contre les chocs électriques, on a les définitions suivantes :

- Isolation principale : isolation des parties actives dont la défaillance peut entraîner un risque de choc électrique.

- Isolation supplémentaire : isolation indépendante prévue en plus de l'isolation principale en vue d'assurer la protection contre les chocs électriques en cas de défaut de l'isolation principale.

- Isolation renforcée : isolation unique assurant une protection contre les chocs électriques, équivalente à celle procurée par une double isolation.
- Double isolation : isolation comprenant à la fois une isolation principale et une isolation supplémentaire.

▪ **Classes de matériel**

Les matériels sont répertoriés du point de vue de la protection électrique, en quatre classes, dont la numérotation n'implique aucune hiérarchie de valeur. On distingue les classes suivantes :

- **Matériel de la classe 0** : matériel dans lequel la protection contre les chocs électriques repose sur l'isolation principale. Cela implique qu'aucune disposition n'est prévue pour le raccordement des parties conductrices accessibles (masses), s'il y en a, à un conducteur de protection faisant partie du câblage fixe de l'installation.

Les matériels de la classe 0 ne sont plus admis depuis 1991.

- **Matériel de la classe I** : matériel dans lequel la protection contre les chocs électriques ne repose pas uniquement sur l'isolation principale, mais qui comporte une mesure de sécurité supplémentaire sous la forme de moyens de raccordement des parties conductrices accessibles (masses) à un conducteur de protection mis à la terre, faisant partie du câblage fixe de l'installation.

Les parties conductrices accessibles ne doivent pas pouvoir devenir dangereuses en cas de défaut de l'isolation principale.

- **Matériel de la classe II** : matériel dans lequel la protection contre les chocs électriques ne repose pas uniquement sur l'isolation principale, mais qui comporte des mesures supplémentaires de sécurité, telles que la double isolation ou l'isolation renforcée. Ces mesures ne comportent pas de moyen de mise à la terre de protection et ne dépendent pas des conditions d'installations.

Sont actuellement de classe II la plupart :

- du petit matériel électroménager : moulins à café, batteurs, robots, ... ;
- du matériel de bureau : ordinateurs, machines à calculer, lampes amovibles... ;
- du matériel portatif : perceuses, scies sauteuses, meuleuses...

- **Matériel de la classe III** : matériel dans lequel la protection contre les chocs électriques repose sur l'alimentation sous une très basse tension dite de sécurité TBTS (çàd, < 50V) et dans lequel ne sont pas engendrées des tensions supérieures à la TBTS.

Les classes de matériel peuvent être remplacées par les désignations conventionnelles du Tableau 14 figurant sur la plaque signalétique.

| Classes | Indications de la plaque signalétique |
|---------|--|
| 0 | Absence d'indication |
| I | Symbole de mise à la terre |
| II | Symbole double carré sur plaque signalétique ou sur enveloppe isolante |
| III | Valeur de la tension nominale |

Tableau 14 : Désignation conventionnelle des classes de matériel.

▪ Câble électrique

Dans la majorité des cas, la protection des câbles dans les établissements industriels est assurée par isolation.

On a les définitions suivantes :

Conducteur (isolé) : ensemble constitué par une âme conductrice et les différentes couches qui l'entourent et contribuent à son isolation, à sa protection mécanique et à la mise hors de portée de l'âme sous tension.

Les différentes couches qui entourent l'âme sont dénommées dans l'ordre où on les rencontre du centre vers la périphérie : enveloppe, gaine, revêtement.

Un conducteur a au moins une enveloppe et peut avoir plusieurs gaines.

Câble : ensemble comportant un ou plusieurs conducteurs isolés. En général, ce sont les enveloppes des conducteurs qui isolent les âmes conductrices les unes des autres. La (ou les) gaine(s) et les revêtements éventuels maintiennent mécaniquement les conducteurs solidaires les uns des autres.

Des bourrages peuvent combler les vides laissés par la juxtaposition des conducteurs et former une gaine autour de ceux-ci. Deux gaines peuvent être séparées par un revêtement.

Fil (isolé) : terme généralement réservé à la construction électrique de bobinage : par exemple fil émaillé.

Ames (conductrices) : elles sont en cuivre ou en aluminium.

VI-2. Très basse tension

Il existe trois catégories de très basse tension (Tableau 15):

- TBTS (très basse tension de sécurité) ;
- TBTP (très basse tension de protection) ;
- TBTF (très basse tension fonctionnelle).

Les limites de ces TBT dépendent de la nature des locaux ou emplacements (mouillés ou non) et de la nature du courant (alternatif CA ou continu CC).

Pour la protection des personnes, il est impératif que le réseau en très basse tension (TBT) soit parfaitement isolé des réseaux basse tension.

| TBT | Locaux ou emplacements | Tension |
|------|------------------------|---|
| TBTS | Non mouillés | $U \leq 50 \text{ V CA}$ $U \leq 120 \text{ V CC}$ |
| | Mouillés | $U \leq 25 \text{ V CA}$ $U \leq 60 \text{ V CC}$ |
| TBTP | Non mouillés | $25 \text{ V} < U \leq 50 \text{ V CA}$ $60 \text{ V} < U \leq 120 \text{ V CC}$ |
| | | $U \leq 25 \text{ V CA}$ $U \leq 60 \text{ V CC}$ |
| | Mouillés | $12 \text{ V} < U \leq 25 \text{ V CA}$ $30 \text{ V} < U \leq 60 \text{ V CC}$ |
| | | $U \leq 12 \text{ V CA}$ $U \leq 30 \text{ V CC}$ |
| TBTF | Non mouillés | $U \leq 50 \text{ V CA}$ $U \leq 120 \text{ V CC}$ |
| | Mouillés | $U \leq 25 \text{ V CA}$ $U \leq 60 \text{ V CC}$ |

Tableau 15 : Catégories de très basse tension TBT.

VII. Protection contre les contacts indirects

Une installation électrique doit répondre aux attentes des utilisateurs en termes de sécurité et de continuité de service. Le choix d'un schéma de liaison à la terre permet d'assurer la protection des personnes et des biens contre les risques liés aux défauts d'isolement :

- risque de choc électrique, lorsqu'un courant supérieur à 30mA traverse une partie du corps humain, la personne est en danger si le courant n'est pas interrompu dans un temps assez court ;
- risques d'incendie ou d'explosion d'origine électrique dû à un échauffement anormal de l'installation ;
- risque de non-disponibilité de l'énergie suite à des déclenchements intempestifs.

Les coûts de conception, d'installation et d'exploitation ainsi que la sensibilité aux perturbations électromagnétiques est aussi à prendre en compte dans le choix d'un schéma de liaison à la terre.

VII-1. Architecture d'une distribution électrique

▪ Domaine de tension

Les centrales sont reliées au réseau de transport qui couvre des distances importantes sous des tensions de 400 kV ou 220 kV.

A l'échelle des régions, il existe des réseaux de 90, 63 ou 20 kV. Les entreprises ayant une forte consommation sont directement alimentées sous ces tensions. Enfin, le réseau de distribution sous 220/380V alimente les particuliers (voir Figure 10).

