

Jacques Marie Broust

APPAREILLAGES ET INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES INDUSTRIELS

**Conception • Coordination
Mise en œuvre • Maintenance**

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Consultez nos parutions sur dunod.com



Conseiller éditorial : **Éric Félice**

Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville-Sanders

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2008
ISBN 978-2-10-051247-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

XI

A

Généralités

1 • La normalisation	3
1.1 Domaines domestiques et industriels	3
1.2 Importance des informations liées aux matériels	4
1.3 Le marché européen	5
1.4 Les responsabilités devant la loi	5
1.5 Terminologie	6
1.6 À quoi sert une norme ?	6
1.7 Organisation des normes en électrotechnique	7
1.8 Les normes en électrotechnique	11
1.9 Marques et labels	12
2 • Éléments de technologie	13
2.1 Processus de coupure et disjoncteurs	13
2.2 Fonctionnement des fusibles	25
2.3 Déclencheurs et relais thermiques à bilames	26
2.4 Contacteurs	32

B

Fonctions de base des appareillages électriques

3 • Fonctions de protection	47
3.1 Sectionnement	47
3.2 Protection contre les courts-circuits	59
3.3 Pouvoirs de coupure	71
3.4 Protection contre les surcharges	77
3.5 Protection des personnes	84
3.6 Protection contre les surtensions	94
4 • Fonctions de commande	111
4.1 Interrupteurs	112
4.2 Contacteurs	121
4.3 Démarreurs de moteurs	121
4.4 Fonctions de commande de sécurité	132
4.5 Différents types d'arrêt	134
4.6 Auxiliaires de commande	134
5 • Fonctions d'information	141
5.1 Sens de manœuvre des organes de commande	141
5.2 Couleur des boutons poussoirs	142
5.3 Couleur des voyants lumineux	142
5.4 Panneaux de commandes électroniques	143
5.5 Mesures	143
5.6 Contrôleurs permanents d'isolement	147
6 • Coordination des fonctions	153
6.1 Coordination de protection	153
6.2 Coordination d'isolement	158
6.3 Coordination entre disjoncteurs	160
6.4 Influence de la température environnante	164

C

Ouvrages électriques Étude, conception et maintenance

7 • Installations électriques industrielles	169
7.1 Domaines de tensions	169
7.2 Quelques configurations typiques de distribution électrique	170
8 • Schémas de liaison à la terre (SLT)	177
8.1 Origine des régimes du neutre (schémas de liaison à la terre)	177
8.2 Principe des schémas de liaison à la terre (SLT)	180
8.3 Schéma TN dit « mise au neutre »	181
8.4 Schéma TT dit « neutre à la terre »	189
8.5 Schéma IT dit « neutre isolé »	190
8.6 Choix du SLT	194
8.7 Schéma IT dans les salles d'opération	194
8.8 Schéma IT pour les circuits de sécurité dans les établissements recevant du public (ERP)	195
8.9 Mise à la terre des postes de transformation	196
9 • Conducteurs PE, LE et TE	199
9.1 Utilité des mises à la terre	199
9.2 Différentes liaisons équipotentielles	201
10 • Calculs des installations	207
10.1 Objectifs des calculs	207
10.2 Calcul de la section des conducteurs	207
10.3 Chutes de tension	212
10.4 Section du conducteur neutre	213
10.5 Section du conducteur de protection	214
10.6 Calculs des courants de courts-circuits	215
10.7 Courant de crête	218
10.8 Réglage des déclencheurs sous courts-circuits	220
11 • Calcul des échauffements dans les armoires électriques	223
11.1 Principe	223
11.2 Calcul de la surface effective de refroidissement	223

11.3	Calcul de la température à mi-hauteur	224
11.4	Calcul de la température en haut de l'armoire	225
11.5	Influence des ouvertures de ventilation	226
11.6	Calcul de la dissipation calorifique à l'intérieur d'une armoire	229
11.7	Exemple de tableau de dissipation	231
11.8	Exemple d'application	233
11.9	Températures maximales admissibles	234
12	• Ensembles d'appareillage à basse tension	235
12.1	Enveloppes	236
12.2	Différents types de tableaux	242
12.3	Formes de séparation	255
12.4	Indices de service	256
12.5	Différentes parties des armoires et tableaux	260
12.6	Essais des ensembles et certification de conformité CE	270
12.7	Canalisations préfabriquées	274
13	• Câblage des ensembles d'appareillage	285
13.1	Séparation des domaines	285
13.2	Conducteurs de « mise à la terre »	286
13.3	Cohabitations courants faibles et courants forts	291
13.4	Techniques de maintien des fils (goulottes, torons, peignes)	293
13.5	Connexion des barres entre elles	294
14	• Maintenance des tableaux et de l'appareillage	295
14.1	Principes généraux	295
14.2	Principe du carnet de bord	295
14.3	Observations et mesures	296
14.4	Contrôle des températures	297
14.5	Contrôle du serrage des connexions	298
14.6	Surveillance et maintenance de l'appareillage	300
14.7	Évaluation de l'état des tableaux : profEL [®]	305
	Conclusion • Évolution de l'électrotechnique	309

Annexes

A • Aide-mémoire	315
A.1 Définitions relatives aux courants	315
A.2 Définitions relatives aux fonctions des appareils	318
A.3 Définitions relatives à la protection des personnes	319
A.4 Parafoudres	320
B • Critères de sélection	323
B.1 Interrupteur-sectionneur	323
B.2 Contacteurs et démarreurs	324
B.3 Disjoncteurs	324
B.4 Jeux de barres	325
B.5 Enveloppes et tableaux	325
B.6 Canalisations préfabriquées	326
Bibliographie	329
Index	331

Depuis maintenant plus de dix ans, les métiers de l'industrie sont liés au respect d'un *plan d'assurance qualité* qu'ils se sont fixé. Celui-ci impose, en particulier, aux acheteurs et aux prescripteurs, d'être capables de justifier techniquement leurs demandes d'investissement et de les décrire de façon précise et compréhensible sans ambiguïté. Ils doivent savoir les exprimer avec justesse, sans risque de mauvaises interprétations, dans leurs appels d'offres. En retour, les fournisseurs doivent pouvoir justifier la juste réponse aux besoins clairement exprimés.

Les prescripteurs expriment en général leurs demandes par un cahier des charges.

Les fabricants et prestataires de service expriment leurs réponses aux moyens de devis ou de catalogues documentés par des descriptions et caractéristiques.

L'accord entre client et fournisseur s'exprime par une *revue de contrat*. Celle-ci a pour objectif de vérifier si les demandes ont toutes été prises en compte, si les solutions répondent à ces demandes et si les moyens mis en place permettent leur réalisation dans les délais et conditions exigées.

Dans le cas de vente sur catalogue, celui-ci, ainsi que les conditions de ventes doivent être suffisamment précis pour représenter à eux seuls cette revue de contrat.

C'est dans ce contexte que cet ouvrage traite des *appareillages et installations électriques industriels*. Son but est de proposer au lecteur des références sur lesquelles il pourra s'appuyer pour définir au plus juste les conditions d'exploitation d'une installation électrique, de sa protection et de son entretien.

■ À quel public l'ouvrage s'adresse-t-il ?

Le document s'adresse d'abord à tout électricien ayant acquis les connaissances de base en matière d'électricité générale ainsi que de bonnes notions d'électrotechnique.

Il s'adresse également à tous métiers en relation avec la conception, la construction et l'entretien des « ouvrages électriques » à vocation industrielle ou grand tertiaire.

Il ne s'adresse donc pas particulièrement aux artisans ni aux particuliers en vue de réaliser ou modifier une installation domestique.

Ce livre a pour but de permettre à tout électricien d'analyser et de définir clairement et avec une terminologie exacte, les besoins en matière de protection, de commande et d'information, relatifs à une installation électrique.

Les besoins étant clairement exprimés, en retour, les caractéristiques des produits peuvent être judicieusement présentées et comparées.

Ce document de référence s'adresse donc :

- aux formateurs et aux étudiants qui cherchent à la fois une vue d'ensemble et des informations précises sur le rôle de l'appareillage électrique, la conception et le calcul des ouvrages électriques : installations et tableaux ;
- aux prescripteurs électriciens cherchant à rédiger un cahier des charges ;
- aux bureaux d'études et acheteurs cherchant à apporter une juste réponse aux cahiers des charges ;
- aux responsables de produits, afin de décrire, de façon la plus exacte, les applications de leurs produits et mettre en valeur leurs caractéristiques ;
- aux chargés de support produits, afin d'apporter des réponses précises et documentées aux questions qui leur sont posées ;
- aux services de maintenance cherchant les bases sur lesquelles ils peuvent fonder leurs procédures et leurs analyses ;
- aux vérificateurs et experts cherchant à contrôler quelques points précis et avoir rapidement accès aux documents officiels auxquels il est fait abondamment référence.

■ Limites de l'ouvrage

Ce livre a un rôle essentiellement explicatif, en aucun cas il prétend se substituer aux normes qui, seules, peuvent être utilisées professionnellement et juridiquement.

Si la référence aux normes est abondamment annoncée, cela ne peut qu'encourager le lecteur à s'y reporter sans perte de temps décourageante.

■ Organisation

Cet ouvrage cherche à offrir au lecteur des bases de références précises afin de le guider pour la meilleure compréhension des technologies décrites. Les règlements et normes sont exposés de façon à ce qu'ils soient compris comme des outils de travail facilitant la compréhension et la résolution des problèmes techniques.

L'auteur s'est particulièrement attaché à mettre en évidence les règles et caractéristiques qui font l'objet de documents précis dont il fait référence. Mais il révèle aussi celles qui se rapportent à des notions anciennes, voire infondées, basées sur l'habitude et une certaine mémoire collective. Certaines caractéristiques ou prescriptions applicables dans le passé, n'ont plus cours en vertu de nouveaux accords internationaux. L'auteur explique parfois l'historique de ces évolutions afin de donner au lecteur le maximum d'éléments pour construire son point de vue face aux tenants de ces concepts dépassés.

Parfois l'auteur met en évidence certaines contradictions, imprécisions ou illogismes persistants dans la normalisation. Le but recherché est de donner au lecteur des références afin qu'il puisse fonder ses décisions et argumentations sur la raison, en fustigeant celles qui sont trop souvent fondées sur l'habitude.

Après une présentation des fondements de la normalisation, une première partie s'attache à expliquer les principaux éléments de technologie que l'appareillage électrique utilise. Les principes de ceux-ci sont souvent anciens, seules les technologies d'applications évoluent.

Dans une seconde partie les fonctions élémentaires de l'appareillage électrique sont expliquées. Leurs buts et les caractéristiques proposées par leurs normes respectives sont exposés.

Dans une troisième partie les ouvrages électriques (installations et tableaux électriques) sont traités dans le but de connaître leur structure, leurs modes d'étude et de calculs, ainsi que leur maintenance. Cette partie présente même une modalité d'analyse des installations et tableaux anciens en vue d'en évaluer le risque.

Chacune de ces parties fait parfois référence à des notions exposées de façon plus précise dans une autre partie. Afin que ces renvois ne soient pas trop gênants pour le lecteur, certaines notions sont quelquefois répétées.

A

Généralités

L'objectif de cet ouvrage est d'expliquer les fonctionnalités des appareillages électriques, l'étude des systèmes électriques et leur maintenance. Cette démarche ne peut être envisagée que si certaines notions préliminaires ont été comprises.

Il est tout d'abord indispensable de définir les domaines d'utilisation des matériels expliqués, en particulier les domaines domestiques et industriels.

Les matériels et systèmes électriques sont régis par de nombreuses réglementations et normes. Celles-ci définissent leur conception et leurs champs d'application afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens et la sûreté de leur fonctionnement. Les normes se présentent aussi comme des outils de travail, facilitant les échanges commerciaux entre utilisateurs et constructeurs de différents pays, grâce à une terminologie et des caractéristiques harmonisées.

Cette partie explique dans un premier chapitre les fondements et l'organisation de la rédaction des normes.

Les appareillages électriques font appel à des technologies souvent mal connues, mais pourtant anciennes. Les techniques de coupure d'arcs électriques, celles de la commande des contacteurs, la théorie des bilames ou le fonctionnement des fusibles, sont autant d'éléments de connaissance nécessaires à la compréhension des appareils. Ils sont développés dans le second chapitre de cette partie.

1 • LA NORMALISATION

A

GÉNÉRALITÉS

1.1 Domaines domestiques et industriels

Le document traite des *appareillages électriques industriels*, des règles auxquelles ils sont soumis, de leurs caractéristiques et des solutions disponibles sur le marché.

Il traite également des *installations électriques industrielles* et des tableaux électriques industriels, leur choix, les méthodes d'études et de calculs, leur mise en œuvre et leur entretien.

Afin de lever tout malentendu, il convient de préciser ce qui relève du *domaine industriel*, par opposition au *domaine domestique*.

La définition « historique » vise à encadrer le domaine des appareils et installations « domestiques » à celui qui serait alimenté en énergie par un branchement basse tension, les autres relevant du domaine « industriel ». Cette relation avec le type de branchement au réseau du distributeur est utilisée dans la réglementation pour distinguer des procédures de contrôle différentes :

- domestique : contrôle initial par le *consuel* couvrant pratiquement toute responsabilité de l'installateur ou de l'utilisateur ;
- industriel : contrôle initial et périodique par un organisme habilité des installations industrielles dont le chef d'établissement reste entièrement responsable de la sécurité contre tous dangers électriques pouvant atteindre le personnel travaillant dans son établissement.

Cette distinction n'est pas suffisante pour s'appliquer aux matériels électriques. En effet les matériels, même les tableaux, installés dans des bureaux d'un grand immeuble ont les mêmes contraintes d'utilisation que ceux installés dans une habitation. Nous proposerons ici un concept plus général.

Le *domaine domestique* se caractérise par les particularités suivantes :

- Les matériels peuvent être mis en œuvre par un utilisateur final. Deux ou trois données sont nécessaires à leur choix (par exemple : fonction, nombre de pôles, intensité). Aucun réglage n'est toléré. Aucune disposition complémentaire n'est ajoutée pour assurer la protection contre un usage dangereux. Aucune formation spécifique sur l'appareillage n'est requise pour les mettre en œuvre.
- Les matériels sont directement utilisables par des personnes « ordinaires » c'est-à-dire sans formation ni instruction spécifique. Les personnes « sensibles » telles que les enfants, personnes âgées ou handicapées font partie des personnes utilisatrices.

- Les matériels étant initialement prévus pour les installations de branchement, sont isolés entre phase(s) et terre pour 250 V. Ils ont une tolérance aux surtensions très limitée.
- Ils ne doivent pas générer de perturbations électromagnétiques (parasites), mais ils restent très sensibles aux perturbations reçues.
- Aucune surveillance ou entretien n'est exigé.

Le *domaine industriel* se caractérise, à l'opposé, par les particularités suivantes :

- Les matériels sont confiés à des professionnels formés aux règles de l'art, capables de les choisir, de les régler et de les mettre en œuvre en fonction des contraintes de l'installation qu'ils savent reconnaître et évaluer.
- Les vendeurs de ces matériels ont l'obligation de porter à la connaissance de leurs clients toutes les caractéristiques de leurs produits, qui seraient nécessaires pour les sélectionner et les adapter aux usages auxquels ils sont destinés.
- Parmi les caractéristiques, différentes tensions d'isolement peuvent être assignées aux produits proposés. Il convient au professionnel d'en tenir compte en fonction des caractéristiques du réseau.
- Ils peuvent émettre un certain niveau de perturbations électromagnétiques, mais doivent être peu sensibles à celles qu'ils reçoivent (dans certaines limites).
- Une surveillance de la qualité de l'installation est demandée, exigeant un contrôle périodique. Celui-ci s'attache à vérifier si des risques de pannes peuvent perturber l'exploitation de l'établissement. Ces inspections complètent celles des organismes de contrôle qui s'attachent essentiellement à vérifier si les conditions de protections contre tout danger électrique sont conservées.
- Les matériels et équipements sont utilisables par des personnes ayant reçu une formation adaptée, sous la responsabilité du chef d'établissement.

Le présent ouvrage se concentre donc sur *les matériels et installations liés au domaine industriel*.

1.2 Importance des informations liées aux matériels

Il résulte de ce qui précède qu'il est absolument indispensable de disposer de méthodes de travail, de vocabulaires, de procédures d'évaluation des caractéristiques... qui soient communes et connues entre tous les acteurs d'une même activité, en particulier de celle de l'industrie électrotechnique. Les produits étant diffusés sur l'ensemble de la planète, ces « règles du jeu » doivent être les plus universelles possibles.

Prenons pour exemple un contacteur.

- La première question est reconnaître le même produit sous cette appellation. Dans certaines littératures, ce mot désigne un appareil de commande d'un moteur au moyen d'un électroaimant, dans d'autres, il désigne un appareil à commande manuelle pour sélectionner une fonction, dans d'autres encore, il devient synonyme d'une prise de courant.

- Les autres questions consistent à définir les aptitudes de cet appareil.
 - Quel courant peut-il conduire pendant une très longue période ?
 - Quelle puissance de moteur peut-il commander en marche et en arrêt ? Dans quelles conditions ? Pour combien de manœuvres ?
 - Quelle tension et quelle variation de tension de commande accepte-t-il ?
- etc.

Nous comprenons aisément que les fabricants ne peuvent pas présenter, chacun à sa manière, des réponses sans qu'aucune comparaison ne soit possible. Un utilisateur ne peut pas se transformer en spécialiste des contacteurs, interrupteurs et autres disjoncteurs, pour vérifier si les conditions d'essais des produits proposés correspondent bien à ses besoins.

Il est donc indispensable, dans une activité industrielle qui est devenue internationale, que toutes les définitions et les caractéristiques des produits commercialisés, soient, de manière concertée, clairement définies et appliquées dans toutes les communications : catalogues, cahiers des charges, devis, rapports d'essais, rapports d'expertises, etc.

1.3 Le marché européen

Le marché européen, selon le principe du traité de Rome, est ouvert à la diffusion de tous produits, à condition qu'il puisse être démontré, de façon vérifiable, que ceux-ci ne sont pas dangereux pour la sécurité et la santé des personnes ou des animaux, ni nuisibles à l'environnement, dans le cadre d'une utilisation parfaitement définie. Ainsi, s'agissant d'appareillage de protection, il doit être démontré que les appareils assurent leur rôle dans des limites définies.

Ces règles constituent le fondement des *directives européennes*, réglementant la circulation des matériels électriques. Elles ne s'en tiennent qu'aux buts visés, en laissant les moyens de recherches et le cadre des solutions à la seule responsabilité des fabricants ou des vendeurs.

L'entente entre seuls professionnels pourrait conduire à ne se satisfaire que d'options minimales. Les directives européennes obligent, au contraire, les fabricants à viser une recherche permanente de la plus grande sécurité pour les humains, les êtres vivants et la préservation de l'environnement.

1.4 Les responsabilités devant la loi

Les matériels susceptibles de circuler dans l'espace européen, sont soumis au respect des directives européennes. Celles-ci, transposées en lois nationales, deviennent juridiquement obligatoires.

Les installations électriques, ne pouvant circuler, sont quant à elles soumises à la loi nationale.

Une installation électrique ne doit pas être dangereuse, le chef d'établissement en est responsable devant la loi. Cela nécessite obligatoirement qu'une méthode de conception et de vérification soit établie, en application de la loi, pour décrire les moyens minimaux à mettre en œuvre afin qu'une installation soit admise comme non dangereuse. C'est dans cet objectif que le législateur a publié le décret n° 88-1056 du 14-11-1988, relatif à la protection des travailleurs contre les dangers électriques.

Ce décret est complété par la norme NF C15-100 qui couvre de façon plus générale toutes installations électriques à basse tension, et donne les règles de conception et de vérification à respecter en vue d'assurer la protection des personnes, des animaux et des biens contre tous dangers électriques.

Les règles d'installation présentent encore un grand nombre de différences, d'un pays à l'autre, mais les accords internationaux progressent, malgré les habitudes et cultures qui restent très fortes.

1.5 Terminologie

Il est à ce stade nécessaire de définir trois termes qui nomment les éléments qui composent les ouvrages électriques :

- *Matériel électrique* : ce terme désigne tout élément participant à la production, la transformation, la transmission, l'utilisation de l'énergie électrique. Ainsi, un transformateur, un groupe électrogène, un moteur, un câble, un tableau électrique, un disjoncteur, un contacteur, une borne, etc. constituent des matériels électriques.
- *Appareil électrique* : ce terme désigne principalement un appareil récepteur utilisant l'énergie électrique en vue d'assurer une fonction définie. Un outil portatif électrique, un appareil électroménager, un appareil de bureautique, un luminaire, etc., constituent des appareils électriques.
- *Appareillage électrique* : ce terme désigne un matériel destiné à être relié à un circuit électrique en vue d'assurer une ou plusieurs des fonctions telles que : sectionnement, protection, commande, connexion...

Le terme *appareil* est quelquefois employé notamment dans les normes pour désigner un appareillage électrique, lorsqu'il n'entraîne pas d'ambiguïté.

Le terme appareillage électrique est aussi utilisé au singulier pour désigner globalement l'ensemble des appareillages électriques.

Enfin l'expression *ensemble d'appareillage à basse tension* désigne une armoire ou un tableau électrique qui reçoit naturellement les appareillages devant assurer les fonctions nécessaires de sectionnement, protection, commande, connexion... s'appliquant aux circuits d'une partie d'installation.

1.6 À quoi sert une norme ?

C'est un outil de travail qui a pour but de :

- définir un vocabulaire afin qu'un terme ait la même signification dans toutes les publications ;
- définir des caractéristiques ;
- définir les conditions d'essais des caractéristiques ;
- définir les règles de l'art d'une installation ou d'une construction.

VOICI PÊLE-MÊLE QUELQUES EXEMPLES DE NORMES, TOUS MÉTIERS RÉUNIS :

- Représentation des plans de construction en mécanique
- Classification des métaux et alliages
- Dimensions des profilés métalliques de construction

Dimensions « normales » des vis et écrous
 Dimensions des matériaux de construction : briques, parpaings, poutres.
 Classification des matériaux de construction en fonction de leur résistance au feu.
 Symboles de représentation de l'appareillage électrique
 Règles d'organisation des schémas électriques et d'automatisme
 Organisation de l'assurance qualité en entreprise
 Classification d'étanchéité aux poussières et liquides d'un boîtier de protection.
 Définitions et conditions d'essais caractéristiques d'un disjoncteur.
 Protocole de communication en réseau Ethernet, WIFI...

1.7 Organisation des normes en électrotechnique

1.7.1 Groupes professionnels

FIEEC : Fédération des industries électriques, électroniques et communication.

Regroupe une vingtaine de syndicats ou groupements parmi lesquels :

GIMELEC : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle commande et des services associés.

DOMERGIE : Groupement des industriels de l'appareillage électrique et de ses applications domestiques.

SERCE : Syndicat des entreprises de génie électrique.

FFIE : Fédération des installateurs électriciens.

Les groupes professionnels sont les principaux acteurs impliqués dans la rédaction des normes.

1.7.2 Instances de normalisation

■ AFNOR : Association française de normalisation

Constitués d'adhérents professionnels et sous la surveillance du secrétaire d'état à l'industrie qui est garant du respect des accords internationaux :

- directives européennes,
- OMC : Organisation mondiale du commerce.

Les normes françaises enregistrées par l'AFNOR ont le préfixe NF.

■ UTE : Union technique de l'électricité

Pour des raisons historiques, l'AFNOR délègue à l'UTE la responsabilité de la normalisation électrique des matériels, des installations et des services. L'AFNOR conserve toutefois l'autorité de validation et d'enregistrement.

Les normes françaises éditées par l'UTE et enregistrées par l'AFNOR ont le préfixe NF C suivi d'un numéro de classement de l'UTE.

■ CEI : Commission électrotechnique internationale

(IEC : International Electrotechnical Commission)

La CEI regroupe la plupart des pays industrialisés. Elle organise les commissions d'études et après accord entre les différents pays, propose des documents pouvant être reproduits par les instances nationales pour constituer des normes. Il est évidemment

de l'intérêt de tous les pays d'adopter ces textes, dans la mesure où ils conduisent à l'harmonisation des informations et facilitent les échanges internationaux.

■ CENELEC : European Committee for Electrotechnical Standardization

Le CENELEC regroupe 30 pays de la communauté européenne et pays voisins. Le comité organise des travaux d'harmonisation en vue de faciliter les échanges dans l'espace européen. Lorsque ces travaux sont menés à terme, le CENELEC a délégué de les publier en tant que normes européennes. Celles-ci ont le préfixe EN. Le CENELEC participe aux travaux menés au sein de la CEI, et adopte en général entièrement les textes rédigés à l'issue de ceux-ci. Le CENELEC publie ces textes sous forme de norme EN. Le numéro qui suit est purement celui du document de la CEI. Exemple EN 60947-1

Les normes européennes ont valeur « officielle » dans tous les pays membres. Ce qui signifie que si une norme EN est adoptée elle doit être transposée en norme nationale. Seuls quelques commentaires d'explications sont admis.

La désignation officielle d'une norme française, issue d'une norme européenne devient donc : NF EN... Exemple : NF EN 60947-1.

Les numéros d'enregistrement de normes de la CEI n'ont aucune syntaxe de classement en rapport avec une classe de thème. Dans ce sens, la classification UTE est utile, elle permet de trouver assez rapidement l'existence de textes relatifs à un sujet recherché. Toutefois, dans un cahier des charges accompagnant un appel d'offres, il est nécessaire de mentionner la norme NF EN xxx, pour être ouvert à toute proposition venant de l'espace européen.

1.7.3 Organismes internationaux de normalisation

■ Toutes activités

ISO : International Organization for Standardization

CEN : European Committee for Standardization

AFNOR : Association Française de Normalisation

BSI : British Standards Institution

DIN : Deutsches Institut für Normung

■ Normes électrotechniques en Europe

IEC : International Electrotechnical Commission

CENELEC : European Committee for Electrotechnical Standardization

UTE : Union technique de l'électricité et de la communication

BEC : British Electrotechnical Committee

DKE : Deutsche Elektrotechnische Kommission

VDE-PZI : Verband Deutscher Elektrotechniker - Prüfzeichen Institut

CEI : Comitato Elettrotecnico Italiano

DEMKO : Danish Electrical Material Control

■ Organismes en Amérique du Nord

□ USA

ANSI : American National Standards Institute

OSHA : Occupational Health and Safety Act

NFPA : National Fire Protection Association
 NEC® : National Electrical Code® : marques propriétés de la « National Fire Protection Association » (NFPA).
 UL : Underwriters Laboratories
 NEMA : National Electrical Manufacturers Association

□ **Canada**

CCN : Conseil canadien des normes
 CSA : Canadian Standards Association
 CEMA : Canadian Electrical Manufacturers Association

□ **Laboratoires**

UL : Underwriters Laboratories
 KEMA : Testing Research and Development and Engineering Consultant to the Electric Power Industry
 LCIE : Laboratoire central des industries électriques
 LOVAG : Low Voltage Agreement Group

■ **Normes spécifiques pour navires**

Elles ont été créées par les grandes compagnies d'assurance qui assurent les armateurs contre les risques de naufrages ou autre accident graves. La plus ancienne est la Lloyd's Register of Shipping. Elles ont créé leurs propres normes, s'appliquant jusqu'aux constituants.

Un enregistrement des matériels, certifiés par un laboratoire agréé est imposé.

Il faut observer que les organismes de normalisations internationales coopèrent depuis longtemps avec ces laboratoires, au point où les descriptions des protocoles d'essais sont harmonisées pour une grande part.

Toutefois il relève de la responsabilité de ces bureaux de vérification d'imposer des valeurs minimales aux composants. Ceux-ci enregistrent tous les matériels que les fabricants leur demandent d'agréer, après avoir réalisé les essais, ou assisté à ceux-là.

Tableau 1.1 – Les principaux bureaux de vérification pour les matériels destinés à être montés dans les navires.

Abrév.	Titre	Pays
ABS	American Bureau of Shipping	États-Unis
BV	Bureau Veritas	France
DNV	Det Norske Veritas	Norvège
GL	Germanischer Lloyd	Allemagne
RINA	Registro Italiano Navale	Italie
LRS	Lloyd's Register of Shipping	Grande-Bretagne

1.7.4 Directives européennes

Fondement : avec le traité de Rome (1957) l'Union européenne s'est imposé les principes suivants :

- **1^{er} principe** : tout accord ou règlement susceptible de constituer une barrière aux échanges commerciaux entre les pays de l'Union européenne, est strictement interdit.
- **2^e principe** : tout progrès technique, en particulier tendant à améliorer la sécurité et l'environnement, doit être encouragé.

En application de ces principes, des directives ont été adoptées. Leur formulation est simple mais « sévère » :

Le fabricant ou importateur doit justifier que son produit intègre dès sa conception tous les moyens nécessaires en vue d'assurer la sécurité et la préservation de l'environnement.

Voici quelques exemples de directives :

- Directive « jouets » n° 88/378/CEE
- Directive « basse tension » n° 73/23/CEE
- Directive « machines » n° 98/37/CEE
- Directive « CEM » n° 89/336/CEE
- Directive « bruit » n° 2000/14/CEE
- Directive « recyclage » n° 2006/66/CE

Comment sont appliquées les directives ?

- La directive doit être passée en droit national (vote en France d'une loi et décret d'application).
- Le constructeur ou importateur doit constituer un dossier technique enfermant tous les plans de construction, une analyse des risques, les essais menés en vue de pallier les risques.
- Il enferme sous enveloppe cachetée la liste des plans constituant le dossier.
- Il appose sur son produit la marque **CE**.

Ces documents sont la seule propriété du constructeur. Ils ne peuvent être transmis qu'à une instance juridique, suite à un événement grave pouvant mettre en cause la conception du produit.

1.7.5 Rôle des normes

Dans ce contexte de réglementation, les normes ont un rôle essentiel :

- Elles fixent des caractéristiques précises pour définir les limites d'usage d'un produit, en tenant compte du public à qui il est destiné.
- Elles définissent des essais afin de garantir un comportement non dangereux ni polluant pendant toute la durée de vie du produit y compris son recyclage.

1.7.6 Valeur juridique des normes applicables aux produits

Les lois de mise en application des directives obligent les constructeurs à tout mettre en œuvre pour concevoir leurs produits afin d'assurer la sécurité.

La conformité à une norme n'est pas obligatoire, mais c'est un outil que les constructeurs utilisent pour justifier les moyens qu'ils ont mis en œuvre.

Toutefois, si l'utilisation d'un produit s'avère dangereuse dans des conditions non prévues par les normes mais dont le constructeur n'en a pas explicitement exclu l'usage, celui-ci reste responsable.

1.8 Les normes en électrotechnique

Le propos n'est pas ici d'établir un catalogue des normes, mais d'énoncer ce qu'il est possible d'y trouver. Ces documents évoluent assez rapidement, afin de s'adapter tant aux évolutions technologiques, qu'aux nécessités d'harmonisation.

1.8.1 Normes générales

Elles décrivent d'abord comment les normes elles-mêmes doivent être présentées et proposent un vocabulaire convenu internationalement (VEI : vocabulaire électrotechnique international) ou la manière de constituer un dossier technique, un schéma ou une nomenclature.

Les normes décrivant les symboles en électrotechnique, font partie de cette classe de documents.

Les données très précises de ces documents ont servi de base à l'organisation des logiciels de conception de schémas, de leurs bases de données et de leur nomenclature. C'est le cas principalement de la série des normes EN 61082-xx.

1.8.2 Normes « boîtes à outils »

Ces normes définissent des caractéristiques et des essais utilisables applicables à plusieurs catégories d'appareils ou d'ensembles. Elles permettent aux autres normes de s'y référer et évitent qu'une même caractéristique soit définie sur des bases différentes d'un document à l'autre.

Cette classe de documents comprend, par exemple : les normes définissant les degrés de protection des enveloppes (codes IP), les normes précisant les règles de coordination d'isolement (catégories d'isolement, degré de pollution, distances d'isolement, classes de protection des enveloppes en vue de la protection des personnes – classes I, II, III).

Sont définis également certains essais spécifiques : essais au feu, essais aux chocs, aux vibrations et aux impacts mécaniques, essais climatiques, essais d'échauffements...

1.8.3 Normes « règles de l'art »

Nous classerons bien évidemment la norme des « installation électriques à basse tension » (NF C15-100), également, son équivalente pour la haute tension (NF C13-100) ainsi que celles des postes de transformation (NF C13-200).

La série des normes NF-EN 60439-... décrivant les ensembles à basse tension, ainsi que la norme NF-EN 60204 concernant les équipements de machines font partie de cette classe.

1.8.4 Normes « produits »

Ces documents décrivent toutes la terminologie utile à la compréhension des produits, les caractéristiques, les essais, les informations devant être publiées par le fabricant.

Les versions récentes de ces normes, tendent à les grouper par « collections ». Ainsi les appareillages industriels sont groupés dans la série de normes EN 60947. Le tome 1 fixe les généralités et caractéristiques communes à cette classe d'appareils, puis chacun des autres décrit une fonction particulière (EN 947-2 : disjoncteurs ; -3 interrupteurs et sectionneurs ; -4 : contacteurs, protection moteurs et démarreurs ; -5 : auxiliaires de commande ; etc.).

1.8.5 Documents de référence

Le Comité électrotechnique international a édité de nombreux travaux d'études ou de calculs, susceptibles d'être utilisés par d'autres normes. Par exemple, les études concernant le comportement du corps humain en cas de choc électrique ont eu un impact déterminant pour la définition des règles de protections, s'appliquant aussi bien aux installations qu'aux dispositifs de protection à coupure automatiques (fusibles, disjoncteurs, disjoncteurs différentiels...).

Dans cette classe, sont comptés les documents de calculs de courants de courts-circuits, d'échauffement dans les armoires... Ont été publiés également des documents sur la gestion des projets, l'analyse de risques, la fiabilité...

1.9 Marques et labels

Comme il est expliqué précédemment, la loi, transposant les directives européennes en droit français, rend les fabricants responsables de la conformité de leurs produits mis en vente dans l'espace européen. Conformité ne veut pas dire qualité ni fiabilité pour chacun des articles vendus.

Des laboratoires se proposent d'évaluer les produits par des essais sur prélèvements. Le jugement positif des résultats est sanctionné par une marque certifiant la confiance qui peut leur être donnée.

En France la marque NF est attribuée par le LCIE (Laboratoire central des industries électriques). Elle est destinée à attester que les produits qu'elle couvre :

- ont des caractéristiques conformes à la norme de référence ;
- proviennent d'une fabrication dont la qualité est contrôlée suivant les dispositions convenues avec le fabricant.

Parmi les réglementations applicables aux produits qui entrent dans le champ d'application de ces règles de certification, la marque NF couvre les exigences de l'article 2 de la directive basse tension 73/23/CEE modifiée.

D'autres pays proposent également leurs marques de conformité. Toutefois, dans la règle européenne, ces marques ne doivent pas être des critères susceptibles de constituer une barrière à la libre concurrence. Toutes les marques de conformité venant de tout pays de l'espace européen ont la même recevabilité. Ces marques correspondent à des services dont seuls les clients sont en droit d'en juger la confiance. Mais dans un appel d'offres public, la marque NF ne pourrait être seule retenue comme critère de recevabilité.

Il est important de noter que la marque **CE** ne constitue en aucun cas une marque de qualité. Ce n'est juste qu'une confirmation que le fabricant ou l'importateur a déposé un dossier (auto) certifiant qu'il a vérifié que son produit n'est pas dangereux, en indiquant la méthode de contrôle qu'il a choisi.

2 • ÉLÉMENTS DE TECHNOLOGIE

A

GÉNÉRALITÉS

2.1 Processus de coupure et disjoncteurs

2.1.1 Arc électrique

Lorsque deux contacts se séparent pour interrompre le passage d'un courant électrique, il se produit « en général » un arc électrique. Cette précaution d'affirmation est justifiée par le fait que la production d'un arc électrique est en fait soumise à une règle selon laquelle en deçà d'une courbe $U_B = f(I_B)$, aucun arrachage d'électrons ne se produit.

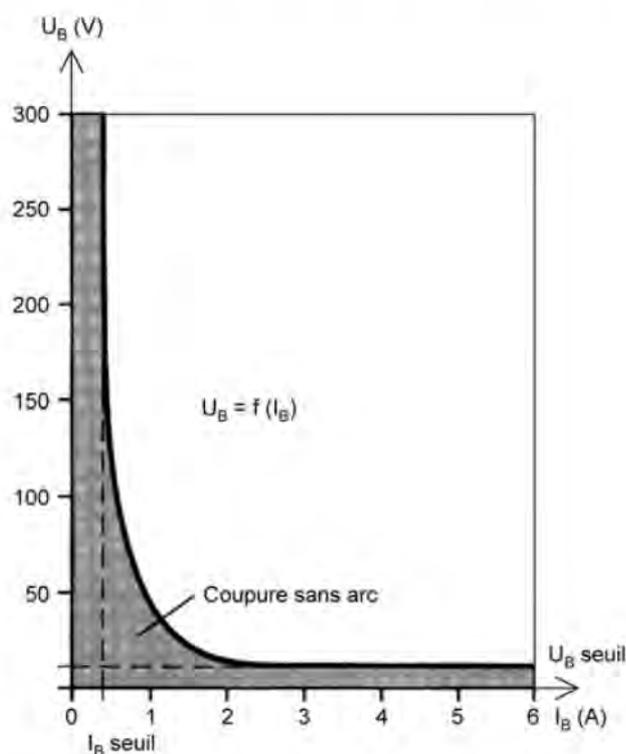


Figure 2.1 – Tension d'arc U_B minimale en fonction du courant d'arc minimal I_B .

Un arc électrique est en effet produit lorsqu'un champ électrique s'exerce sur une colonne d'air ionisé. Or pour amorcer l'ionisation d'une colonne d'air, il faut que des électrons soient émis par une cathode chaude. Pour favoriser cette émission il

faut, qu'un champ électrique soit suffisamment élevé et que le courant coupé soit lui-même suffisamment élevé. La courbe de la **figure 2.1** représente les conditions limites de production d'arc électrique. Cette figure illustre le fait que, pour une coupure d'un courant inférieur à environ 0,4 A ou sous une tension inférieure à 10 V, aucun arc ne se produit. Ces valeurs ont été constatées pour des contacts en argent. Elles dépendent des matériaux de contact utilisés.

Les électrons libérés, accélérés par le champ électrique, entrent en collision avec les molécules de gaz, formant ainsi d'autres ions conducteurs et provoquant une émission de lumière. La colonne d'air devient rapidement très conductrice.

Nous pourrions penser que la résistance de l'arc tendrait rapidement vers zéro, entraînant un courant de court-circuit infini si l'impédance de la source est nulle. En réalité, les travaux d'Hertha Ayrton ont révélé que l'arc présente une chute de tension dont elle a su analyser la structure.