Comme présenté dans le Tableau 16, il existe une classification de la tension en différents domaines en fonction des niveaux de tension du réseau électrique ainsi que le type de tension, alternative ou continue.

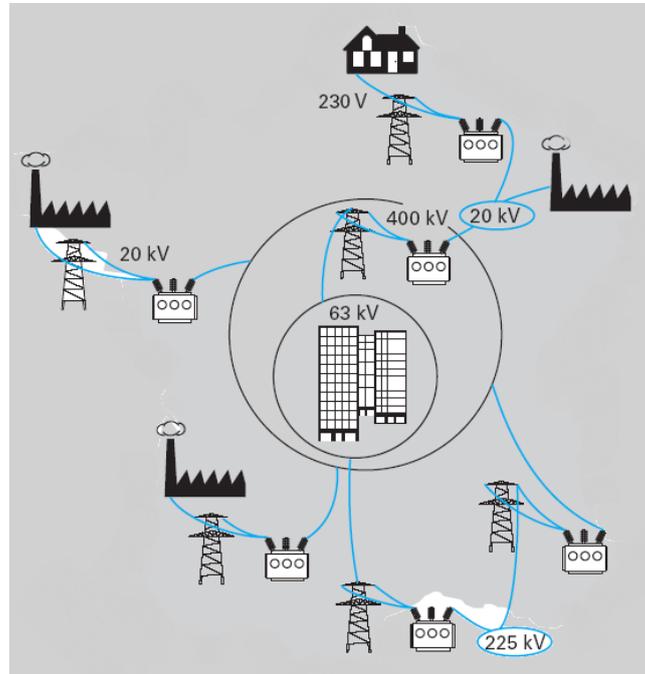


Figure 10 : Répartition de l'énergie électrique

| DOMAINES DE TENSION | COURANT ALTERNATIF | COURANT CONTINU |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TBT | $U \leq 50 \text{ V}$ | $U \leq 120 \text{ V}$ |
| BTA | $50 < U \leq 500 \text{ V}$ | $120 < U \leq 750 \text{ V}$ |
| BTB | $500 < U \leq 1000 \text{ V}$ | $750 < U \leq 1500 \text{ V}$ |
| HTA | $1000 < U \leq 50 \text{ kV}$ | $1500 < U \leq 75 \text{ kV}$ |
| HTB | $U > 50 \text{ kV}$ | $U > 75 \text{ kV}$ |

Tableau 16 : Domaines de tension

- **Distribution radiale arborescente**

Dans une installation basse tension les récepteurs sont reliés au poste de distribution à l'aide de canalisations électriques et d'appareillage. Le point de départ est le tableau général basse

tension (TGBT). Plusieurs départs sortent du TGBT pour alimenter des tableaux divisionnaires. Ce sont des circuits de distribution.

Il peut exister plusieurs niveaux de circuit de distribution, mais en fin d'installation se trouvent les circuits terminaux qui alimentent les récepteurs.

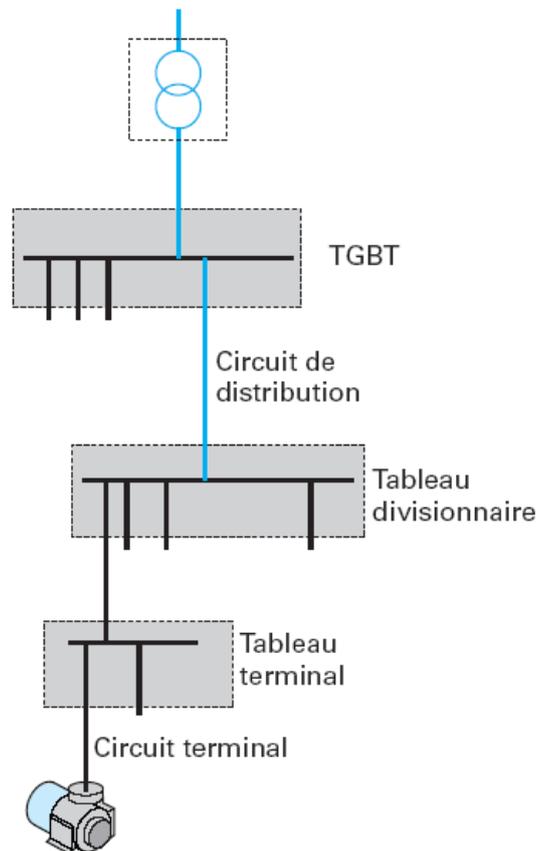


Figure 11 : Schéma type d'une distribution radiale arborescente

- **Continuité de service**

Dans le cas où une coupure de l'alimentation peut avoir des conséquences graves, il est nécessaire de prévoir d'autres sources d'alimentation.

Les « alimentations sans interruption » (ASI) permettent d'alimenter les charges sensibles à partir de batteries et par l'intermédiaire de convertisseurs statiques, sans interruption pendant un temps déterminé. Cette autonomie est un critère de choix important et dépend de la capacité des batteries. Les alimentations sans interruption permettent d'avoir une bonne

qualité de l'énergie sur les charges sensibles en s'affranchissant des perturbations (creux de tension, microcoupures...) qui peuvent apparaître sur le réseau.

Des groupes électrogènes peuvent ensuite prendre le relais pour alimenter les circuits prioritaires.

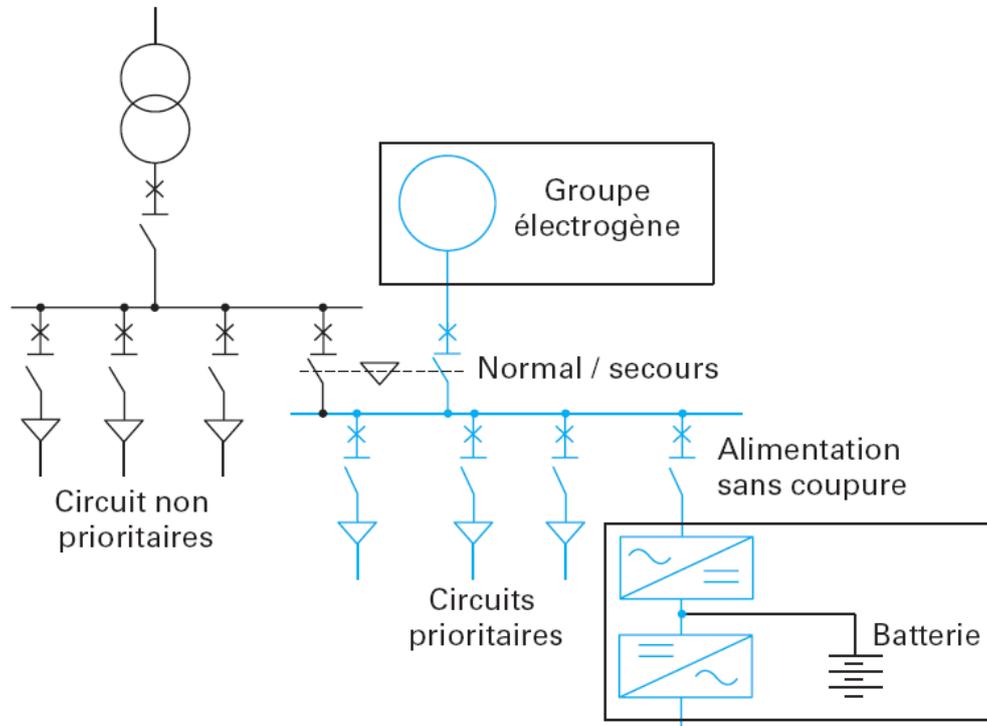


Figure 12 : Alimentation assurant une continuité de service.