La **figure 2.2** représente l'évolution de la chute de tension entre cathode et anode. Elle met en évidence le fait qu'une partie importante de chute de tension se produit au voisinage des électrodes. Cette part dépend des matériaux utilisés. Une autre partie de chute de tension dépend linéairement de la longueur de l'arc.

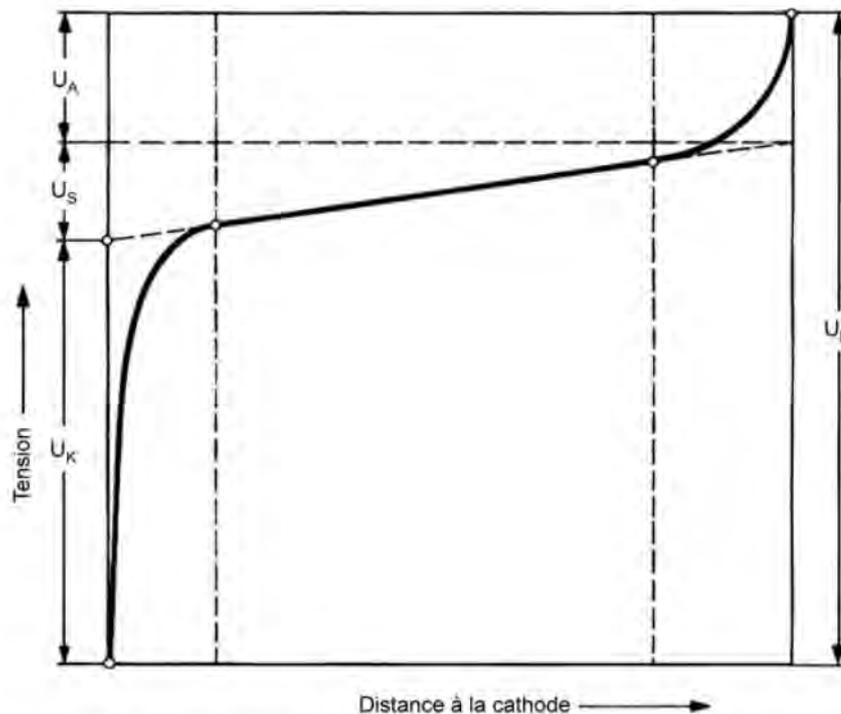


Figure 2.2 – Chute de tension dans un arc électrique.

La part constante varie de 15 à 40 V. Toutefois elle peut être fortement augmentée si l'arc est refroidi, ralentissant l'extraction des électrons.

Selon la loi d'Ohm généralisée, la tension génératrice est égale à :

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + U_a$$

De cette formule, il ressort que si la tension d'arc dépasse la tension génératrice, l'expression devient alors :

$$U - U_a - Ri = L \frac{di}{dt} < 0$$

Le terme di/dt devient donc négatif, ce qui signifie en clair que le courant diminue pour devenir nul (voir **figure 2.3**).

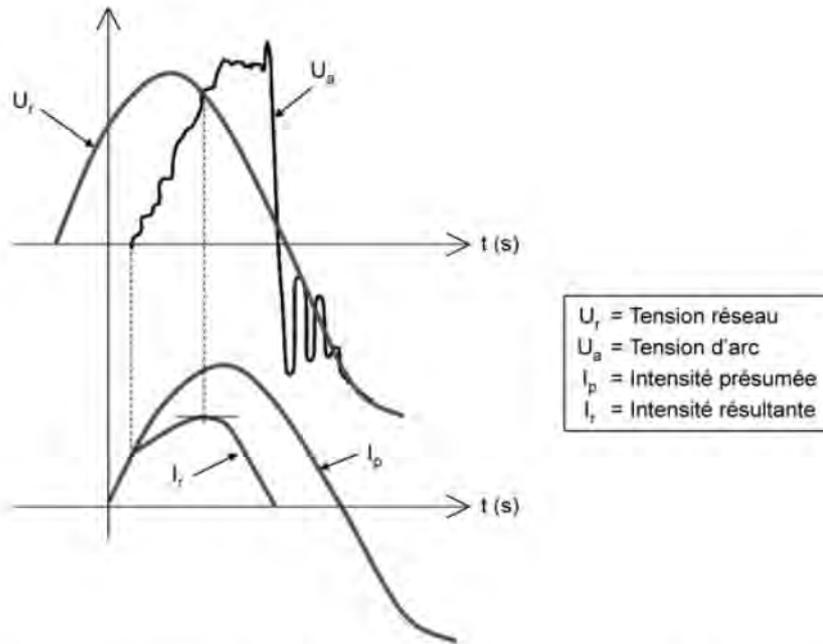


Figure 2.3 – Courant résultant pendant la coupure d'un arc à partir de l'ouverture des pôles.

Pour couper un courant de court-circuit, il s'agit donc non pas de subir l'arc électrique, mais de mettre ses propriétés à profit, afin de le couper au plus vite.

Les ingrédients de la recette sont donc :

- utiliser les chutes de tensions cathodiques en divisant l'arc en multiples tronçons et en utilisant des matériaux présentant les plus fortes chutes de tension ;
- refroidir l'arc aux points d'attache de l'arc, en le propulsant vers des parois froides. Éventuellement ces parois peuvent partiellement s'évaporer en absorbant une quantité appréciable de chaleur ;
- allonger l'arc, par une répulsion électromagnétique ;
- accélérer l'accroissement de la tension d'arc (dU_a/dt très élevé).

■ Chambres de coupure

Le principe des chambres de coupure consiste à disposer, dans des plans perpendiculaires à l'arc, des tôles présentant une bonne perméabilité magnétique (**figure 2.4**). La colonne d'arc électrique engendre un champ magnétique qui se concentre de façon préférentielle vers les zones de plus grande perméabilité. Ce qui entraîne un déplacement de l'arc vers le creux du « V » des tôles. L'arc est en quelque sorte soufflé

vers ces tôles, ce principe est d'ailleurs appelé « soufflage magnétique ». Ce principe accroît le gradient de montée de la tension d'arc (dU_a/dt).

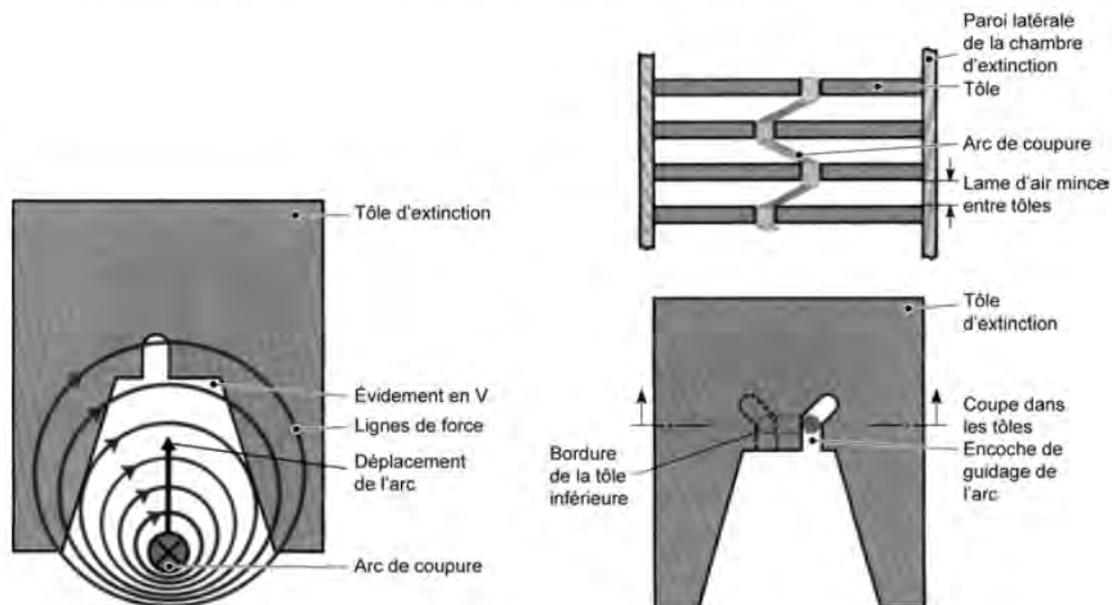


Figure 2.4 – Principe des chambres de coupure (d'après Moeller Electric).

Les concepteurs découpent quelquefois, au fond des « V », des encoches disposées en quinconce, cela dans le but d'accroître la longueur de l'arc. L'arc se trouve donc divisé en plusieurs arcs en série, chacun ayant une anode et une cathode, ce qui multiplie la chute de tension cathodique. Puisque ces tôles sont plus froides que les pôles, ces chutes de tension s'en trouvent augmentées.

La **figure 2.3** illustre le fait que l'intensité de l'arc coupé est très sensiblement inférieure à celle qui se serait établie sans la coupure. Mais l'intensité traversant les conducteurs depuis le début du court-circuit a une tout autre grandeur. En effet le temps total de coupure est la somme du temps d'ouverture et du temps de coupure de l'arc. Le temps d'ouverture physique des pôles est celui d'une suite d'action :

- temps de détection du courant ; celui-ci est de 3 à 8 ms ;
- temporisation volontaire de l'action du détecteur de courant pour des objectifs de sélectivité ($t = 0$ à 300 ms) ;
- temps d'action des déclencheurs sous court-circuit jusqu'au déverrouillage du mécanisme du disjoncteur ;
- temps propre d'ouverture du mécanisme pour parcourir la sur-course d'écrasement.

Au total le temps d'ouverture (pour un dispositif non temporisé intentionnellement) peut être de 12 à 25 ms, selon la configuration du mécanisme et les inerties en jeu. Durant ce début d'établissement du court-circuit, la composante inductive du circuit déforme la sinusoïde, ce qui entraîne pour conséquence l'augmentation de la valeur efficace du courant (voir **figure 2.5**).

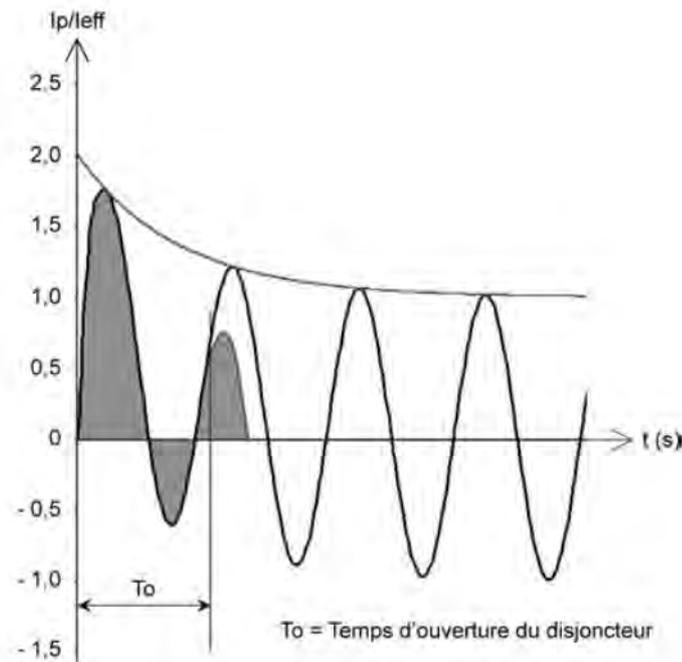


Figure 2.5 – Évolution du courant à partir du court-circuit.

En partie B, sous le titre « protection des câbles contre les courts-circuits », il est démontré que les conducteurs de faible section (pour simplifier de sections inférieures à 16 mm^2) exigent un temps de total de coupure extrêmement court pour leur protection ; bien plus court que la première demi-alternance.

Plus précisément, la contrainte thermique appliquée aux conducteurs soumis au courant de court-circuit est désignée par l'expression $\int i^2 dt$.

Cette valeur représente la surface grisée de la **figure 2.5**, mais après avoir élevé la valeur de l'intensité au carré. Cette contrainte thermique atteint très vite une valeur bien trop forte pour des conducteurs ou pour l'appareillage de faible intensité d'emploi. Ainsi il serait impossible de concevoir un disjoncteur d'intensité d'emploi de 10 A, ayant un pouvoir de coupure de 20 kAeff ou supérieur, en envisageant une construction de très faible encombrement. La seule solution serait d'utiliser des appareils dont les dimensions des parties conductrices internes correspondraient à un appareil de calibre 160 A ou plus !

La voie utilisée consiste à ouvrir les pôles et à interrompre le courant de façon à ce que le temps total de coupure soit le plus faible possible, en tout cas inférieur à 5 ms, bien avant que le courant atteigne son amplitude maximale.

2.1.2 Technologies de la limitation

La limitation est la technologie ayant pour but d'interrompre un courant de court-circuit de façon à diminuer l'amplitude de ses effets à une valeur très inférieure à celle que produirait la première demi-alternance du courant (**figure 2.6**). L'exemple qui est exposé en partie B montre que pour protéger un conducteur PVC de $2,5 \text{ mm}^2$ un temps théorique maximum de 0,2 ms est nécessaire.

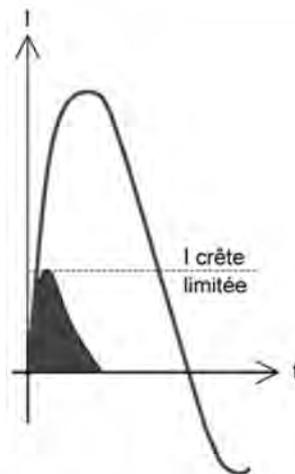


Figure 2.6 – Principe de la limitation.

Pour arriver à cette performance, le temps d'ouverture doit être extrêmement court et le gradient d'élévation de la tension d'arc extrêmement élevé.

■ Systèmes électromagnétiques

Ces systèmes font appel aux circuits ferro-magnétiques. Or un temps pratiquement incompressible est nécessaire pour qu'un flux puisse apparaître pour se transformer en force attractive ou en mesure. Ce temps est d'environ 3 ms. En utilisant ce principe, ce handicap de 3 ms élimine tout espoir d'arriver au temps recherché. Les procédés utilisés relèvent de l'électrodynamisme, c'est-à-dire basés sur les forces entre conducteurs voisins, parcourus par un courant, sans faire appels aux circuits ferro-magnétiques.

■ Systèmes électrodynamiques

Le principe utilise la loi d'Ampère selon laquelle deux conducteurs parallèles parcourus chacun par un courant I_1 et I_2 , et distants d'une distance d , exercent entre eux une force égale à :

$$F = \frac{k \cdot L \cdot I_1 \cdot I_2}{d}$$

- F est exprimé en Newton ;
- I_1 et I_2 en ampères instantanés ;
- L et d en mètres ;
- k a la valeur de $2 \cdot 10^{-7}$.

Prenons pour exemple la configuration de contact illustrée par la **figure 2.7**. La longueur des conducteurs en parallèle est de 5 cm, la distance entre pôles est de 0,5 cm ; l'intensité instantanée est de 5 000 A. La force exercée est donc de :

$$2 \cdot 10^{-7} \times 0,05 \times 5\,000 \times 5\,000 / 0,005 = 50 \text{ N}$$

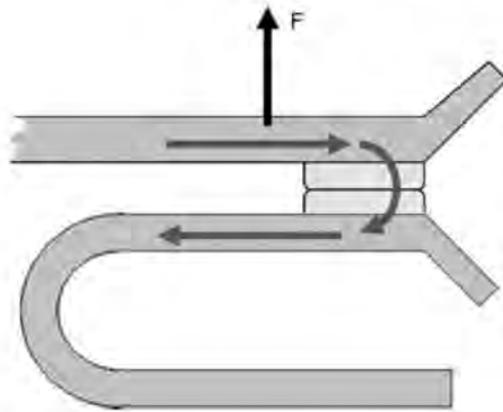


Figure 2.7 – Principe de répulsion des contacts.

Étant donnée la forme du pôle fixe qui constitue une demi-boucle, le flux exercé sur le pôle mobile serait encore plus important. Ce simple calcul n'a pour but que d'évaluer l'ordre de grandeur de la force. Cette force doit vaincre celle exercée par les ressorts de pression de contact, le « surplus » de force sert à procurer une accélération d'ouverture du pôle mobile.

Notons que pour un courant de 50 000 A, la force serait 100 fois plus élevée. Elle atteindrait la demi-tonne force !

Nous découvrons un premier conflit dans les possibilités de conception d'un disjoncteur limiteur. Si la pression de contact est modeste, la répulsion se produira pour une intensité relativement faible ; l'effet de limitation en sera amélioré. En revanche une faible pression de contact défavorise considérablement la conductivité des pôles en situation fermée et par voie de conséquence diminue l'intensité thermique d'emploi du disjoncteur.

Plusieurs variantes de ce principe sont appliquées chez les constructeurs. La disposition peut être à simple coupure, à double coupure... Le principe reste le même, celui d'une répulsion électrodynamique. Celle-ci a un effet instantané. Les mouvements ne sont freinés que par l'inertie des parties en mouvement. Nous en arrivons alors à découvrir un second conflit de conception.

Pour obtenir une ouverture rapide et suffisamment grande pour que l'arc soit coupé, seule une partie des pôles est répulsée. Or, du fait que la distance augmente et que l'intensité diminue jusqu'à être nulle, la force de répulsion s'annule rapidement. Les pôles ne restent ouverts que grâce à leur inertie. Cependant les ressorts de pression de contact exercent toujours leur force et vont irrémédiablement forcer les contacts à se refermer. Les pôles déjà très chauds, se refermant sur un court-circuit, vont sans doute souder ou s'engager dans un effet « sonnette » qui conduira rapidement le disjoncteur à « exploser ».

Lorsque le processus d'ouverture est engagé, il doit être « définitif », c'est-à-dire que le mécanisme d'ouverture doit suivre immédiatement cette action afin d'ouvrir tous les pôles. Ceux-ci ne pourront être refermés que par une manœuvre volontaire de réarmement de la part d'un opérateur.

Le problème est que, comme nous l'avons vu précédemment, le temps d'ouverture du mécanisme est, selon l'inertie du système de l'ordre 6 à 15 ms, alors que la coupure de l'arc peut s'opérer en 1 à 3 ms. La **figure 2.8** schématise le cas d'un dispositif ne pouvant pas fonctionner.

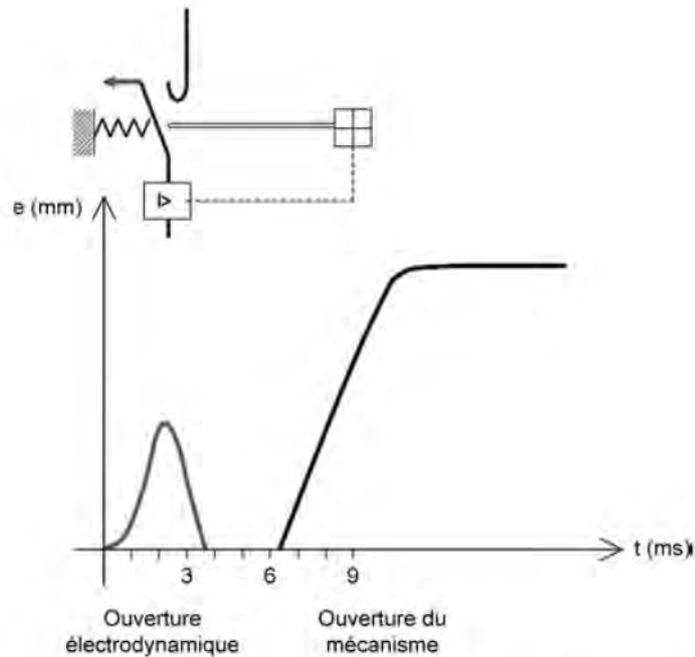


Figure 2.8 – Dans ce système l'ouverture des pôles est très rapide, mais le mécanisme ouvre trop tard. Le disjoncteur ne peut pas fonctionner.

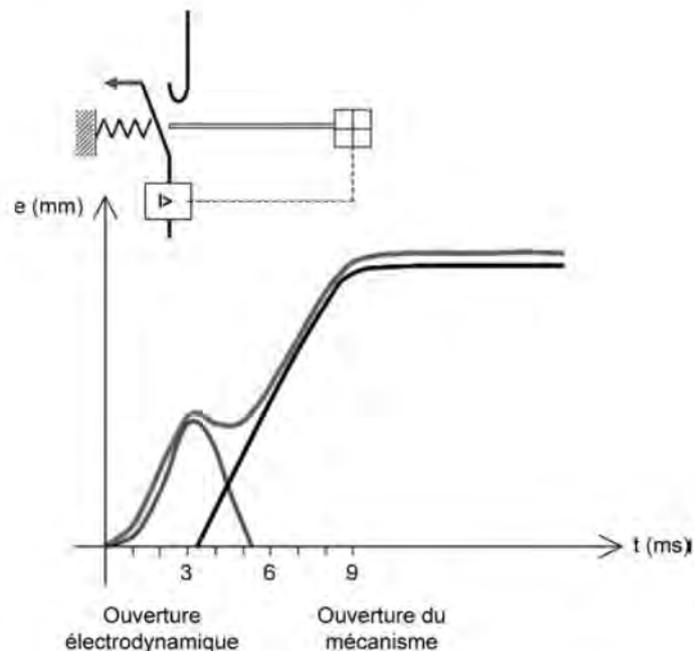


Figure 2.9 – Dans ce système l'ouverture des pôles est moyennement rapide et le mécanisme est particulièrement rapide.

Pour des disjoncteurs de faible et moyenne intensité (≤ 160 A), le dispositif mécanique n'est pas très lourd, son temps de réponse peut être rapide. Si le dispositif d'ouverture par répulsion des pôles n'est pas trop rapide, un chevauchement de fonctionnement entre les deux dispositifs est réalisable. Le principe est illustré en **figure 2.9**.

Pour les petits disjoncteurs, le principe est le même, mais les temps d'ouverture des pôles et du mécanisme sont nettement plus courts. Le temps de coupure est proche de la milliseconde.

La conception d'un disjoncteur est donc le résultat de dosages savamment étudiés entre les performances recherchées, les masses et forces mises en jeu, sans oublier le coût de production. Un exemple est illustré en **figure 2.10**.

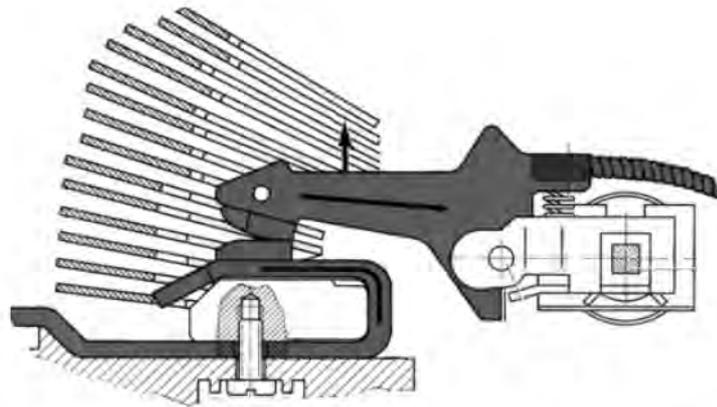


Figure 2.10 – Exemple de disposition de contact pour un disjoncteur 160 A (d'après Moeller Electric).

Ce système ne peut plus s'appliquer à un appareil de plus fort calibre (de 160 A à 630 A). Les inerties sont plus importantes, les dimensions plus grandes et les forces de pression nettement plus grandes. Les constructeurs se sont alors ingénierés à trouver des solutions pour maintenir les pôles ouverts le temps de laisser le mécanisme s'ouvrir. La **figure 2.11** illustre le principe de cette solution.

Une application particulièrement représentative de ce principe utilisait un circuit magnétique autour du pôle mobile. Lequel était à double coupure. Selon cette disposition, le pôle est d'abord répulsé électrodynamiquement. Cette action correspond à la première phase de la **figure 2.11**. Ce mouvement rapproche les armatures du circuit magnétique entourant les pôles (voir **figure 2.12**). Le courant n'étant pas entièrement coupé, un champ magnétique est maintenu, attirant l'armature mobile. Cette action maintient le pôle ouvert tant que le courant subsiste. Elle correspond à la deuxième phase de la **figure 2.11**. Enfin les déclencheurs magnétiques déverrouillent l'accrochage du mécanisme, ouvrant l'ensemble des pôles selon la phase 3 de la **figure 2.11**.

Ce système, malgré sa grande performance, n'a pas été conservé par le constructeur, pour des raisons de coût de fabrication.

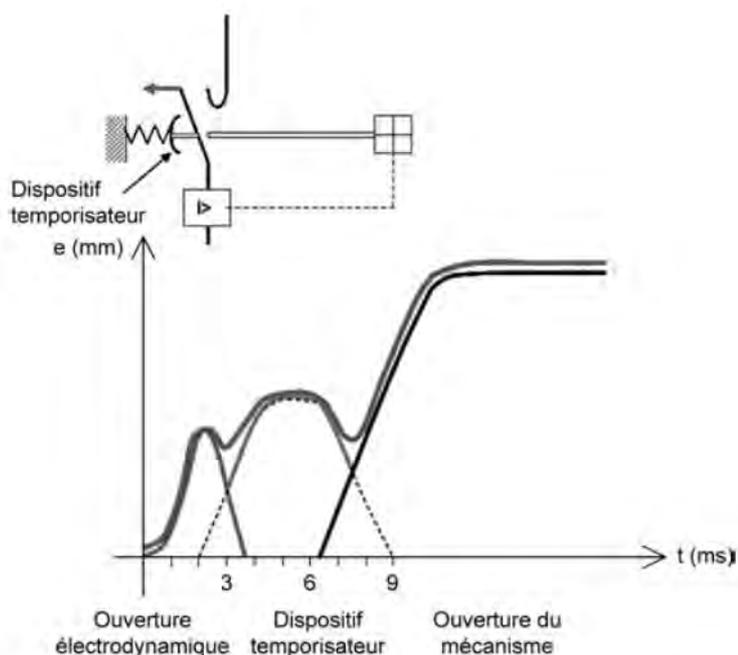


Figure 2.11 – Dans ce système, un élément temporisateur retient les pôles ouverts le temps de laisser le mécanisme s'ouvrir.

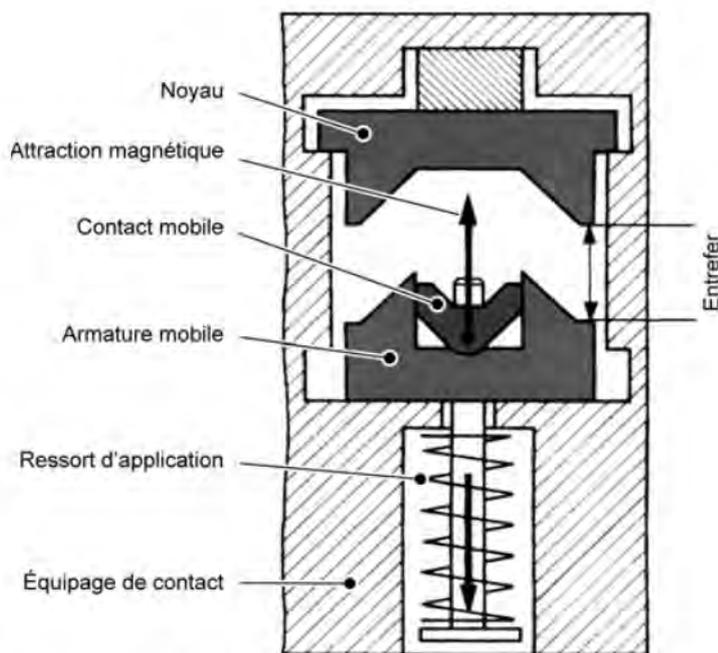


Figure 2.12 – Dispositif pour NMH9 (d'après Moeller Electric).

Nous avons énoncé que pour atteindre une grande rapidité de temps total de coupure, il était nécessaire d'agir sur la rapidité d'ouverture des pôles (nous venons d'exposer ce point) et également d'agir sur la rapidité de montée de la tension d'arc. Cette rapidité est accrue en disposant autour des chambres de coupure un

« U » en tôle magnétique (**figure 2.13**), englobant le pôle fixe. Ce dispositif ajoute un champ magnétique transversal qui exerce une force supplémentaire sur la colonne de l'arc électrique, accroissant la vitesse de sa projection sur les tôles d'extinction.

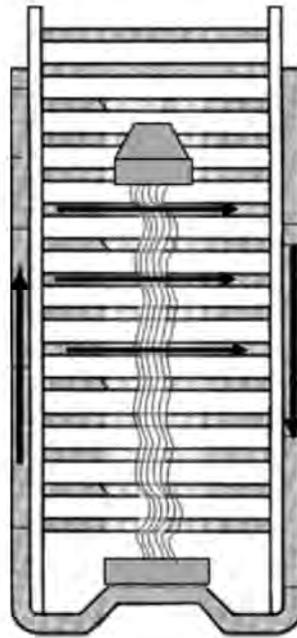


Figure 2.13 – Le circuit magnétique en U accroît la force de soufflage magnétique.

■ Blocs limiteurs

Certains constructeurs présentent à leurs catalogues des blocs ayant uniquement la fonction limiteur. Ceux-ci fonctionnent selon le principe qui vient d'être décrit, mais n'assurent que les deux premières étapes de la **figure 2.11**. La troisième étape est assurée par un disjoncteur associé.

L'avantage est de disposer d'une coupure supplémentaire, augmentant ainsi la tension d'arc. Cette solution, outre une souplesse d'adaptation, permet d'augmenter considérablement le pouvoir de coupure et/ou d'adapter le système à une tension d'emploi élevée (690 V par exemple) en disposant plusieurs blocs limiteurs en série. Ces combinaisons ne peuvent bien sûr être garanties que par le constructeur ayant réalisé tous les essais nécessaires.

Un bloc limiteur ne doit jamais être utilisé seul !

2.1.3 Tension de rétablissement

Dans un système triphasé, lorsque l'arc de la première phase est éteint, le pôle ouvert est soumis à la tension $1,5 \times U_0$, U_0 étant la tension simple (230 V). Toutefois le circuit présente toujours les composantes R , L et C . La coupure brusque du courant génère une tension $-L \times di/dt$ élevée qui se décharge sur la capacité. Une tension de haute fréquence est générée dont l'amplitude peut doubler la tension de rétablissement. En résumé, la tension de rétablissement peut être de 1,5 à 3 fois la tension simple. Plus la coupure est rapide, plus la tension de rétablissement risque d'être élevée. Il est donc important qu'après la coupure d'un arc, l'environnement

des pôles retrouve une qualité diélectrique satisfaisante pour éviter son réamorçage. Pour cette raison, les gaz extrêmement chauds doivent être projetés hors de l'appareil. La montée en pression due à la température provoquera cette propulsion à travers des fenêtres d'éjection de gaz prévues à cet effet. Il faut réaliser que ces gaz brûlants projetés à l'extérieur, en général en haut de l'appareil, peuvent rester conducteurs. C'est pourquoi il faut vérifier la distance admissible entre la partie supérieure d'un disjoncteur et une paroi métallique et, avec encore plus de précaution avec des barres conductrices sous tension (**figure 2.14**).

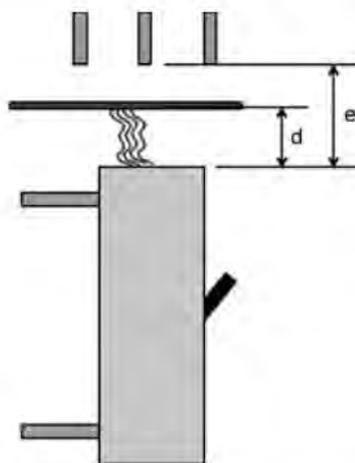


Figure 2.14 – Distance de sécurité au-dessus des chambres de coupe.

d : distance d'une paroi métallique.

e : distance d'un jeu de barres.

En principe les disjoncteurs à boîtiers moulés sont dotés de chambres de coupe et de « tunnels de laminage » de décompression, dimensionnés de telle sorte que les gaz sortants soient dé-ionisés. Ce principe a fait l'objet d'un brevet, maintenant ancien, de la part de Westinghouse, sous le nom de chambre de-Ion[®].

Ce principe s'oppose aux disjoncteurs à coupe dans l'air (en anglais : *Air Circuit Breaker*, ACB¹). Leur principe est d'utiliser des dispositifs puissants pour souffler l'air ionisé à l'extérieur, au moyen de boîtiers de soufflage. Dans ce cas, il est impératif de respecter les distances de sécurité requises par le constructeur.

2.1.4 Sens d'alimentation

Nous avons vu que la tension de rétablissement peut monter jusqu'au triple de la tension du réseau. Celle-ci peut provoquer un réamorçage au niveau des pôles. Mais ces derniers peuvent être suffisamment cloisonnés et dimensionnés pour éviter ce risque. Il faut noter cependant que cette surtension est présente côté source.

Si le disjoncteur est branché de telle façon que les bornes des déclencheurs à maximum d'intensité soient connectées à l'alimentation, la surtension s'exercera sur ceux-ci. Or ces déclencheurs comportent des mécanismes qui limitent fortement les

1. Quelquefois appelé *Air Break Circuit Breaker*.

possibilités de cloisonnement. Il est possible qu'un claquage se produise à ce niveau. L'arc ne pourrait pas être interrompu ; le disjoncteur exploserait irrémédiablement. C'est pourquoi les constructeurs doivent effectuer les essais pour les deux sens d'alimentation. Si une différence de performance subsiste, le constructeur doit clairement signaler cette particularité. En principe les appareils récents provenant de constructeurs reconnus, ne présentent plus cette différence. Pour des appareils un peu plus anciens ou de provenance « exotique », cette vérification doit être assurée.

Nota : Pour les appareils aptes à être utilisés en courant continu, les constructeurs prévoient parfois des dispositifs de soufflage magnétique dépendant du sens du courant. Cette particularité doit être signalée sur l'appareil lui-même.

2.2 Fonctionnement des fusibles

Le principe connu est d'entraîner la fusion d'une partie conductrice au moyen d'un échauffement provoqué par pertes Joule (RI^2t).

Le premier problème est de provoquer cette fusion pour des surintensités faibles en un temps long et pour de fortes surintensités, en un temps très court. Pour réaliser avec une fiabilité acceptable, les constructeurs utilisent le principe suivant (figure 2.15) :

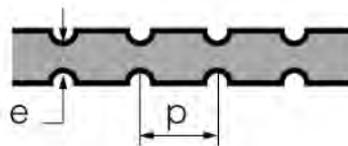


Figure 2.15 – Principe de découpe d'un élément fusible.

L'élément conducteur destiné à fondre en cas de surintensité est découpé afin de présenter des points faibles : la masse est faible et la résistance ohmique est maximale. En cas de fort courant la température monte très rapidement en ces points sans avoir le temps d'échanger de chaleur, par conduction, avec les parties voisines. Elles fondent alors rapidement. En revanche en cas d'intensité de courant plus faible, l'échange thermique se produit sur l'ensemble du conducteur, le portant de façon presque homogène à une température pouvant atteindre le point de fusion. En simplifiant l'explication du procédé, La diminution de la section e dans la figure 2.15 accélère le temps de fusion pour les courants élevés. L'augmentation de la distance p ralentit l'échange thermique, donc augmente le temps de fonctionnement aux courants faibles.

Les points faibles sont multipliés pour diviser l'arc. La matière de remplissage composée de sable siliceux fondra sous la température, absorbant l'énergie calorifique. Cette fusion diminue la température des électrodes, augmentant ainsi la tension d'arc, comme nous l'avons expliqué précédemment.

Il est utile de noter que l'arc ne doit pas obligatoirement être coupé très rapidement. En effet, une coupure trop rapide provoquerait une surtension ($U = Ldi/dt$) qui serait

dommageable au fusible lui-même, ainsi qu'à l'équipement qu'il est censé protéger. Les constructeurs usent alors de recettes ayant pour but de diviser l'arc de façon progressive et maîtrisée.

2.2.1 Catégories d'emploi

Selon l'usage attendu du fusible les normes EN 60269 définissent les catégories d'emploi décrites par deux lettres :

Première lettre :

- g pour les fusibles d'usage général ;
- a pour les fusibles d'accompagnement.

Deuxième lettre :

- G pour un usage général ;
- D pour la protection de disjoncteurs ;
- M pour la protection des moteurs ;
- R pour la protection des semi-conducteurs ;
- S pour la protection des semi-conducteurs avec une puissance dissipée réduite.

Ainsi :

- les cartouches fusibles de type gG sont destinées à la protection des conducteurs contre les surcharges et courts-circuits (*voir chapitre 3*) ;
- les cartouches aM sont destinées à accompagner les relais thermiques dans les démarreurs ;
- Les cartouches aD sont montées en amont des disjoncteurs d'abonnés ;
- Les cartouches aR sont destinées à protéger les variateurs de puissance.

2.2.2 Normes et dimensions

Étant donné leur ancienneté et leur grande diffusion, les formes et dimensions des fusibles divergent considérablement d'un pays à l'autre, et cela pour probablement longtemps. Toutefois les caractéristiques de fonctionnement sont parfaitement harmonisées, au moins dans le cadre européen. En conséquence les formes des fusibles ne font que l'objet d'un accord entre installateur et utilisateur.

2.3 Déclencheurs et relais thermiques à bilames

2.3.1 Dilatation des métaux, principe du bilame

Nous savons que toute matière solide, liquide ou gazeuse se dilate en fonction de la température. Cette dilatation est mise à profit pour nombre de dispositifs de mesure, tels que les thermomètres, ou de régulation, tels que les thermostats ou les dispositifs de protections, tels que les relais thermiques. L'amplitude d'une dilatation dépend considérablement de la composition de la matière. Pour un métal tel que le laiton ou le fer, le coefficient de dilatation est de l'ordre de $15 \cdot 10^{-6}$ par °C (plus exactement par Kelvin, K). C'est-à-dire qu'un barreau de 10 cm de long se dilaterait de 0,15 mm pour une élévation de température de 100 K. Cette amplitude n'est pas directement exploitable pour manœuvrer le contact d'un relais.

Une solution, couramment utilisée, consiste à souder par laminage, deux plaques de métaux dont les coefficients de dilatation sont les plus éloignés possibles. Leur dilatation entraîne une courbure de la plaque.

Le principe est d'utiliser pour l'un des métaux un composant « passif », c'est-à-dire ayant un coefficient de dilatation pratiquement négligeable.

Des expérimentations sur les alliages ferro-nickel ont révélé que pour une teneur en nickel de 36 %, le coefficient de dilatation n'est que de $1,5 \cdot 10^{-6}$ par K, tandis que pour une teneur de 20 à 25 % il est 10 fois plus élevé (**figure 2.16**). L'alliage dont la dilatation la plus faible est nommé Invar.