▪ Régime monophasé et triphasé

En triphasé, la distribution électrique est définie par deux tensions :

- la première correspond à la tension entre phase et neutre (elle est notée V) ;
- la seconde correspond à la tension entre deux phases (elle est notée U).

Exemple : 220/380 V correspond à 220 V entre phase et neutre et 380 V entre phases.

$$U = \sqrt{3} V$$

Les récepteurs triphasés sont alimentés par les trois phases. Le neutre est parfois nécessaire (nécessité d'une tension référencée au neutre de l'alimentation, déséquilibre entre les phases...).

Les récepteurs monophasés sont alimentés entre phase et neutre ou entre deux phases, suivant la tension du réseau de distribution.

Généralement, la distribution est en 220/380 V et les récepteurs monophasés sont alimentés entre phase et neutre. Pour ne pas déséquilibrer l'installation, ceux-ci sont répartis sur les différentes phases (Figure 13).

Les conducteurs de phases sont repérés **L1**, **L2** et **L3**. Le conducteur neutre est repéré **N**.

Le conducteur de protection qui relie entre elles toutes les masses métalliques est repéré (**PE**); il est de couleur vert/jaune.

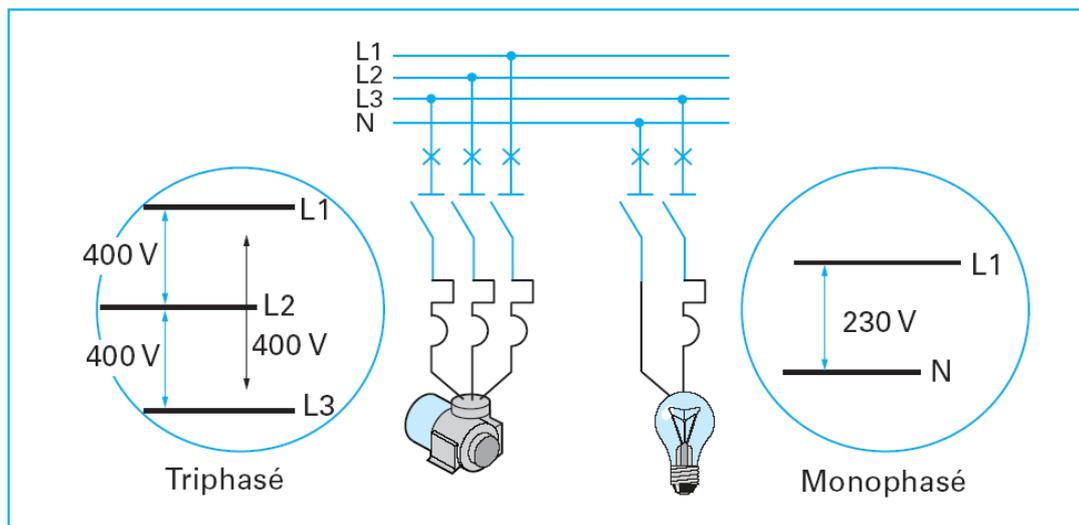


Figure 13 : Monophasé et triphasé

VII-2. Schémas de liaison à la terre

Lors d'un défaut d'isolement, une masse métallique d'un appareil d'utilisation peut entrer en contact avec un conducteur actif (contact indirect).

La tension des masses métalliques par rapport à la terre (tension de contact) dépend de la position du point neutre du transformateur de distribution.

On distingue trois schémas de liaison à la terre SLT (ou régimes du neutre) :

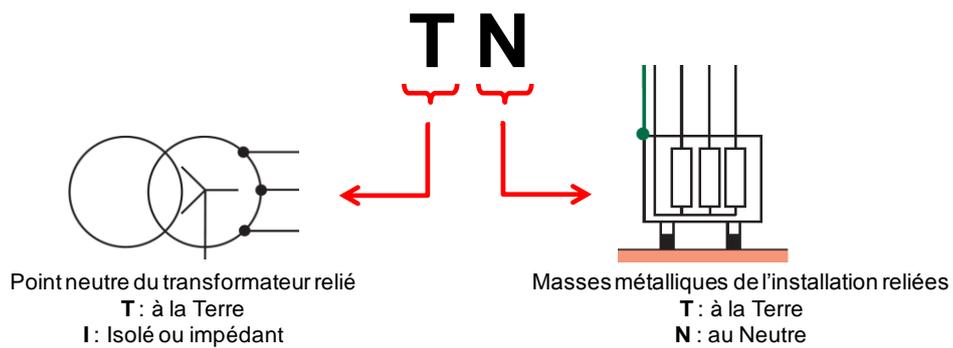
– TT, IT et TN (avec ses deux variantes TN-C et TN-S).

La première lettre caractérise le point neutre du transformateur ou de la source :

- I pour isolé ou impédant ;
- T pour terre.

La deuxième lettre caractérise les masses électriques des récepteurs qui peuvent être reliées :

- à la terre (T) ;
- ou au neutre (N).



Si le neutre est relié à la terre, la tension de défaut est dangereuse et peut être égale au potentiel existant entre une phase et le conducteur neutre (Figure 14).

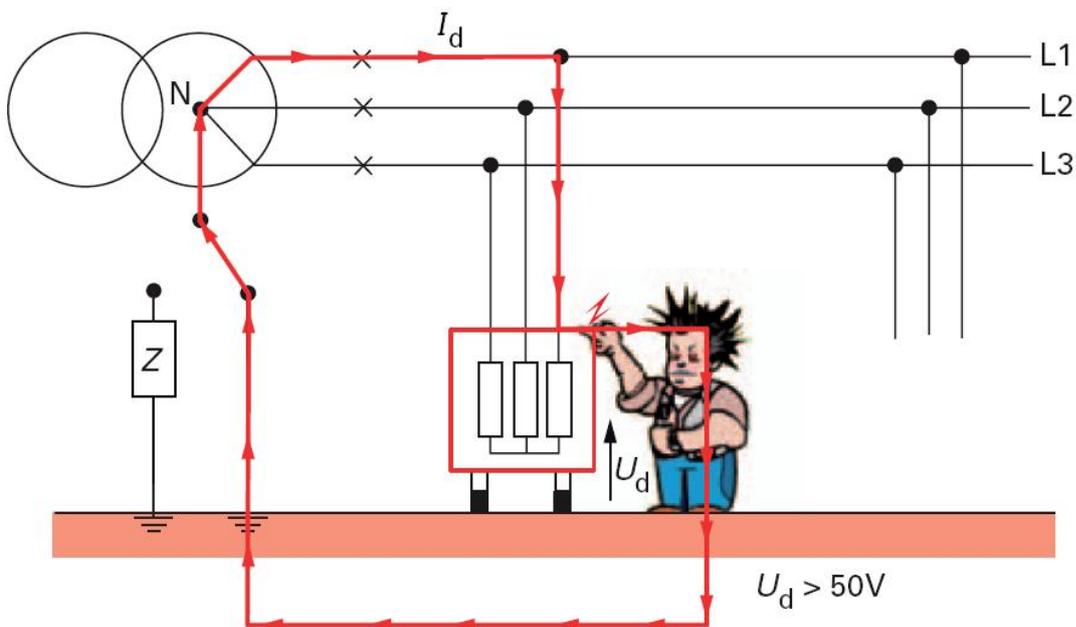


Figure 14 : Schéma de liaison à la terre : neutre relié au neutre

Si le neutre est isolé, l'impédance d'isolation limite le courant de défaut. Il n'y a pas de danger pour les personnes au premier défaut.