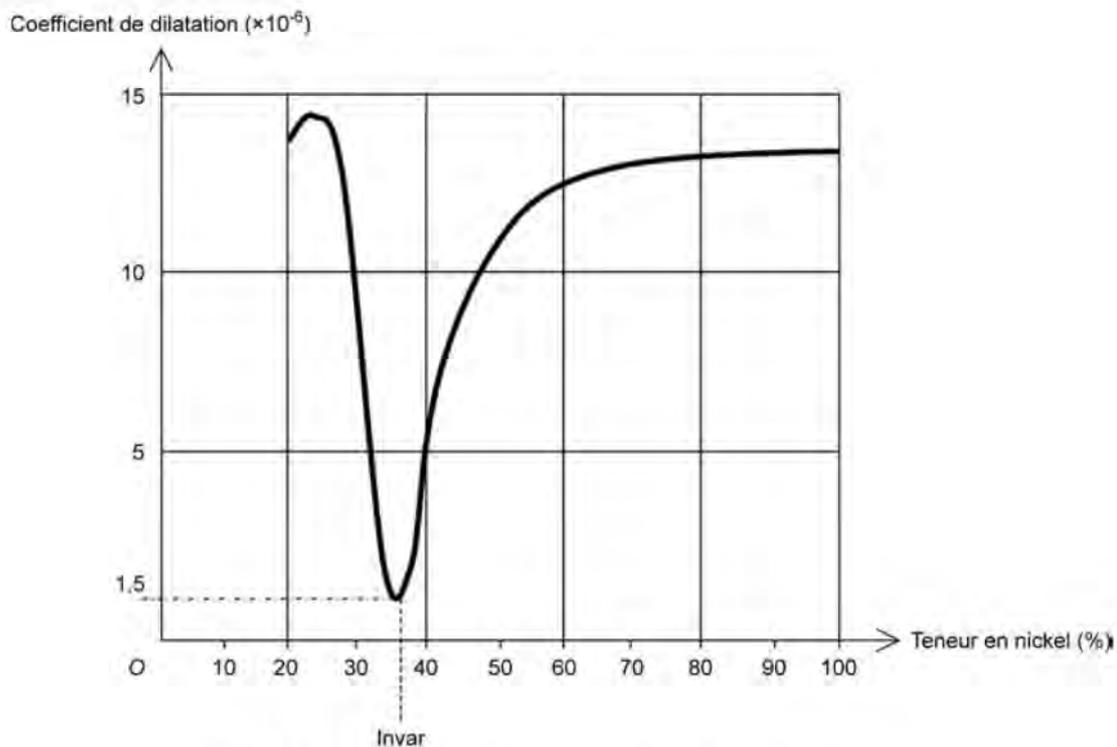


Figure 2.16 – Coefficient de dilatation des alliages ferro-nickel.

2.3.2 Déformation d'un bilame

Un bilame, comme le nom l'indique, est constitué de deux lames étroites soudées par laminage de deux métaux, l'un du type invar, l'autre, en général de type ferro-nickel-manganèse, ayant un fort coefficient de dilatation. Cette lame étant étroite, nous considérerons que la dilatation ne s'opère que dans la seule direction de la longueur.

La connaissance des lois de déformation des bilames est due grâce aux travaux d'Yvon Villarceau en 1863. Il en a établi la relation suivante :

$$\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} = 1,5 \times (\alpha_1 - \alpha_2) \times \frac{\theta}{d}$$

où :

- r_1 : rayon de courbure avant échauffement ;
- r_2 : rayon de courbure après échauffement ;
- $\alpha_1 \alpha_2$: coefficient de dilatation des deux composants ;
- θ : échauffement des bilames ;
- d : épaisseur des bilames.

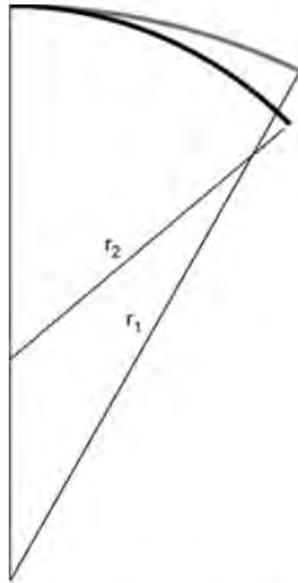


Figure 2.17 – Courbure d'un bilame.

■ Aventurons-nous dans un exemple

Prenons $\theta = 100 \text{ K}$; $d = 0,04 \text{ cm}$; $\alpha_1 - \alpha_2 = 15 \cdot 10^{-6}$;

Supposons enfin le bilame plan à froid, soit $1/r_1 = 0$.

Nous avons alors :

$$1/r_2 = 1,5 \times 15 \cdot 10^{-6} \times 100/0,04 = 0,05625$$

Soit :

$$r_2 = 1/0,05625 = 17,78 \text{ cm}$$

À ce rayon correspond une circonférence de $2 \times \pi \times 17,78 = 111,7 \text{ cm}$.

Supposons que le bilame ait une longueur de 5 cm. Il correspond alors à un arc de cercle de :

$$360 \times 5/111,7 \text{ soit } 16,11^\circ$$

La déviation verticale sera alors de :

$$r_2 \times (1 - \cos(16,11)) \text{ soit } 17,78 \times (1 - 0,96) \text{ soit } \sim 0,7 \text{ cm}$$

Une déviation de 7 mm est tout à fait exploitable.

Ce calcul n'a pour ambition que d'évaluer l'ordre de grandeur de l'amplitude d'une déviation, pour une élévation de température relativement faible.

Les alliages utilisés pour la constitution des bilames sont très proches de ceux des ressorts. En conséquence la déviation appliquée à une force résistante risque de se transformer en déformation élastique. Pour que le bilame ait une force suffisante, son épaisseur et sa largeur doivent être adaptées.

2.3.3 Application des bilames aux relais et déclencheurs thermiques

Le concept est de chauffer les bilames à l'aide d'une résistance parcourue par l'intensité à mesurer. L'élément chauffant peut être le bilame lui-même. Dans ce cas les alliages ferro-nickel ne sont pas de bons conducteurs. La couche active sera constituée d'un alliage avec une certaine teneur en cuivre, ou bien une troisième couche conductrice est appliquée, formant ainsi un « trilame ». Le principe de chauffage direct est celui qui consiste à utiliser le bilame lui-même comme élément chauffant. Le chauffage indirect consiste à disposer à proximité du bilame un élément chauffant (**figure 2.18**).

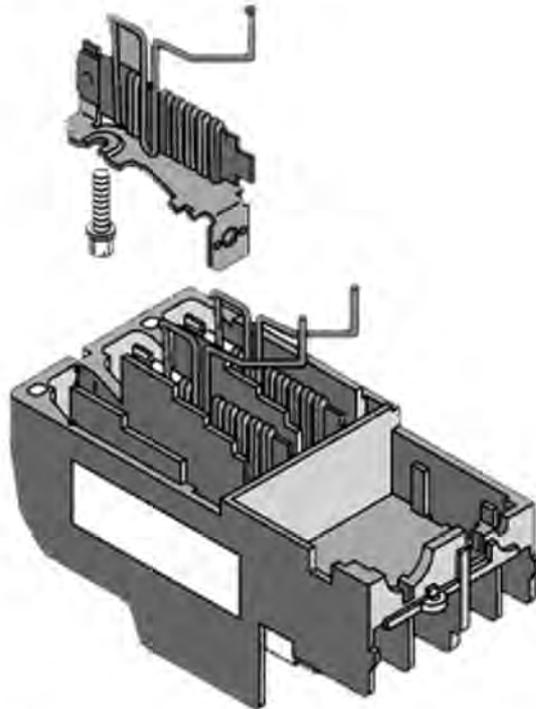


Figure 2.18 – Éléments chauffants des bilames (d'après Télémécanique).

Il est certain que pour une même dimension de relais ou de déclencheur thermique, les bilames devront avoir la même puissance mécanique, donc la même dimension. Mais pour être portés à leur température de fonctionnement pour des intensités différentes, les éléments chauffants devront avoir une valeur de résistance adaptée. Les relais thermiques doivent avoir une caractéristique de fonctionnement à temps inverse. Le temps d'échauffement doit varier de 2 heures pour une faible surintensité, et de quelques secondes pour un courant de 7 fois le courant de réglage. La technique de chauffage peut varier considérablement en fonction de l'intensité et de la force recherchée. Elle combinera l'amélioration ou le retardement de la conduction thermique vers le bilame ; elle favorisera ou freinera la dissipation thermique.

2.3.4 Compensation de la température ambiante

Les bilames prennent une déviation en fonction de la température absolue. Celle-ci est la somme de la température environnante et de l'échauffement procuré par les éléments chauffants.

Il est certain que si la température environnante varie de 20 °C, les valeurs de déclenchement seront perturbées de façon inacceptable. Pour compenser cette influence, l'action de déclenchement est transmise par l'intermédiaire d'un bilame parcouru par aucun courant, appelé bilame de compensation (figure 2.19). Celui-ci sera le siège d'une déviation proportionnelle à la température ambiante.

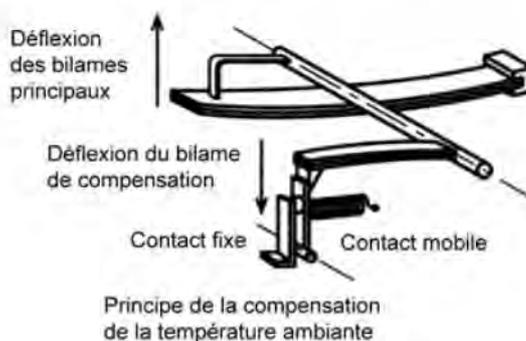


Figure 2.19 – Bilame de compensation (d'après Télémécanique).

La plupart des relais et déclencheurs thermiques sont réglables souvent dans le rapport 0,6 à 1. Ce réglage correspond à des courses différentes des bilames. Pour un réglage haut, la course est maximale et la température requise pour l'atteindre est maximale. Le bilame de compensation de température ne peut pas être adapté à ces écarts de réglage. Un compromis est toujours adopté.

La norme EN 60947-4-1 spécifie que pour une température de référence de 20 °C et pour tous réglages, à 40 °C, le relais ne doit pas déclencher à 100 % I_r (au lieu de 105 %). Mais la limite supérieure reste à 120 %. En cas de température ambiante basse, à -10 °C, le relais doit déclencher avant 130 % (au lieu de 120 %). Autrement dit, l'« imperfection » de correction de température ne doit pas dépasser 0,25 %/K (0,25 % par degré d'élévation de température par rapport à 20 °C pris pour référence). Celle-ci doit toujours tendre vers une protection anticipée.

Les relais thermiques non compensés en température sont admis dans la mesure où la dérive de fonctionnement ne dépasse pas 1,2 %/K. Ils sont aptes à la protection des câbles, car cette dérive correspond à la caractéristique de déclassement des conducteurs isolés au PVC. Mais ils ne peuvent pas être utilisés à la protection des moteurs.

2.3.5 Dispositif de protection contre la marche en monophasé

Ce sujet ne concerne que la protection des moteurs. Des canalisations de distribution en déséquilibre de phases, ne se trouvent pas surchargées. Cependant il faut reconnaître que si un bilame reste froid, il ne contribuera plus à l'apport thermique aux

deux autres. Ces derniers auront tendance à fonctionner pour un courant de déclenchement plus élevé qui ne doit pas dépasser 10 % (soit 1,32 au lieu de 1,20 pour les relais de protection moteurs). Pour un moteur, le problème mérite beaucoup plus d'attention. En effet si un moteur tourne en charge et que survient une coupure de phase, ce moteur chauffera excessivement en raison de l'apparition d'un champ tournant inverse provoqué par cette situation électrique. La plupart du temps l'intensité n'augmente pas dans ces conditions dans des proportions suffisantes pour provoquer un déclenchement.

La norme EN 60947-4-1 qui dans des conditions de régime équilibré demande un déclenchement à une valeur inférieure à $1,2 \times I_r$, en cas de coupure d'une phase, le relais doit déclencher à $1,15 \times I_r$ au maximum¹, au lieu de 1,32, comme expliqué ci-dessus.

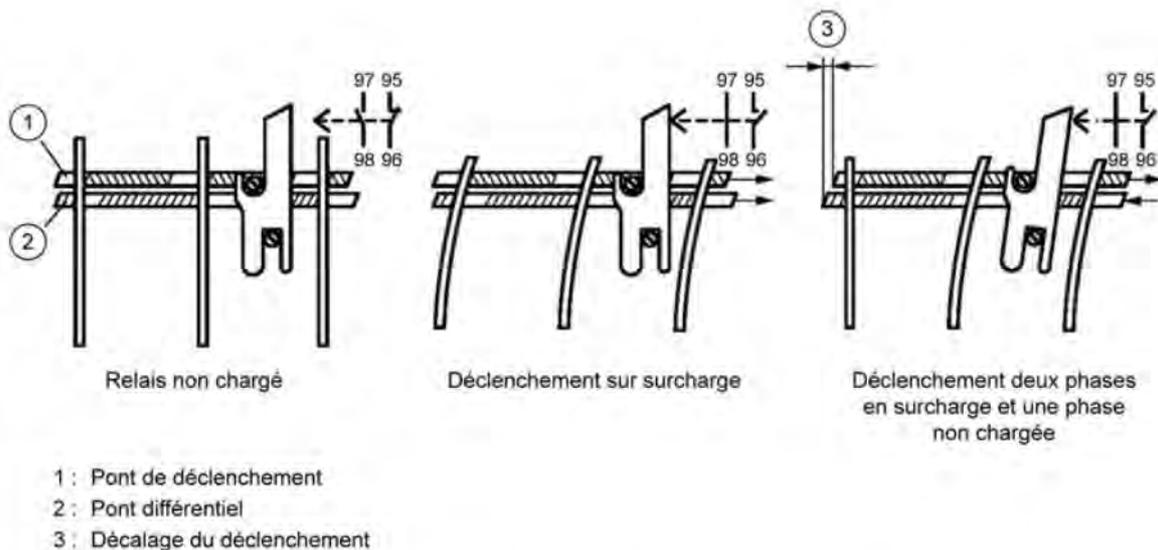


Figure 2.20 – Principe d'un pont de déclenchement différentiel.

Pour cela les constructeurs ont adopté un dispositif de pont de *déclenchement différentiel* (figure 2.20). Le principe de cette construction consiste à ce que le bilame froid provoque une diminution de la course à atteindre. Dans le langage courant de l'électricien ces relais ont quelquefois été nommés « relais thermiques différentiels ». Cette expression a semé quelque ambiguïté, étant donnée la confusion avec les relais de protection contre le courant résiduel.

REMARQUE

Ces relais thermiques équipés d'un dispositif de protection contre la marche en monophasé, protègent de façon légèrement anticipée contre les surcharges. Le temps de fonctionnement peut atteindre une heure. Il ne faut pas confondre cette capacité avec celle ayant pour but d'éviter une inversion du sens de rotation. Ce risque grave est rencontré dans les dispositifs de levage ou les commandes de pompes. D'autres dispositifs de contrôle de tension triphasée et de rotation de phases sont utilisés. Ils ont une action instantanée.

1. EN 60947-4-1, tableau IV.

2.4 Contacteurs

2.4.1 Principe de base

Un électroaimant se compose d'un circuit magnétique sur lequel une bobine produit un champ magnétique. Lorsque la bobine est alimentée par un courant, le circuit exerce une attraction sur toute pièce magnétique.

Appliqué à la commande d'un contacteur, l'électroaimant se compose d'un circuit magnétique comprenant une armature fixe, une armature mobile et une bobine d'excitation solidaire de l'armature fixe.

L'armature mobile est attachée à un pont sur lequel sont montés les pôles mobiles.

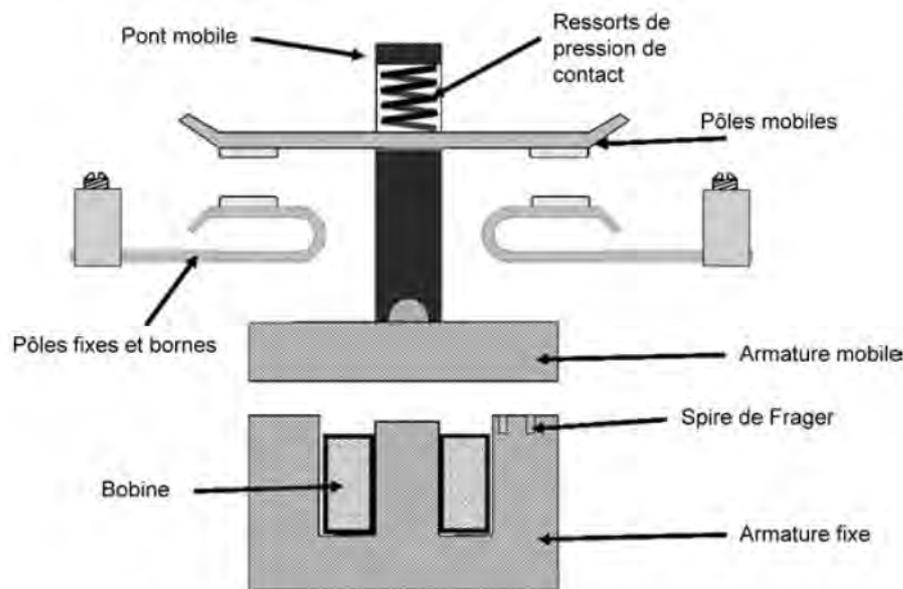


Figure 2.21 – Principaux éléments d'un contacteur.

La **figure 2.21** montre les principaux éléments constitutifs d'un contacteur. Lorsque la bobine est excitée, tout l'équipage mobile est attiré. Les pôles mobiles se ferment en premier, puis l'armature mobile de l'électroaimant colle à l'armature fixe. Entre ces deux événements, un ressort est écrasé, exerçant une pression aux contacts. Cette pression est d'ailleurs nommée « pression de contact », notion importante dans la conception du contacteur. C'est elle qui garantit la qualité de la conductivité des contacts, quelle que soit la précision de position des pastilles de contact ou de leur état de surface. Ceci sera développé plus loin.

■ Force d'attraction d'un électroaimant

Lorsque l'armature mobile est collée à l'armature fixe, la force d'attraction est proportionnelle à la surface et au carré de l'induction.

La force d'attraction est donnée par la formule :

$$F = \frac{1}{2\mu} B^2 \cdot S$$

où :

- μ est la perméabilité magnétique du métal constituant le circuit magnétique ;
- B est l'induction électromagnétique ;
- S est la surface de contact des armatures fixes et mobiles.

Lorsque l'armature mobile est au repos, éloignée de l'armature fixe, le circuit magnétique présente une réluctance bien plus élevée qu'en situation fermée. L'induction en est excessivement réduite.

La distance qui sépare les deux armatures est nommée *entrefer*. Plus l'entrefer est élevé, plus la réluctance est élevée et l'induction faible. Parallèlement, en courant alternatif, armature ouverte, la self, donc la réactance, est assez faible (mais non nulle car ce serait signe d'une induction nulle, donc d'une force attractive nulle). L'impédance étant minimale, à tension constante, le courant est maximal. Cette situation compense la perte d'induction. À l'inverse, armature fermée, la réluctance est minimale, la réactance est maximale, en conséquence le courant est minimal. L'induction, malgré une diminution de l'intensité reste largement suffisante.

En définitive la courbe de la caractéristique de la force attractive en fonction de la distance de l'entrefer $F = f(e)$ prend la forme de la **figure 2.22**.

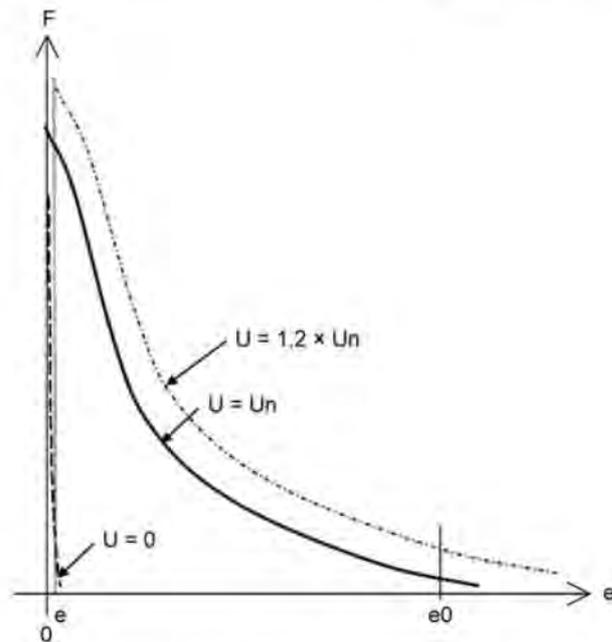


Figure 2.22 – Caractéristique de la force d'attraction d'un électroaimant en fonction de l'entrefer pour une tension constante.

Chaque courbe est exprimée pour une tension constante. Pour une variation de tension, la courbe se déplace dans les deux axes.

Lorsque la tension est nulle, il est possible qu'une induction rémanente subsiste. Si l'entrefer est nul, cette induction peut suffire à maintenir l'armature fermée. Cette situation n'est bien entendu pas acceptable pour la commande d'un contacteur qui risquerait de ne pas s'ouvrir. Pour pallier cette difficulté, les constructeurs utilisent deux solutions.

□ **Circuit magnétique en « E »**

L'armature fixe a trois branches, la bobine entoure la branche médiane (**figure 2.23**). Cette dernière est usinée de telle façon qu'en situation fermée, un entrefer soit maintenu. Comme il est développé en fin d'ouvrage, un entrefer suffisamment élevé assure une longévité mécanique élevée de l'électroaimant, mais augmente sensiblement le courant de la bobine au maintien, nécessitant un dimensionnement en conséquence.

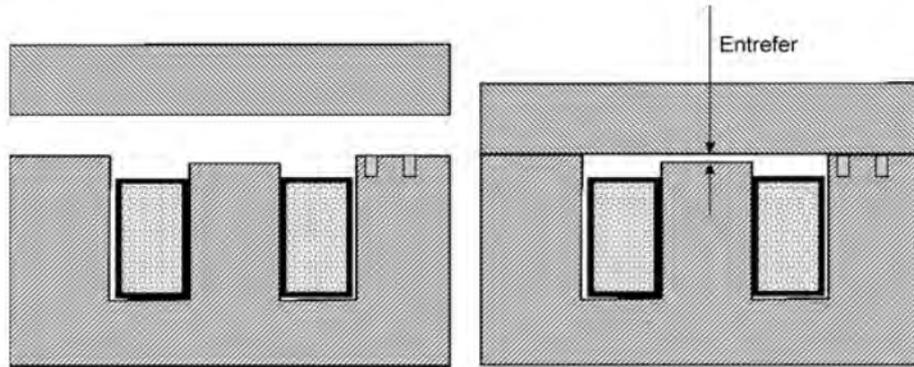


Figure 2.23 – Principe d'un circuit magnétique en « E ».

□ **Circuit magnétique en « U »**

Cette solution utilise un entrefer indépendant de la « zone de frappe ». La bobine peut être simple ou double (**figure 2.24**). Dans le deuxième cas pour le même nombre d'ampères-tours, la bobine peut être plus plate.

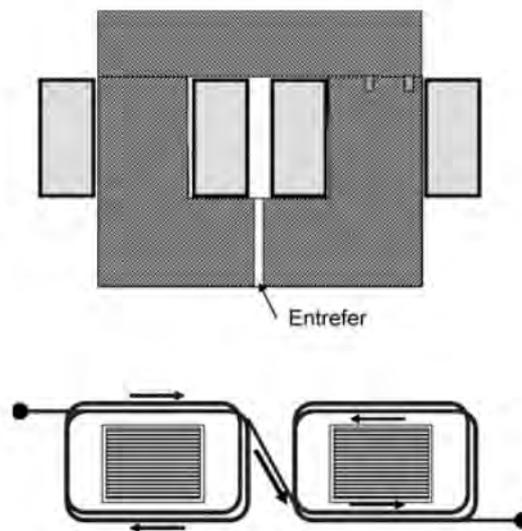


Figure 2.24 – Circuit magnétique en « U ».

Bien que cette disposition apporte de nombreux avantages, son coût de fabrication l'exclut des contacteurs et contacteurs auxiliaires de petites puissances. Il faut retenir

le fait que les contacteurs de puissance d'emploi jusqu'à 7,5 kW représentent plus de 80 % du marché des contacteurs. La concurrence est très vive. Les prix pratiqués ne justifient pas la recherche de longévités extrêmes. Les armatures disposées en « U » sont principalement utilisées pour des contacteurs de grande puissance d'emploi.

■ Electroaimants à bobine alimentée en courant alternatif

Alimentée en courant alternatif, une bobine génère dans le circuit magnétique un flux alternatif. La variation de ce dernier génère des courants induits au cœur des armatures, appelés courants de Foucault. Ces courants, outre le fait de tendre à s'opposer à la variation de flux, ce qui engendrerait une diminution de l'efficacité, échaufferaient de façon inacceptable les armatures.

Les courants de Foucault ont un parcours circulaire, dans un plan perpendiculaire à la direction du flux. Pour empêcher cette circulation de courant, les circuits magnétiques sont constitués de tôles empilées, isolées les unes des autres par un fin film isolant.

Nous avons expliqué la nécessité d'obtenir qu'à tension nulle, l'électroaimant doit s'ouvrir de façon sûre. Mais en courant alternatif, la tension est nulle deux fois par période. Ceci entraînerait, au mieux un ronflement à 100 Hz (pour une fréquence 50 Hz) qui est un son grave parfaitement audible. (*C'est le même son qu'on entend à proximité des postes de transformation EDF dans nos quartiers.*) Ce ronflement serait associé à une perte d'énergie, donc à un échauffement. Mais le pire qui reste complètement plausible est que l'électroaimant soit entraîné dans un mouvement vibratoire à 100 Hz. Cette situation est totalement inadmissible. Une des solutions pour contourner ce problème est de redresser le courant pour le convertir en courant continu. Cette solution est en principe exclue pour des raisons économiques pour les petits contacteurs.

Une autre solution est de disposer juste au niveau du plan de contact entre les deux armatures, une bague conductrice en cuivre ou aluminium appelée *spire de Frager* (**figure 2.25**). Le principe de cette bague est d'utiliser profitablement des courants de Foucault. La variation de flux provoque un courant induit dont le maximum d'amplitude se produit lorsque $d\Phi/dt$ est maximum, c'est-à-dire lorsque Φ est nul.

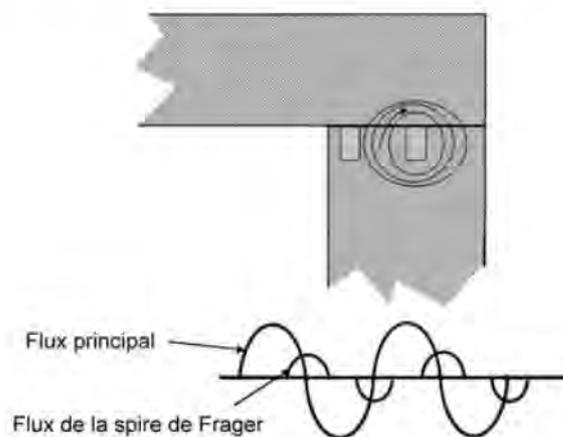


Figure 2.25 – Principe de la spire de Frager. Le flux résultant n'est jamais nul.

■ Couplages entre les forces motrices et forces résistantes des pôles

Après avoir décrit la caractéristique liant la force de l'électroaimant en fonction de l'entrefer, nous superposerons celle des forces résistantes constituées essentiellement par les ressorts du contacteur.

Un premier jeu de ressorts maintient l'équipage mobile en position ouverte, il évite tout mouvement intempestif et oblige à ce que la tension de commande ait une valeur minimale pour débiter le processus de fermeture.

Un deuxième jeu de ressorts a pour rôle d'exercer une pression de contact suffisamment forte afin d'assurer une conductivité suffisante (voir la **figure 2.21**). La force motrice doit alors être suffisante pour continuer la course en écrasant les ressorts de pression de contact, jusqu'à la fermeture finale de l'armature.

Deux propriétés importantes signifient l'aptitude d'un contacteur à assurer sa fonction quelle que soit la variation de la tension de commande. Celles-ci sont illustrées par la **figure 2.26**.

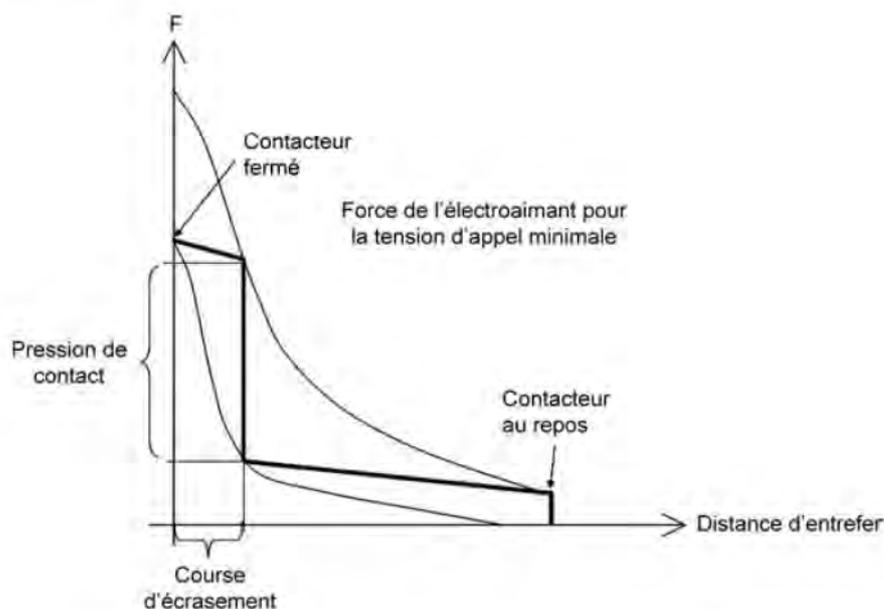


Figure 2.26 – Diagramme de fonctionnement d'un contacteur conforme.

Imaginons de varier l'excitation de la bobine en montant progressivement la tension d'alimentation. Lorsque l'équipage mobile commence le processus de fermeture, celui-ci doit s'opérer totalement. De même si, le contacteur étant fermé, la tension de bobine diminue, l'équipage mobile doit « tomber » jusqu'à la position de repos. La **figure 2.27** illustre deux cas de graves dysfonctionnements. La partie gauche décrit une situation où pour la tension minimale d'appel, un état d'équilibre s'établit. Les pôles se ferment, mais la force d'appel n'est pas suffisante pour vaincre la force des ressorts de pression de contact. Inmanquablement le contacteur s'établit dans un fonctionnement instable, les pôles fonctionnent « en sonnette ». Nous pouvons

aisément imaginer le résultat catastrophique d'une commande de démarrage de moteur dans de telles conditions. La partie droite de la figure décrit une situation où un tel point d'équilibre instable s'établit lors de l'ouverture du contacteur pour la tension maximale de retombée.

Pour éviter de tels défauts il faut soit diminuer la pression de contact, mais au prix de diminuer l'intensité d'emploi, soit allonger l'entrefer au repos, mais au prix de nécessiter une puissance d'appel plus importante donc des dimensions de bobine et de circuit magnétique plus importantes.

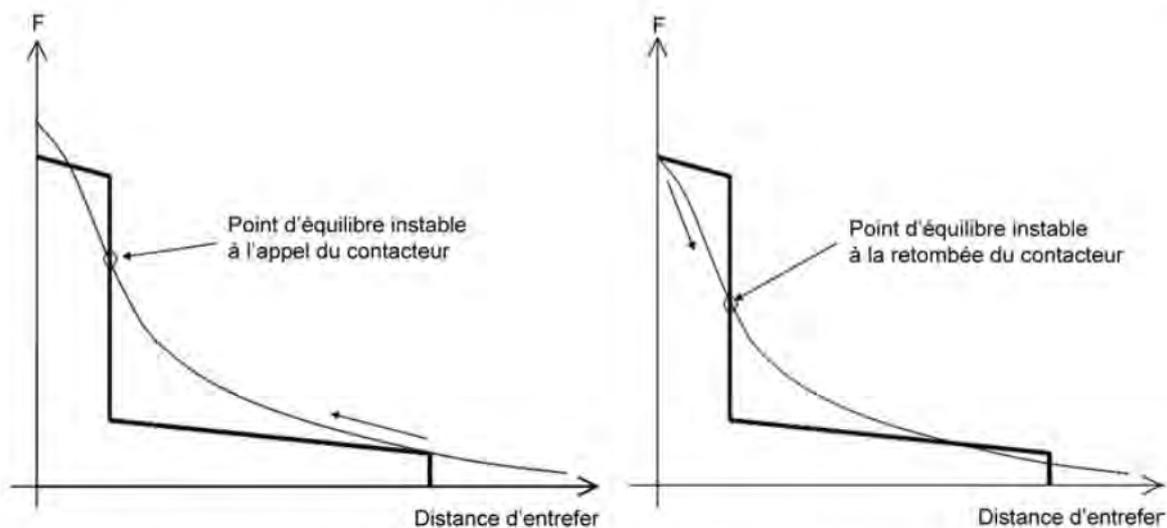


Figure 2.27 – Cas de contacteurs inaptes à un fonctionnement correct.

Nous supposons que les constructeurs maîtrisent ces conceptions. Toutefois il existe parfois des fabrications exotiques qui peuvent présenter ces graves défauts. Malgré tout pour des appareils tout à fait conformes, de telles situations peuvent apparaître.

En effet, si le contacteur est monté « tête en bas » le poids de l'équipage mobile s'ajoute à la force des ressorts. Il est alors possible de trouver la situation de la **figure 2.27** à gauche. De même si le contacteur est monté « tête en haut », le poids de l'équipage mobile tend à retarder l'ouverture du contacteur.

Autre cas aggravant : Le contacteur est équipé de contacts auxiliaires, leur pression de contact s'ajoute à celle des pôles. Si le nombre de contacts auxiliaires dépasse la configuration maximale prévue par le constructeur, la situation de gauche de la **figure 2.27** peut s'établir.

Ces explications justifient les limites d'utilisation définies par les constructeurs, concernant leur position de montage ou le nombre d'auxiliaires admis.

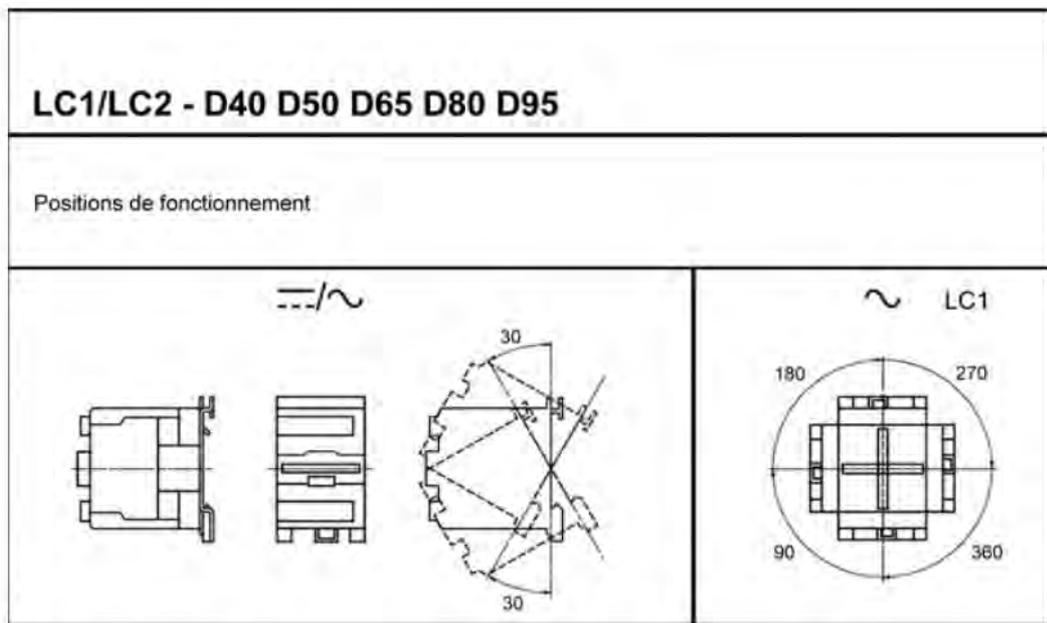


Figure 2.28 – Exemple d'instruction de position de montage de contacteurs (d'après Schneider Electric).

□ Pouvoir de fermeture

Les explications ci-dessus montrent que la fermeture des contacts est brusque, cependant les contacts mobiles sont entraînés par l'intermédiaire de ressorts. Cette configuration mécanique est « idéale » pour générer un mouvement vibratoire. Celui-ci ne manque pas de se produire ; les pôles rebondissent à leur fermeture. Ce mouvement n'est perceptible qu'avec des instruments de mesure ou de visualisation spécifique, mais est bien réel. Il est la cause essentielle de limitation du pouvoir de fermeture. L'atténuation de ces rebondissements est procurée par des dispositifs amortisseurs.

Pour les contacteurs de forte puissance d'emploi, les pressions de contacts doivent être très importantes et la masse des équipages mobiles devient particulièrement lourde. Les solutions décrites demandent des énergies importantes. Le choc à la fermeture devient assez violent, entraînant des vibrations dommageables pour les appareils voisins et limitant considérablement le pouvoir de fermeture. Pour cette raison les constructeurs tendent maintenant à asservir la commande des bobines à l'aide de modules électroniques. La bobine est commandée en courant continu, son courant est contrôlé pendant tout le processus de fermeture. Les pôles sont fermés avec plus de douceur, évitant ainsi les rebondissements ; le pouvoir de fermeture est de ce fait significativement amélioré, tout en gardant une puissance d'appel et de maintien très modeste.

■ Plaquettes de contacts des pôles

Il est utile de signaler que les plaquettes de contacts pour les contacteurs de forte puissance représentent une part considérable du coût de fabrication. Certains fabricants peuvent d'ailleurs être tentés d'économiser sur leurs dimensions ou leur qualité.

Les plaquettes à très forte teneur en argent apportent d'excellentes caractéristiques thermiques. Toutefois leurs tenues à l'arc et à la soudure sont plutôt médiocres. De telles plaquettes sont utilisées pour les contacteurs ayant vocation à être utilisés en commande de circuits résistifs, où une intensité thermique importante est recherchée. En revanche des plaquettes constituées de poudre de nickel et d'argent compactées sous très haute pression par « frittage », offrent une très bonne tenue à l'arc et sont presque insoudables. Elles équipent les contacteurs ayant vocation à commander des moteurs dans les catégories d'emploi les plus difficiles et selon un service intensif. Rappelons que ces plaquettes sont faites pour se consommer, leur état de surface n'a aucune signification sur leur usure. Seul leur volume restant est significatif.

2.4.2 Contacts auxiliaires

Sauf exceptions, les contacteurs disposent de contacts auxiliaires. Certains ne comportent que des contacts auxiliaires, ils sont alors nommés « contacteurs auxiliaires ».

Les contacts auxiliaires ont des applications et des conditions d'utilisation les plus diverses :

- commande d'autres contacteurs ou contacteurs auxiliaires ;
- verrouillage interdisant la commande d'autres fonctions ;
- commande de récepteurs associés au fonctionnement de certains moteurs : électrofreins, résistances de préchauffage, éclairage, condensateur de démarrage, etc. ;
- mise sous tension de voyants lumineux ;
- envoi de signal de basse énergie à un automate programmable ou autre module électronique.