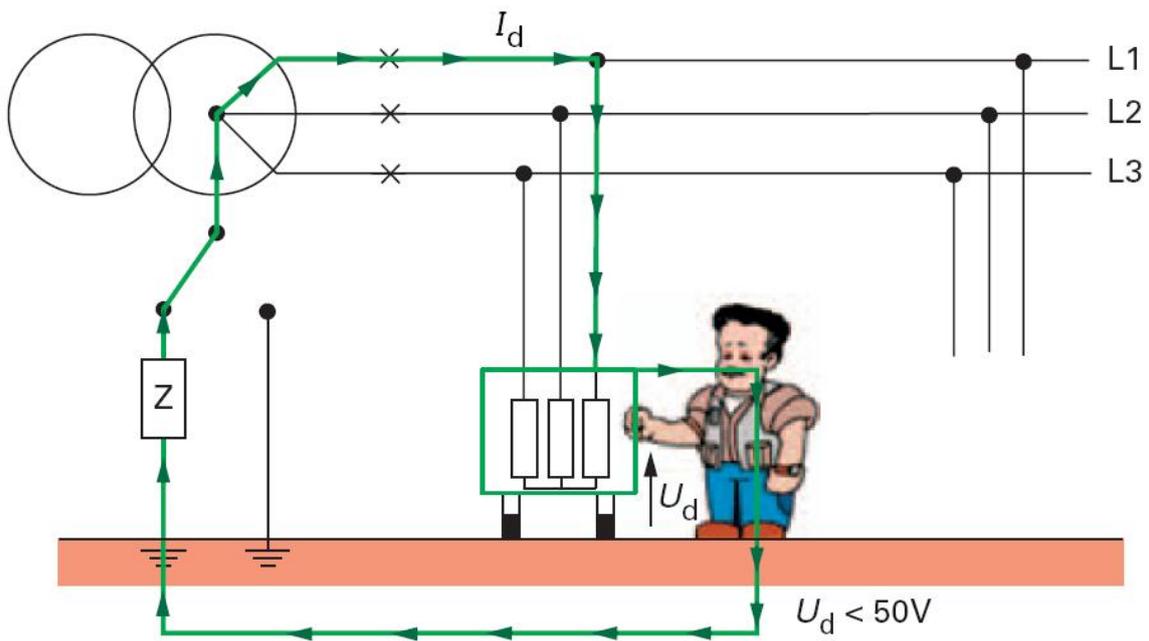


Figure 15 : Schéma de liaison à la terre : neutre isolé

Si un 2^{ème} défaut se produit, la tension de contact peut devenir dangereuse et égale à la tension entre phase.

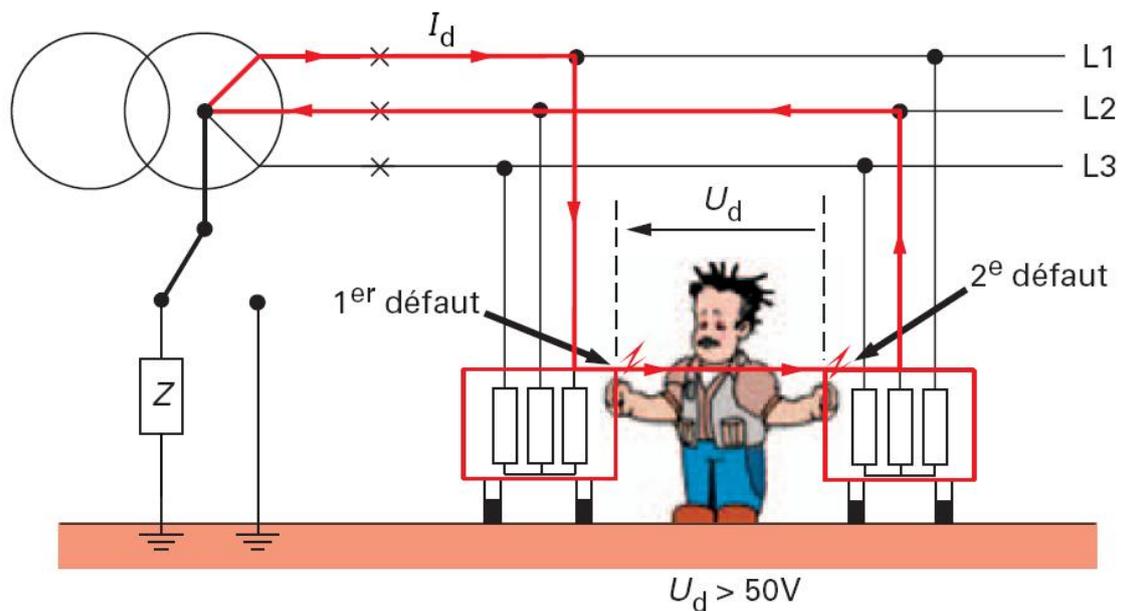


Figure 16 : Schéma de liaison à la terre : neutre isolé – 2^o défaut

Pour éviter ce problème, il est nécessaire de :

- mettre les masses métalliques à la terre
- relier les masses entre elles. C'est le rôle du conducteur de protection PE.

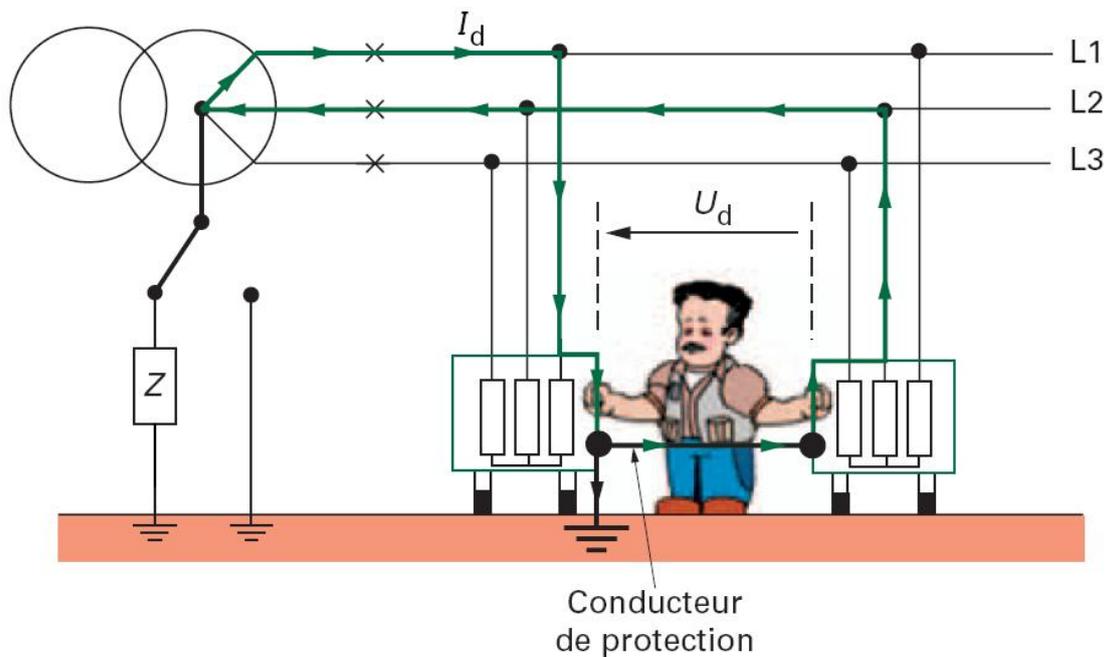


Figure 17 : Rôle du conducteur de protection

Les trois schémas SLT sont présentés dans la Figure 18. Ils servent à protéger les personnes et les biens contre les défauts d'isolement. Ils offrent la même efficacité en ce qui concerne la sécurité des personnes mais diffèrent en terme de disponibilité de l'énergie et de maintenance.

Les schémas ont une importance majeure dans la détermination des conditions de protection contre les contacts indirects, basées sur la mise à la terre des masses associée à un dispositif automatique de coupure.

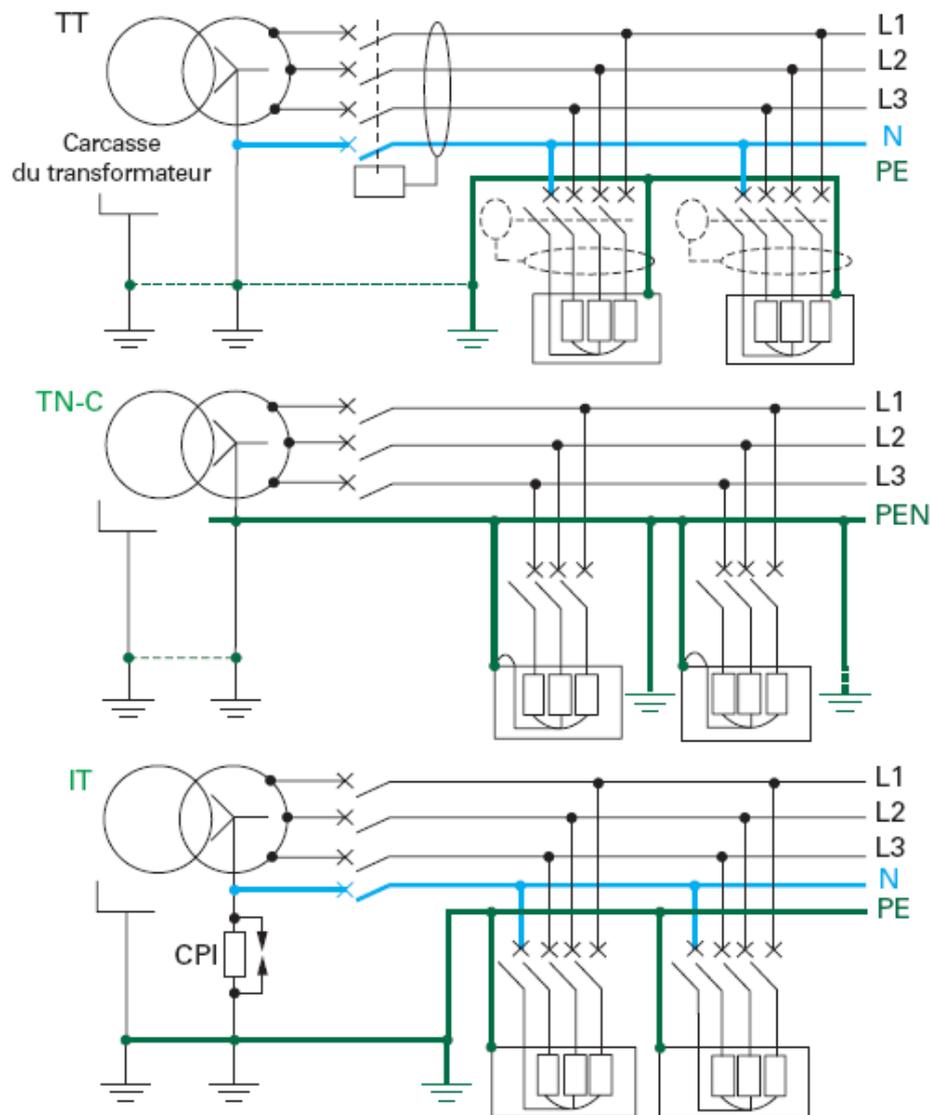


Figure 18 : Différents types de liaison à la terre

▪ Schéma TT

Dans un schéma des liaisons à la terre de type TT, le neutre du transformateur est relié à la terre. C'est le cas de la distribution publique, donc de toutes les installations qui ne possèdent pas leur propre transformateur. Ce régime se rencontre dans les cas suivants : domestique, petit tertiaire, petits ateliers, établissements scolaires avec salles de travaux pratiques, etc.

Le premier défaut d'isolement peut entraîner l'apparition d'une tension dangereuse sur les masses métalliques. Il doit obligatoirement provoquer la coupure de l'installation. C'est le rôle du disjoncteur différentiel qui détecte les fuites de courant à la terre. Sa sensibilité doit

faire en sorte que la tension de défaut n'excède jamais 50V (en milieu sec ou 25V en milieu humide). Cette tension est donc liée à l'impédance R_u de la prise de terre (Figure 19).

On doit avoir :

$$\Delta I_n \leq 50 / R_u$$

avec R_u : résistance de la prise de terre de l'installation utilisatrice,

R_n : résistance de la prise de terre du poste de distribution (3 à 5Ω),

ΔI_n (A) : sensibilité du différentiel.

Dès que la tension de défaut U_d dépasse 50 V, le dispositif différentiel doit ouvrir le circuit.