Ces contacts peuvent s'inverser à des distances différentes durant la course de l'équipage mobile.

Ils peuvent être **avancés** s'ils s'inversent avant la fermeture des pôles, **simultanés** s'ils s'inversent en même temps que les pôles, ou **retardés** s'ils s'inversent après les pôles, durant la course d'écrasement.

On nomme contacts à fermeture, ceux qui se ferment à l'excitation de la bobine, et à ouverture dans le cas inverse.

La **figure 2.29** représente différentes séquences d'inversion des contacts auxiliaires. Il est utile de noter que les contacts de verrouillage électrique interdisent une action non compatible avec celle qui est engagée. Ils doivent toujours être à ouverture avancée. Ils sont utilisés par exemple dans les inverseurs de marche ou certains démarreurs (étoile triangle par exemple), car si deux contacteurs sont fermés simultanément, un court-circuit est provoqué.

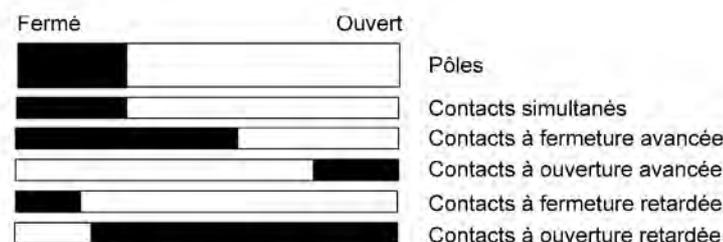


Figure 2.29 – Représentation des séquences de changement d'état des contacts auxiliaires.

Dans les catalogues, les contacts à fermeture sont notés « F ». Ils se ferment lorsque la bobine est excitée. Les pays anglophones les nomment « NO » (*Normally Open*). Les contacts à ouverture sont nommés « O » (« NC » en version anglophone, pour *Normally Closed*). Ils s'ouvrent à l'excitation de la bobine.

Les contacts de verrouillage électrique doivent garantir un très haut niveau de sûreté. Ils ne doivent en aucun cas se trouver fermés en même temps que les pôles. Les constructeurs présentent la notion de *contacts guidés*. Cette conception exige des contacts et guides suffisamment rigides et précis pour assurer que les verrouillages électriques ne se ferment en aucun cas si un des contacts à fermeture, en particulier un pôle reste collé. Cette propriété est importante en commande de machines. Le contact à ouverture, lorsqu'il revient au repos assure que les pôles sont bien ouverts et en bon état ; il autorise la suite de la séquence ou un nouveau cycle de fonctionnement.

■ Courants forts ou courants faibles

Les contacts auxiliaires ont à gérer de multiples situations. La commande de bobines de contacteurs génère des conditions de courants de fermeture et de coupure assez sévères. Un arc est formé à chaque coupure, dégradant les pastilles de contact. Toutefois, pour une tension de commande ≥ 24 V, toute pollution de surface sera traversée par la tension et le courant.

En revanche les contacts peuvent être amenés à commander un signal de très faible intensité. Dans ce cas la qualité de surface doit permettre une conductivité sans faille, quelles que soient les conditions d'utilisation. Une oxydation ou une pollution due à un environnement de fumées ou de « brouillards » d'huiles en suspension, dépose un fin film isolant. La faible tension et le faible courant commandé ne pourront pas « claquer » cet isolant.

Les constructeurs ont conçu diverses dispositions pour pallier cet inconvénient. La **figure 2.30** en illustre quelques-unes :

- les contacts ont une surface strillée dans deux directions croisées (a) ;
- un des contacts présente une pointe (b) ;
- les contacts ont un mouvement de glissement à la fermeture et à l'ouverture, provoquant un nettoyage et une séparation en cas de léger collage (c) ;
- les contacts ont une forme en « H » ou doublés en parallèle, ce qui assure une meilleure probabilité de contact (d).

Tous ces contacts ont la double utilisation de commande de courants faibles ou courants « forts ». Toutefois, après avoir été utilisés en commande de courants forts, ils ne sont plus utilisables en commande de courants faibles.

Certains constructeurs annoncent une valeur de fiabilité de contact. Celle-ci s'exprime en nombre de « ratés », c'est-à-dire de non-contact établi, par million de manœuvres.

Une fiabilité satisfaisante admet une dizaine de ratés par million de manœuvres. Les meilleures configurations ont 2 à 5 ratés par million de manœuvres.

Pour s'affranchir au mieux des conditions d'environnement, des constructeurs ont imaginé d'enfermer chaque contact dans une « cassette » individuelle. D'autres enferment les contacts sous une ampoule de verre, leur commande est assurée par attraction magnétique. Ces solutions ont disparu du marché, car dédiées aux automatismes de machines, elles sont maintenant remplacées par des automates programmables.

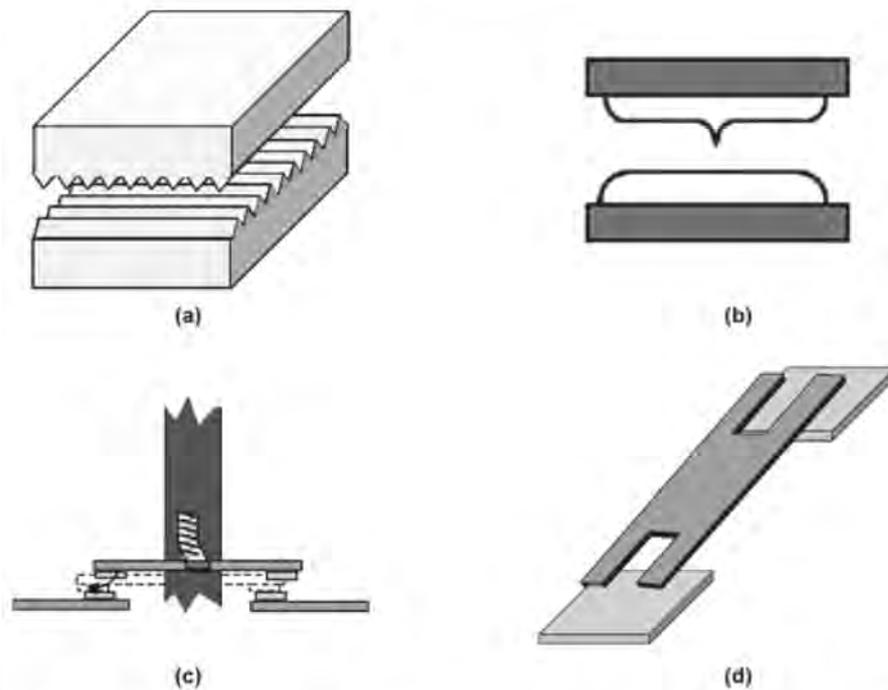


Figure 2.30 – Différentes configurations de contacts aptes à fermer des courants faibles.

On peut comprendre avec ces quelques explications que les contacts de verrouillages qui doivent être liés aux pôles de façon la plus rigide possible, peuvent ne pas être compatibles avec une utilisation correcte pour les courants faibles. Cela est sans importance, car les verrouillages sont considérés comme des commandes de sécurité. Ils ne doivent pas utiliser des circuits électroniques.

2.4.3 Commande des bobines de contacteurs avec des lignes de grandes longueurs

■ Bobine commandée en très basse tension

Considérons un contacteur dont la puissance d'appel soit de 160 VA et dont la bobine a une tension nominale de 24 V, 50 Hz. L'intensité d'appel est de 6,67 A (figure 2.31).

Si la tension minimale d'appel est de 85 % la chute de tension permise est de $24 \times 0,15 = 3,6$ V. La résistance maximale de la ligne de commande est de $3,6/6,67 = 0,54 \Omega$.

Si la section de cette ligne est de $0,75 \text{ mm}^2$ cuivre, la longueur maximale sera de $L_{max} = 0,54 \times 0,75/22,5 \times 1000 = 18$ m de longueur développée (aller et retour), soit 9 m de ligne bifilaire.

On comprend alors les limites de l'utilisation de la tension 24 V. Il est avantageux pour un contacteur d'avoir une tension d'appel inférieure à cette valeur de 85 %. Toutefois la norme EN 609047-4-1 préconise cette limite. Il est bien sûr possible de câbler en section plus importante : $1,5 \text{ mm}^2$ par exemple, ce qui porte la longueur à 18 m. Mais dans de grandes installations cette longueur est encore trop faible.

La solution usuellement pratiquée est de disposer un relais pilote. Ce relais de faible puissance de bobine, installé à proximité du contacteur de forte puissance, est commandé en 24 V. Un de ses contacts alimente la bobine du contacteur, lequel peut être alimenté en 230 V ou même en 24 V car la résistance de son circuit d'alimentation devient faible.

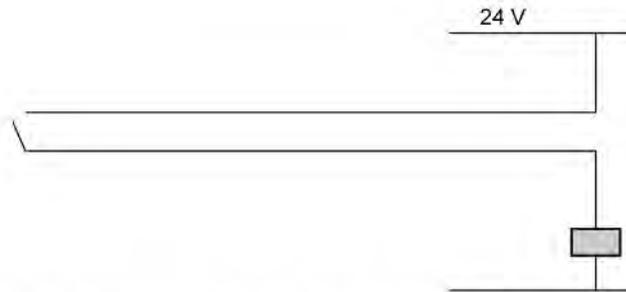


Figure 2.31 – La chute de tension dans la ligne risque d'empêcher le contacteur de fermer.

■ Bobine commandée en tension alternative élevée

Considérons à l'inverse une bobine à faible puissance au maintien, par exemple 2 VA. Supposons cette bobine alimentée en 400 V, 50 Hz (**figure 2.32**). Une ligne bifilaire présente un effet capacitif. La valeur de capacité est de 0,2 $\mu\text{F}/\text{km}$.

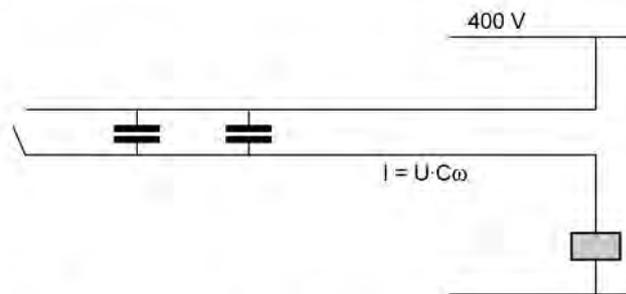


Figure 2.32 – Effet capacitif pour une tension de commande élevée.

Le courant de maintien de la bobine est de $2/400 = 0,005 \text{ A}$.

Si la tension de retombée est de 20 %, le courant de retombée sera de :

$$0,005 \times 0,2 = 0,001 \text{ A}$$

Le courant passant par effet capacitif est de :

$$I = 400 \times C \times 2\pi \times F$$

Soit :

$$I = 400 \times 0,2 \cdot 10^{-6} \times 2 \times 3,14 \times 50 = 25\,120 \cdot 10^{-6} \text{ A/km} = 25,12 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}$$

La longueur maximale est donc :

$$L_{\text{max}} = 0,001/25 \times 12 \cdot 10^6 = 39,8 \text{ m}$$

Il est tout à fait réaliste de rencontrer une telle distance.

Il est possible de se trouver confronté à ce problème à la mise en service d'une installation. Il est alors coûteux de remettre en question tout le système de commande, incluant le changement de bobines. Une solution est de disposer une résistance en parallèle avec chaque bobine afin de charger le circuit et de diminuer le courant de maintien.

En définitive, le concepteur est confronté à deux cas opposés :

- En très basse tension de commande, la chute de tension limite la longueur pour les forts courants d'appel allié à une tension minimale d'appel élevée.
- En tension de commande élevée, une trop faible puissance de maintien limite la longueur de la ligne de commande en raison de leur effet capacitif.
- La tension 110 V est un bon compromis évitant la plupart des cas, au moins jusqu'à des longueurs proches de 200 m.

Sinon, l'utilisation de relais interfaces appelés en 24 V reste une solution universelle.

REMARQUE

Bien sûr, en tension continue, l'effet capacitif n'a pas l'effet décrit pour une tension alternative. Toutefois le courant de décharge peut ralentir le temps de retombée de façon inattendue.

B

Fonctions de base des appareillages électriques

Comme nous l'avons déjà énoncé, le mot « **appareillage électrique** » désigne les matériels ayant une fonction directe sur le comportement, l'installation ou la surveillance des circuits électriques.

L'organisation de cette partie est basée sur le fait que les appareillages proposés par les fabricants ne présentent pas tous les mêmes fonctionnalités. Un interrupteur n'est un sectionneur que si ses caractéristiques répondent à certaines conditions. Il en est de même pour un disjoncteur.

C'est la raison pour laquelle les chapitres qui suivent s'attachent à décrire les fonctions de base des appareillages électriques.

Pour la meilleure compréhension de leur présentation, celles-ci ont été regroupées comme suit :

■ Fonctions de protection

Dans ce chapitre sont traitées les fonctions de mise en sécurité telles que le sectionnement et la consignation, ainsi que les fonctions de protection automatiques telles que la protection contre les courts-circuits, la protection contre les surcharges, la protection des personnes et la protection contre les surtensions.

■ Fonctions de commande

Pour les circuits de puissance, sont présentées les descriptions des interrupteurs, des contacteurs, des démarreurs. Des aspects importants de commande de sécurité et de modes d'arrêts y sont traités. Pour les circuits auxiliaires, sont présentés les propriétés des auxiliaires de commande, et leur rôle en commande de sécurité.

■ Fonctions d'information

Les indications des organes de commande, les couleurs des boutons poussoirs et des voyants sont décrits. Les fonctions de mesures incorporées aux tableaux électriques sont également expliquées dans ce chapitre.

■ Coordination des fonctions

Ce chapitre explique les moyens de coordonner ces différentes fonctions entre elles, afin que les caractéristiques de l'une d'elles, ne diminuent pas les performances d'un ensemble.

3 • FONCTIONS DE PROTECTION

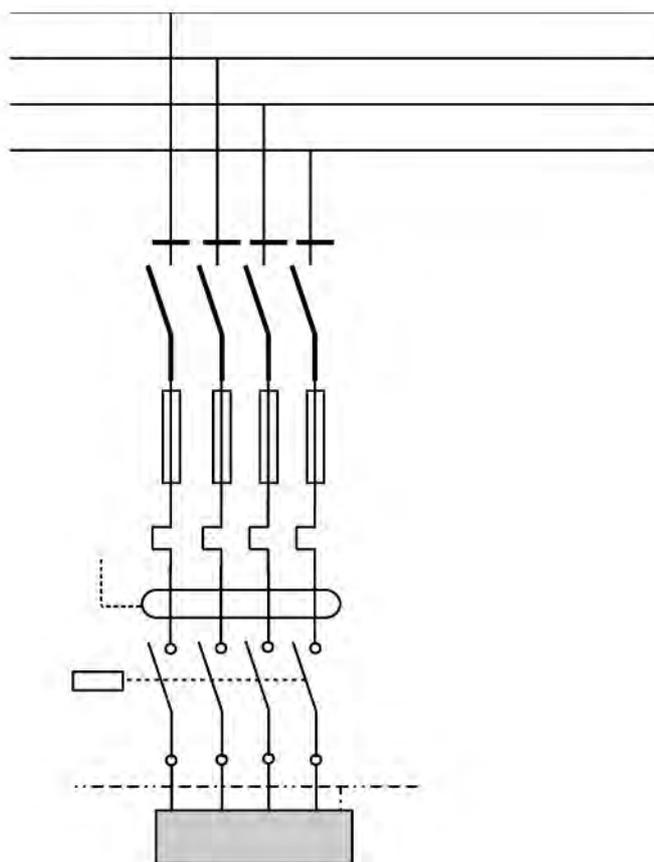


Figure 3.1

3.1 Sectionnement

La fonction de sectionnement est la propriété d'un dispositif de pouvoir séparer de sa source une installation ou une partie d'installation électrique. Cette fonction de sécurité est présentée dans ce chapitre car elle constitue un critère important de sûreté dans la protection des personnes et des biens.

■ Obligation (NF C15-100 et décret du 14-11-1988)

Des dispositifs de sectionnement doivent être prévus pour permettre la séparation d'une installation électrique, de circuits ou d'appareils individuels de leur source

d'alimentation, afin de permettre l'entretien, la vérification, la localisation des défauts et les réparations.

En clair, cela signifie qu'en tête de chaque circuit un dispositif de sectionnement doit être installé. Le dispositif peut être :

- un sectionneur, celui-ci ne possédant pas d'autres fonctions ;
- un interrupteur, un disjoncteur ou tout autre dispositif de séparation, pourvu qu'il ait les propriétés requises qui sont expliquées ci-après.

3.1.1 Description technique de la fonction

La fonction de sectionnement est définie par la norme d'appareillage : EN 60947-3. Cette fonction doit toujours se situer en amont des autres. Elle repose sur deux qualités principales :

- Sûreté de la position « O » : à savoir qu'on ne peut indiquer la position ouverte si et seulement si tous les pôles sont effectivement ouverts. Cette position doit être stable, elle ne doit pas être quittée de façon intempestive.
- En position ouvert, la garantie d'isolement de la partie séparée doit être assurée en toutes circonstances.

La fonction de sectionnement s'applique :

- à des appareils sur lesquels on peut interdire une remise en marche intempestive :
 - sectionneurs,
 - prises de courant,
 - appareils débrochables ;
- à des appareils de coupure :
 - interrupteurs,
 - disjoncteurs,

si leur constructeur en garantit l'aptitude suite aux vérifications qu'il a effectuées, après tous les essais de longévité et/ou de pouvoir de coupure (**figure 3.2**).



Figure 3.2 – Exemple de dispositif de sectionnement (Socomec).

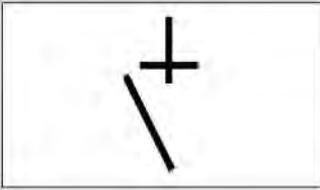
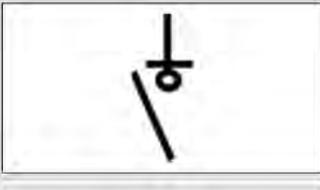
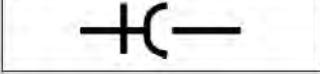
ATTENTION !

- Un contacteur,
 - un variateur de fréquence,
 - un démarreur électronique,
- ne peuvent pas assurer une fonction de sectionnement.

3.1.2 Mise en œuvre des dispositifs de sectionnement**■ Obligations**

- En tête de chaque circuit un dispositif de sectionnement doit être installé.
- Il doit couper tous les conducteurs actifs sauf le PEN.

Tableau 3.1 – Représentations symboliques.

Un appareil ayant l'aptitude à la fonction de sectionnement doit porter le symbole	
Si l'appareil est également un interrupteur, il doit porter le symbole	
Si l'appareil est également un disjoncteur, il doit porter le symbole	
Cas d'un dispositif débrochable	

ATTENTION !

En schéma TN-S, la loi française oblige à sectionner le conducteur neutre. Cela n'est pas le cas pour un grand nombre de pays, tels l'Allemagne, les États-Unis, le Royaume-Uni, la Suisse... Toutefois, dans ces pays, le neutre doit pouvoir être isolé, à des fins de mesure d'isolement, grâce à une barrette dont la réalisation dépend du pays.

■ Consignation

Une consignation consiste à mettre en place, en position ouverte du sectionneur, un dispositif de verrouillage (clef ou cadenas) ayant pour but d'empêcher une mise sous tension sans avoir vérifié toutes les conditions de sécurité (**figure 3.3**).