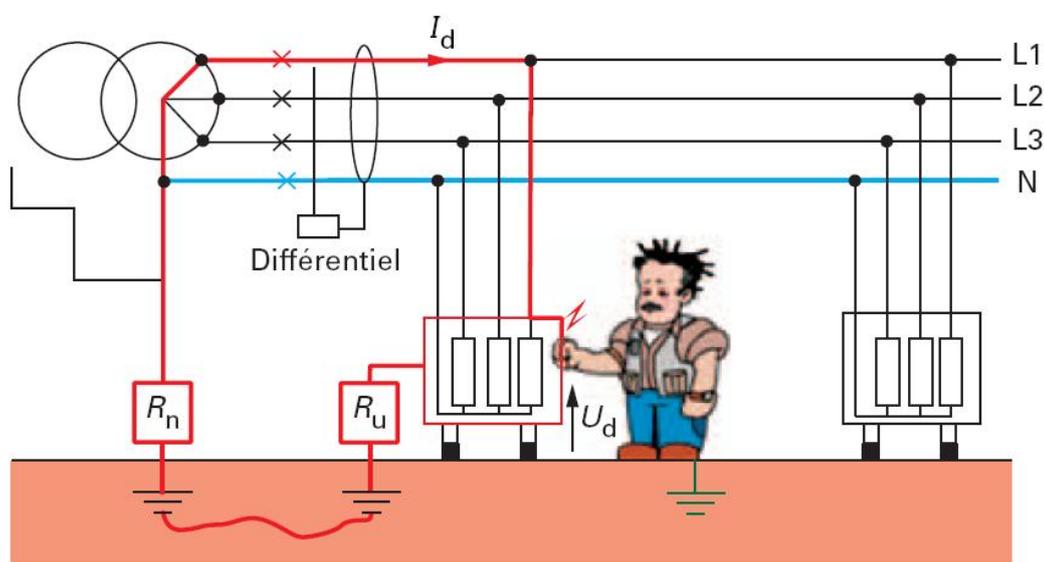


Figure 19 : Schéma type TT

▪ Schéma TN

Ce principe de distribution est adapté à toute installation admettant une coupure au premier défaut (installations tertiaires ou industrielles). Sur ces schémas (Figure 20), les masses métalliques des appareils d'utilisation sont reliées au neutre du transformateur. Il existe deux types de schéma TN :

- le TN-C dans lequel le conducteur de neutre et celui de protection sont confondus (PEN) ;
- le TN-S dans lequel le conducteur de neutre (N) et le conducteur de protection (PE) sont séparés.

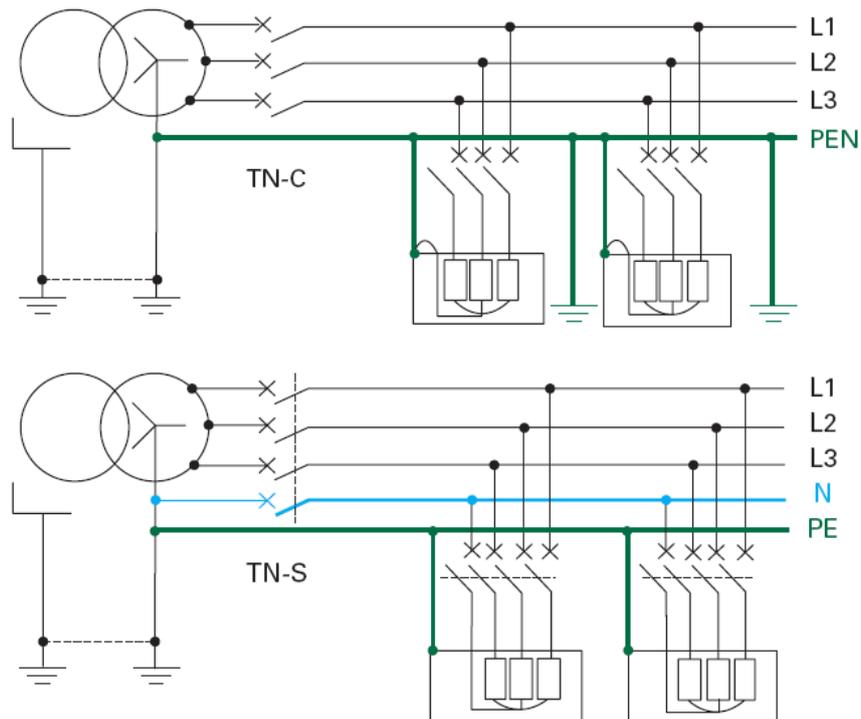


Figure 20 : Schéma type TN avec ses deux variantes TN-C et TN-S

Le premier défaut d'isolement sur une phase produit un court-circuit entre phase et neutre (Figure 21). Il entraîne aussi généralement l'apparition d'une tension dangereuse sur les masses métalliques.

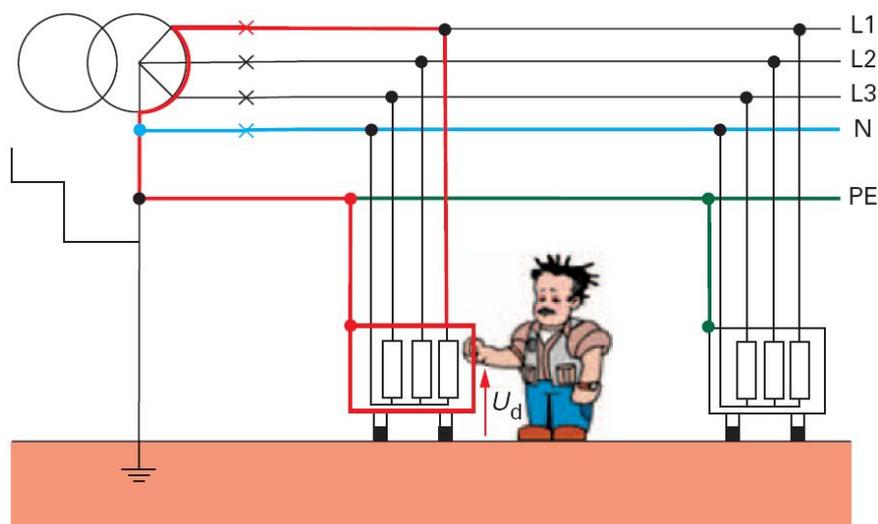


Figure 21 : Cas d'un défaut d'isolement dans un schéma type TN-S

La coupure est assurée par le dispositif de protection contre les courts-circuits, à savoir le disjoncteur associé à son déclencheur magnétique ou les fusibles. Le seuil de déclenchement

(I_m) doit être inférieur au courant de court-circuit engendré par le défaut. Celui-ci dépend essentiellement de l'impédance des câbles. Toute modification de l'installation (déplacement d'une machine, allongement des câbles...) peut entraîner la suppression de la protection des personnes.

De plus, la continuité du conducteur PEN (ou PE) conditionne la sécurité. Il ne doit jamais être coupé.

▪ Schéma IT

Ce régime de neutre est utilisé lorsque la coupure au premier défaut d'isolement est préjudiciable au bon fonctionnement d'une exploitation ou à la sécurité des personnes. On le rencontre dans les hôpitaux (salles d'opération) ou dans les circuits de sécurité (éclairage) et dans les industries où la continuité de service est primordiale.

Son exploitation impose la présence de personnel compétent sur le site pour intervenir rapidement lors de l'apparition du premier défaut d'isolement afin de garantir la continuité de service avant que ne se développe un éventuel deuxième défaut qui lui, provoquerait une coupure.

Un limiteur de tension est obligatoire pour permettre l'écoulement des surtensions à la terre provenant de l'installation HT (claquage transformateur HT/BT, surtension de manœuvres, foudre, ...).

Le premier défaut d'isolement n'est pas dangereux et ne nécessite pas une coupure immédiate (Figure 22). Par contre, il doit être signalé par un contrôleur permanent d'isolement (CPI) puis éliminé. Le second défaut produit un court-circuit entre phases ou entre phase et neutre.

Une tension dangereuse apparaît sur les masses métalliques, l'installation doit être coupée

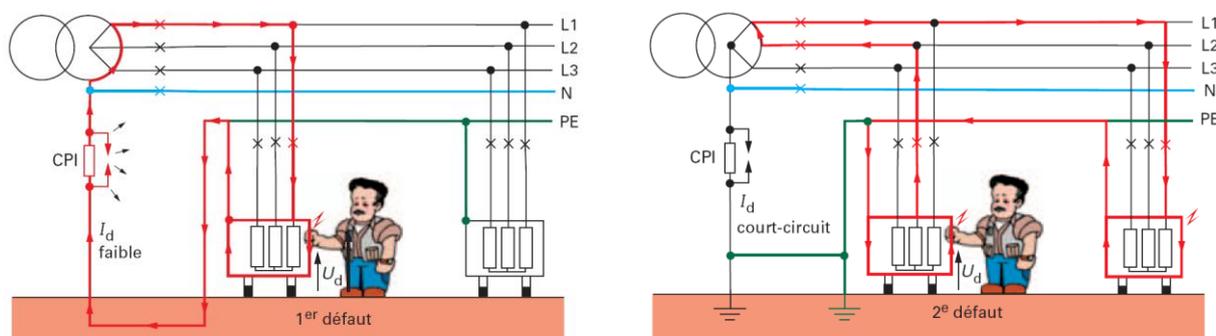


Figure 22 : Défaut d'isolement dans un schéma type IT.

Annexes

- **CEI/TS 60479-1** : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques –
Partie 1 : Aspects généraux (2005)

– 60 –

TS 60479-1 © CEI:2005

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| AVANT-PROPOS..... | 64 |
| INTRODUCTION..... | 67 |
| 1 Domaine d'application et objet..... | 69 |
| 2 Références normatives..... | 70 |
| 3 Définitions..... | 70 |
| 3.1 Définitions générales..... | 70 |
| 3.2 Effets du courant alternatif dans la gamme de fréquences de 15 Hz à 100 Hz..... | 71 |
| 3.3 Effets du courant continu..... | 72 |
| 4 Impédances électriques du corps humain..... | 72 |
| 4.1 Impédance interne du corps humain (Z_i)..... | 72 |
| 4.2 Impédance de la peau (Z_s)..... | 73 |
| 4.3 Impédance totale du corps humain (Z_T)..... | 73 |
| 4.4 Facteurs affectant la résistance initiale du corps humain (R_o)..... | 73 |
| 4.5 Valeurs de l'impédance totale du corps humain (Z_T)..... | 73 |
| 4.6 Valeur de la résistance initiale du corps humain (R_o)..... | 81 |
| 5 Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 15 Hz et 100 Hz..... | 81 |
| 5.1 Seuil de perception..... | 81 |
| 5.2 Seuil de réaction..... | 81 |
| 5.3 Immobilisation..... | 81 |
| 5.4 Seuil de non-lâcher..... | 81 |
| 5.5 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 82 |
| 5.6 Autres effets du courant liés aux chocs électriques..... | 82 |
| 5.7 Effets du courant sur la peau..... | 83 |
| 5.8 Descriptions des zones temps/courant (voir Figure 20)..... | 84 |
| 5.9 Application du facteur de courant de cœur (F)..... | 84 |
| 6 Effets du courant continu..... | 85 |
| 6.1 Seuil de perception et seuil de réaction..... | 85 |
| 6.2 Seuil d'immobilisation et seuil de non-lâcher..... | 85 |
| 6.3 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 85 |
| 6.4 Autres effets du courant..... | 86 |
| 6.5 Descriptions des zones temps/courant (voir Figure 22)..... | 87 |
| 6.6 Facteur de cœur..... | 87 |
| Annexes..... | 106 |
| Annexe A (normative) Mesures de l'impédance totale du corps humain Z_T effectuées sur des personnes vivantes et sur des cadavres et analyse statistique des résultats..... | 107 |
| Annexe B (normative) Influence de la fréquence sur l'impédance totale du corps humain (Z_T)..... | 110 |
| Annexe C (normative) Résistance totale du corps (R_T) en courant continu..... | 111 |
| Annexe D (informative) Exemples de calcul de Z_T | 112 |
| Bibliographie..... | 116 |

Prix de la publication : 203€

- **CEI/TS 60479-2** : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques - Partie2 : Aspects particuliers (2007)

| | |
|--|----|
| AVANT-PROPOS..... | 45 |
| 1 Domaine d'application | 47 |
| 2 Références normatives..... | 47 |
| 3 Termes et définitions | 48 |
| 4 Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz..... | 49 |
| 4.1 Généralités..... | 50 |
| 4.2 Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 100 Hz et 1 000 Hz inclus | 50 |
| 4.2.1 Seuil de perception..... | 50 |
| 4.2.2 Seuil de non-lâcher | 51 |
| 4.2.3 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 51 |
| 4.3 Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 1 000 Hz et 10 000 Hz inclus..... | 52 |
| 4.3.1 Seuil de perception..... | 52 |
| 4.3.2 Seuil de non-lâcher | 52 |
| 4.3.3 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 52 |
| 4.4 Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 10 000 Hz..... | 53 |
| 4.4.1 Seuil de perception..... | 53 |
| 4.4.2 Seuil de non-lâcher | 53 |
| 4.4.3 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 53 |
| 4.4.4 Autres effets..... | 53 |
| 5 Effets des courants de formes d'onde spéciales | 53 |
| 5.1 Généralités..... | 53 |
| 5.2 Amplitude équivalente, fréquence et seuil | 53 |
| 5.3 Effets du courant alternatif avec composante continue | 54 |
| 5.3.1 Formes d'onde, fréquences et seuils en courant..... | 54 |
| 5.3.2 Seuil de réaction | 55 |
| 5.3.3 Seuil de non-lâcher | 55 |
| 5.3.4 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 56 |
| 6 Effets du courant alternatif avec contrôle de l'angle de phase | 60 |
| 6.1 Formes d'onde, fréquences et seuils de courant..... | 60 |
| 6.2 Seuil de perception et de non-lâcher | 61 |
| 6.3 Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 62 |
| 6.3.1 Commande symétrique..... | 62 |
| 6.3.2 Commande asymétrique | 62 |
| 7 Effets du courant avec commande synchrone par trains d'alternance | 62 |
| 7.1 Formes d'onde et fréquences | 62 |
| 7.2 Seuils de perception et seuil de non-lâcher | 63 |
| 7.3 Seuils de fibrillation ventriculaire..... | 63 |
| 7.3.1 Généralités..... | 63 |
| 7.3.2 Durées de choc plus longues que 1,5 fois la durée du cycle cardiaque | 23 |
| 7.3.3 Durées de choc inférieures à 0,75 fois la durée du cycle cardiaque | 23 |
| 8 Estimation du seuil de courant équivalent pour des fréquences multiples | 64 |
| 8.1 Seuil de perception et de non-lâcher | 64 |

| | | |
|--------|--|----|
| 8.2 | Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 64 |
| 9 | Les effets d'impulsions répétées (train d'ondes) de courant sur le seuil de fibrillation ventriculaire | 65 |
| 9.1 | Seuil de fibrillation ventriculaire d'un train d'ondes de courant séparées par 1 seconde ou plus | 65 |
| 9.2 | Seuil de fibrillation ventriculaire d'un train d'onde de courant séparées par moins d'une seconde..... | 65 |
| 9.2.1 | Généralités..... | 65 |
| 9.2.2 | Exemple 1 | 66 |
| 9.2.3 | Exemple 2 | 68 |
| 10 | Effets du courant électrique au travers d'un corps humain immergé | 68 |
| 10.1 | Généralités..... | 68 |
| 10.2 | Résistivité des solutions aqueuses et du corps humain | 68 |
| 10.3 | Courants conduits au travers d'un corps immergé | 70 |
| 10.4 | Effets physiologiques du courant au travers d'un corps immergé | 70 |
| 10.5 | Valeurs de seuil de courant | 71 |
| 10.6 | Valeurs de tensions de sécurité intrinsèques..... | 72 |
| 11 | Effets des courants d'impulsion unique de courte durée | 72 |
| 11.1 | Généralités..... | 72 |
| 11.2 | Effets des courants d'impulsion unidirectionnelle de courte durée | 72 |
| 11.2.1 | Formes d'onde | 72 |
| 11.2.2 | Evaluation de l'énergie spécifique de fibrillation F_e | 73 |
| 11.3 | Seuil de perception et seuil de douleur de décharges de condensateurs | 74 |
| 11.4 | Seuil de fibrillation ventriculaire..... | 75 |
| 11.4.1 | Généralités..... | 75 |
| 11.4.2 | Exemples | 76 |
| | Bibliographie..... | 79 |

Prix de la publication : 170€

- **CEI/TS 60479-3** : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques -
Partie3 : Effets du courant passant par le corps d'animaux domestiques (2000)

▪

| | |
|---|----|
| AVANT-PROPOS | 4 |
| INTRODUCTION | 8 |
| Articles | |
| 1 Généralités | 10 |
| 1.1 Domaine d'application | 10 |
| 1.2 Remarques générales | 10 |
| 1.3 Références normatives | 12 |
| 1.4 Définitions | 12 |
| 2 Caractéristiques de l'impédance électrique du corps des animaux domestiques | 14 |
| 2.1 Impédance interne des animaux (Z_i) | 16 |
| 2.2 Impédance du cuir et de la peau (Z_p) | 16 |
| 2.3 Impédance (résistance) du sabot (Z_h, R_h) | 16 |
| 2.4 Impédance totale du corps (Z_T) | 18 |
| 2.5 Résistance initiale du corps (R_o) | 18 |
| 3 Valeurs de l'impédance totale du corps (Z_T) | 18 |
| 4 Valeurs de la résistance initiale du corps (R_o) | 20 |
| 5 Effets du courant alternatif sinusoïdal sur les animaux domestiques, pour des fréquences comprises entre 15 Hz et 100 Hz | 22 |
| 5.1 Seuil de réaction | 22 |
| 5.2 Seuil d'immobilisation | 22 |
| 5.3 Seuil de fibrillation ventriculaire | 22 |
| <u>Bibliographie</u> | 28 |

Prix de la publication : 48€

- **CEI/TR 60479-4** : Effets du courant passant par le corps d'animaux domestiques –
Partie4 : Effets de la foudre (2011)

-

| | |
|--|----|
| AVANT-PROPOS | 23 |
| INTRODUCTION | 25 |
| 1 Domaine d'application et objet | 26 |
| 2 Références normatives | 26 |
| 3 Termes et définitions | 26 |
| 4 Phénomène physique de la foudre | 29 |
| 5 Interaction entre les coups de foudre et les personnes ou les animaux domestiques | 30 |
| 5.1 Généralités | 30 |
| 5.2 Description d'un coup de foudre direct | 30 |
| 5.3 Description de la tension de toucher | 31 |
| 5.4 Description de l'éclair latéral | 32 |
| 5.5 Description de la tension de pas | 33 |
| 5.6 Description du choc de décharge "dard" | 35 |
| 5.7 Description de l'amorçage | 36 |
| 6 Effets des coups de foudre sur les êtres humains et les animaux domestiques | 36 |
| 6.1 Généralités | 36 |
| 6.2 Effets physiologiques | 37 |
| 6.3 Effets pathophysiologiques | 37 |
| 6.4 Effets thermiques | 37 |
| 6.5 Comparaison entre les effets des chocs électriques issus des réseaux électriques et de la foudre | 37 |
| 6.6 Pourcentages d'occurrences | 37 |
| Bibliographie | 41 |

Prix de la publication : 105€

- **CEI/TR 60479-5** : Effets du courant passant par le corps d'animaux domestiques –
Partie 5 : Valeurs des seuils de tension de contact pour les effets physiologiques (2007)

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| AVANT-PROPOS | 61 |
| INTRODUCTION | 63 |
| 1 Domaine d'application | 64 |
| 2 Références normatives | 64 |
| 3 Termes et définitions | 65 |
| 4 Conditions et valeurs de seuils | 66 |
| 4.1 Généralités | 66 |
| 4.2 Effets physiologiques du courant de contact | 66 |
| 4.3 Impédance du corps | 70 |
| 4.4 Impédances externes au corps | 71 |
| 4.5 Autres facteurs pouvant affecter les seuils de tension | 71 |
| 4.6 Seuils de tension de contact en fonction de la durée | 72 |
| 4.7 Seuils de tension de contact pour de longues durées | 73 |
| 5 Seuils de tension de contact – Présentation des courbes tension-temps | 75 |
| Annexe A (informative) Impédance du corps humain | 86 |
| Annexe B (informative) Tension de contact – Explication de la méthode de calcul des seuils de tension de contact pour la réaction de tressaillement, les forts effets musculaires et la fibrillation ventriculaire à partir des tableaux d'impédances et des limites de courant de la CEI/TS 60479-1 | 92 |
| Annexe C (informative) Détermination des seuils de tension dans certaines conditions | 109 |
| Annexe D (informative) Limite d'utilisation | 111 |
| Bibliography | 113 |

Prix de la publication : 203€

Bibliographie

- [1] « Prévention des accidents électriques », R. Auber, C. Atlani, Techniques de l'ingénieur, D5100, 1996
- [2] « Prévention des accidents électriques – Présentation générale », C. Atlani, D. Serre, Techniques de l'ingénieur, D5101, 2012
- [3] « Prévention des accidents électriques – Mesures de protection », C. Atlani, D. Serre, Techniques de l'ingénieur, D5102, 2012
- [4] « Prévention des accidents électriques - Exploitation », C. Atlani, D. Serre, Techniques de l'ingénieur, D5103, 2012
- [5] « Sécurité électrique – le risque électrique dans les laboratoires », D. Hilaire, JL. Poyard, Techniques de l'ingénieur, SL6180, 2008
- [6] « Sécurité électrique – Protection des personnes », D. Hilaire, JL. Poyard, Techniques de l'ingénieur, SL6181, 2009
- [7] « Appareils de contrôle de la sécurité électrique », A. Leconte, Techniques de l'ingénieur, R1040, 2004
- [8] « Le sécurité électrique et les mesures associées », A.Kohler, C. Le Goué, présentation Chauvin Arnoux
- [9] « Distribution basse tension », Cahier technique Socomec.