Les objectifs de sécurité sont soit électriques afin de se prémunir contre tout danger d'électrocution, soit mécanique ou de tout autre ordre, par exemple empêcher la mise en marche intempestive d'un mouvement qui pourrait s'avérer dangereux.

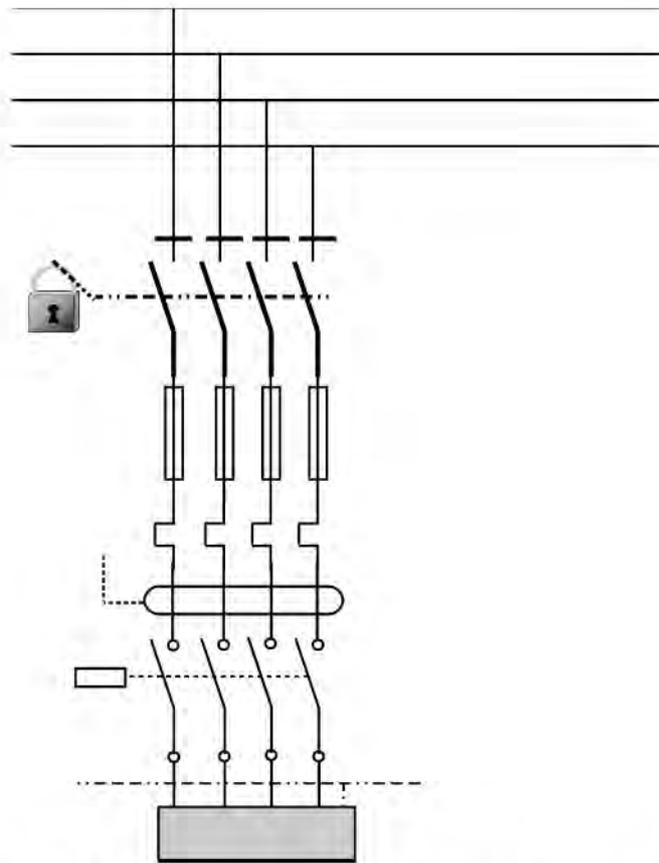


Figure 3.3 – Fonction de sectionnement avec consignation.

On distingue en général :

- Une consignation effectuée par un électricien habilité. Elle s'effectue en principe par un cadenas, lequel peut être accessible à l'intérieur du tableau électrique. Dans ce cas, la pose d'un seul cadenas est possible.
- Une consignation effectuée par un opérateur non électricien. Cette opération ne doit pouvoir se faire qu'à partir d'un ensemble protégé par une enveloppe ou des barrières de degré de protection IPxxB minimum.

VERROUILLAGE PAR TROIS CADENAS

Un appareil verrouillable par trois cadenas peut être consigné par trois « corps de métiers » dont un seul électricien.

Puisque les autres métiers ne sont pas habilités à accéder à l'intérieur d'une armoire électrique, l'accès ne peut être qu'extérieur.

Inversement, il ne faudrait jamais monter à l'intérieur d'un équipement électrique sous enveloppe, un appareil verrouillable par 3 cadenas, ce qui pourrait induire une confusion en semblant permettre à des personnes non habilités d'y accéder. Toutefois cette disposition peut être permise, avec l'appui d'une procédure locale, approuvée par le comité local de sécurité (CHSCT).

■ Évolution de la fonction de sectionnement

Avant la parution et la mise en application des normes CEI-EN 60947, la fonction de sectionnement était définie de façon plutôt imprécise. En particulier on ne pouvait

pas justifier cette propriété pour un interrupteur et surtout pour un disjoncteur. D'ailleurs ils avaient rarement une telle aptitude.

Cette fonction était en effet définie par une simple distance d'isolement. Ce critère n'est plus suffisant pour les appareils industriels et n'est pas adapté aux interrupteurs et disjoncteurs qui doivent maintenir une qualité de séparation suffisante, même après de nombreuses coupures de courants éventuellement élevés.

D'autres raisons sont avancées pour démontrer que la notion de distance est inadaptée. En effet une séparation peut s'effectuer par d'autres moyens que l'introduction d'un espace d'air. La séparation peut s'effectuer sous vide, ou bien sous atmosphère neutre, ou encore par l'introduction d'une pièce isolante entre les contacts. Ces technologies existent ou ont existé, mais pour des raisons de coût ou de fiabilité, elles n'ont pas eu d'applications convaincantes en basse tension.

Les qualités mécaniques, quant à elles, étaient loin d'être assurées. Il a existé des disjoncteurs qui pouvaient être cadencés même si les pôles étaient soudés. Des accidents mortels sont hélas survenus dans de telles conditions. Pour cela il a été inventé des palliatifs tels que les disjoncteurs montés sur des dispositifs débroschables qui ont été conçus comme accessoires et non comme conception de base de l'appareil. Ils devaient assurer la fonction de sectionnement dit à **coupure visible**. Cela entraînait d'autres contraintes assez sévères : un échauffement et un risque de soudure des broches ; des verrouillages compliqués pour assurer un embrochage/débrochage hors charge et la mise en place de capots de protection contre les contacts directs... L'expression **coupure pleinement apparente** a aussi été largement utilisée pendant plusieurs années. Cette *pseudo-caractéristique* signifiait qu'un appareil de coupure indiquait, par la position de sa poignée ou de son indicateur de position, une situation de séparation effective et sûre. Le défaut de cette affirmation est, qu'à l'époque, il n'existait pas d'essai systématique, sur des appareils neufs et sur des appareils en fin de longévité de manœuvres, pour prouver de façon contrôlable cette aptitude.

La **coupure visible** peut elle aussi être apparentée à une *pseudo-caractéristique*. Cette expression souffre hélas d'une ambiguïté de signification. Elle désigne indifféremment la visibilité directe des pôles de coupure ou celle de la position d'un dispositif débroschable.

La norme EN 60947-3 spécifie pour contrôle de la position sectionné, soit une indication sur l'organe de manœuvre soit un indicateur mécanique séparé. En cas d'impossibilité ou d'insuffisance de ces dispositifs, la norme demande que « *tous les contacts principaux soient nettement visibles en position d'ouverture* ».

Appliquée aux disjoncteurs, cette propriété a pour objectif louable de permettre la visibilité directe de la séparation des pôles, cela à l'aide de fenêtres ou de capots transparents. Cette propriété induit quelques questions et objections. Le qualificatif « visible » ne peut être que subjectif, à moins d'avoir accès directement aux pôles, ce qui est incompatible avec les moyens de protections contre les contacts directs, ainsi qu'avec les moyens de coupure de l'arc (chambres de coupure).

La qualité des pôles principaux d'un appareil d'être « nettement visibles en position d'ouverture » dépend de conditions de la mise en œuvre de celui-ci. Un dispositif de sectionnement « à coupure visible » conserve-t-il cette propriété après qu'il ait été installé dans un équipement monté en enveloppe ? En cas d'accident, des problèmes de responsabilité juridiques seraient inévitables. De tels appareils ne

sont pratiquement utilisables que dans des tableaux montés en châssis ouverts, à des fins de laboratoires ou de plateformes d'essais, exploités par des personnels hautement formés.

En revanche, les dispositifs de sectionnement montés en coffret individuels à capot ou fenêtre transparents, conçus et mis en catalogue sous la responsabilité d'un constructeur, peuvent apporter une confiance supplémentaire dans l'indication de la position de séparation.

Toutefois il n'est pas souhaitable que la visibilité de la position des pôles soit proposée comme seul moyen de contrôle. Un indicateur de position I/O ou ON/OFF doit être incorporé. L'indication peut être complétée par des zones rouges et vertes, la zone verte indiquant la position sectionnée. Les interrupteurs-sectionneurs en coffrets sont particulièrement utiles en coupure locale de sécurité, qui est développée plus loin.

Le terme « **coupure visible** » est encore utilisé dans la norme NF C13-100, norme s'appliquant aux postes de livraison d'énergie en haute tension. Il est revendiqué par l'EDF pour séparer les domaines réseau EDF (HT et transformateur) et réseau BT de l'abonné. Cette prescription nourrit l'ambiguïté citée plus haut, car un dispositif débrosable est admis pour avoir cette propriété.

Légalement, rien ne devrait empêcher l'acceptation d'un appareil ayant la propriété de sectionnement, selon EN 60-947-3, garantie par le constructeur, dans des conditions d'utilisation qu'il a défini, pour une fonction de séparation d'une installation de sa source. La propriété de coupure visible est une disposition constructive qui ne devrait pas pouvoir être imposée dans un cahier des charges d'appel d'offres public.

■ Sens d'alimentation

Les premiers sectionneurs étaient des appareils à couteaux à simple coupure (**figure 3.4**).

En raison de leur construction et de leur type de manœuvre et du fait qu'ils ne comportaient aucune protection contre les contacts directs, ces appareils, pendant leur opération, pouvaient un peu trop facilement amener l'opérateur en contact avec la tension du réseau. Beaucoup d'entreprises ont alors exigé que systématiquement la source soit amenée à partir de la partie fixe supérieure de l'appareil.

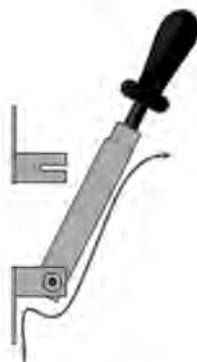


Figure 3.4 – Danger d'alimentation par le bas d'un sectionneur à couteaux.

Cette instruction a perduré et est comprise encore maintenant comme une règle fondamentale de câblage. Des organismes de contrôle ont même encore récemment refusé le câblage d'équipement pour cette raison, sous le motif de « non-conformité ». Les appareils sont maintenant protégés au moins de degré IPxxB¹. Il n'y a plus aucun motif d'imposer un sens à l'alimentation. Toutefois le constructeur d'un appareil peut donner cette instruction par un marquage. Les symboles L1, L2, L3 indiquent les bornes normalement raccordées à la source (**figure 3.5**).



Figure 3.5 – Marquage des bornes sur un interrupteur-sectionneur moderne (Schneider Electric).

■ Position du neutre



Figure 3.6 – Deux disjoncteurs modulaires pour des pays différents (Moeller Electric).

1. IPxxB : voir partie C.

Ce second dinosaure a une vitalité encore plus vigoureuse. Chacun, du monde des fabricants, distributeurs et utilisateurs d'appareillage électrique, est persuadé qu'une norme fondamentale et obligatoire fixe la position du neutre des appareils. L'ordre des phases devrait être obligatoirement « N-L1-L2-L3 ». **Cette norme imaginaire n'a jamais existé.**

L'instruction a probablement pour origine un cahier des charges de l'EDF des premières générations, qui décrivait dans les années 1970 la conception des disjoncteurs d'abonnés en donnant un ordre des phases N-1-2-3. Cet ordre des phases aurait lui-même été basé sur la disposition adoptée des conducteurs des lignes aériennes.

Faute de norme, donc d'accord international, la position du neutre varie selon la destination du pays. De façon brutale, on peut dire que pratiquement seul le marché français impose le neutre à gauche. Ce genre d'« imposition » n'a pas force de loi. Un appareil avec le neutre à droite ne peut en aucun cas être interdit, pourvu que sa position soit clairement identifiée par la lettre N. Le cas se pose surtout pour les petits disjoncteurs destinés à être installés par les nombreux artisans électriciens qui ont appris leur métier par la pratique et la transmission d'une connaissance fondée sur l'habitude.

■ Références normatives

La distinction des domaines d'application : *domaine industriel* ou *domaine domestique*, prend sur ce sujet une importance significative. En effet les deux approches de vérification de la fonction de sectionnement sont nettement différentes, en particulier concernant les méthodes d'essais diélectriques. Il n'est pas opportun de juger ici si telle norme est plus sévère que telle autre. Mais nous insistons sur le fait que les appareils prévus pour un domaine domestique ne convient pas systématiquement pour le domaine industriel, et réciproquement, à moins que le fabricant spécifie explicitement la conformité aux normes concernant ces deux domaines.

□ Domaine industriel

Pour les appareils industriels, la norme EN 60947-1 fournit des caractéristiques de base.

Les essais spécifiques pour les interrupteurs-sectionneurs sont décrits par la norme EN 60947-3, et pour les disjoncteurs, par la norme EN 60947-2.

□ Domaine domestique

Les disjoncteurs domestiques sont définis par la norme EN 60898. Celle-ci décrit de nombreux essais destinés à vérifier l'aptitude de ces appareils à être utilisés pour les usages auxquels ils sont destinés. La norme n'utilise pas l'expression « fonction de sectionnement », mais la norme NF C15-100 précise que les disjoncteurs conformes à celle-ci, disposent de cette propriété.

Il faut bien comprendre que ces appareils sont définis pour un usage sur un réseau domestique. En cas d'utilisation en milieu industriel (par exemple : unité de production, installations en schéma IT, réseau très perturbé, sujets aux surtensions...) les appareils doivent être définis entièrement selon les normes EN 60947.

□ Cas spécifiques

Lorsqu'un dispositif de sectionnement n'est défini par aucune norme spécifique, les vérifications doivent être effectuées selon l'article 536.2 de la norme NF C15-100. Cette description ne pourrait s'appliquer qu'à un matériel ancien en vue de reconnaître ou non son aptitude à la fonction de sectionnement.

■ Critères de vérification de la fonction de sectionnement

□ NF C15-100

Les critères définis par la norme NF C15-100, lorsque aucune norme n'est applicable, sont les suivants :

- l'appareil doit supporter, en position d'ouverture, une tension de choc (U_{imp}^1) dont la valeur est donnée en fonction de la tension nominale de l'installation (voir **tableau 3.2** ci-après) ;
- avoir un courant de fuite inférieur à 0,5 mA pour $U_e + 10\%$ à l'état neuf ou 6 mA pour un appareil en fin de vie.

Tableau 3.2 – Tensions de tenue aux chocs.

Tension nominale de l'installation	Tensions de tenue aux chocs U_{imp} pour les dispositifs de sectionnement
230/400 V	5 kV
400/690 V	8 kV
1 000 V	10 kV

Il est admis que la tension assignée de tenue aux chocs est assurée si les distances d'isolement suivantes sont respectées (NF C15-100) :

- 4 mm pour la tension nominale 230/400 V ;
- 8 mm pour la tension nominale 400/690 V ;
- 11 mm pour la tension nominale 1 000 V.

□ Appareillages industriels

Les normes d'appareillage EN 60947-1, -2 et -3 requièrent des critères plus sévères et surtout plus « ciblées » en fonction des conditions d'utilisation.

Elles définissent la tension de tenue aux chocs en fonction de :

- la tension du réseau ;
- la catégorie de surtension ;
- le mode de liaison à la terre du réseau (schéma de liaison à la terre : SLT).

Nous retiendrons que les quatre catégories de surtension (I, II, III, et IV) s'appliquent à des niveaux d'utilisation définis. (*Cette notion est développée au § 3.6.8.*) En particulier, la catégorie III est affectée aux matériels installés dans des tableaux

1. Voir en annexe la définition de U_{imp} .

de distribution ou armoires de commande de machines, tandis que la catégorie IV est affectée aux matériels installés dans un TGBT proche des sources (transformateurs). Ces documents prescrivent les tensions U_{imp} suivantes (**tableau 3.3**) :

Tableau 3.3 – Valeurs de tension de tenue aux chocs U_{imp} en fonction du lieu d'utilisation.

Tension par rapport à la terre	Catégorie IV Au niveau origine de l'installation ^a	Catégorie III Au niveau d'un tableau divisionnaire
230 V	6 kV	4 kV
400 V	8 kV	6 kV

- a. La norme NF C15-100 reste ambiguë pour spécifier si un TGBT alimenté par une ou plusieurs sources est inclus dans ce niveau.

OBSERVATION

La norme NF C15-100, ainsi que la norme EN 60947-1 affectent une tension d'essai des sectionneurs à 1,25 fois la valeur d'essai d'isolement U_{imp} donnée par le **tableau 3.3**.

Si on applique donc ce facteur 1,25 pour la vérification de la fonction de sectionnement, les valeurs correspondantes sont données par le **tableau 3.4** :

Tableau 3.4 – Valeurs d'essai U_{imp} pour la fonction de sectionnement pour un réseau 230/400 V.^a

SLT	Au niveau origine de l'installation ^b	Au niveau d'un tableau divisionnaire
TN / TT	8 kV	5 kV
IT	10 kV	8 kV

- a. Référence : EN 60947-1 annexe H.
b. La norme NF C15-100 reste ambiguë pour spécifier si un TGBT alimenté par une ou plusieurs sources est inclus dans ce niveau.

En conséquence un dispositif sectionneur qui est marqué avec une valeur U_{imp} de 8 kV, doit avoir subi un essai de contrôle de l'aptitude au sectionnement à une valeur U_{imp} de 10 kV et est apte à être utilisé dans un TGBT en schéma IT. En revanche un appareil sectionneur marqué $U_{imp} = 6$ kV, peut être utilisé pour tous SLT dans un tableau divisionnaire, mais seulement en schéma TN ou TT dans un TGBT.

VÉRIFICATIONS MÉCANIQUES

- Il ne faut en aucun cas que puisse se produire une fermeture intempestive ou une ouverture accidentelle ou non autorisée.
- Un dispositif mécanique doit indiquer clairement la position ouvert, par la lettre « O » et une zone de couleur verte. L'indication de la position ouverte ne doit pas être possible si tous les pôles ne sont pas en position réelle de sectionnement (**figure 3.7**).

- Si l'indicateur mécanique n'est pas possible ou risque d'être détérioré, tous les contacts principaux sont nettement visibles en position d'ouverture.



Figure 3.7 – Indication de position sur la poignée d'un interrupteur-sectionneur (Moeller Electric).

□ Appareillages domestiques

La norme EN 60898, que nous prenons pour référence, prescrit une distance de séparation des pôles de 3 mm (au lieu de 4 mm selon NF C15-100) et une tension d'essai de 2 500 V alternatif, au lieu d'un essai U_{imp} de 5 kV.

Ces informations justifient que les constructeurs doivent donner des caractéristiques supplémentaires pour justifier l'aptitude des petits disjoncteurs à être utilisés en milieu industriel, et en particulier dans un réseau en schéma IT.

■ Autres qualités d'un sectionneur

La fonction de sectionnement proprement dite ne concerne que la qualité de séparation en position « ouvert ». Mais la position ouverte n'a de sens que si l'appareil présente aussi une position fermée. Un sectionneur ne peut avoir que ces deux positions de service : O/I. Il n'a normalement aucune aptitude à établir ou couper un courant. Malgré tout, en position « fermé », le sectionneur doit présenter des qualités suffisantes pour justifier son cadre d'utilisation.

Ces qualités sont principalement :

- échauffement admissible pour une intensité d'emploi assignée ;
- connaissance de la tenue aux surintensités élevées (démarrage moteur et courts-circuits).

■ Intensités d'emploi assignées

Les intensités d'emploi sont définies selon différents critères :

- I_u est l'intensité maximale admissible en service ininterrompu définie par le constructeur, compte tenu des limites d'échauffements admises, à la température de référence de 35 °C.
- I_{th} est l'intensité qui est utilisée pour les essais d'échauffement, matériel nu. La durée peut être limitée à 8 heures.
- I_{the} est l'intensité qui est utilisée pour les essais d'échauffement, matériel sous enveloppe. La durée peut être limitée à 8 heures.

- $I_{cw}(1s)$ est la valeur de courant de court-circuit que le sectionneur peut supporter pendant un temps défini par le constructeur. Ce temps est normalement de 1 seconde.
- I_q^1 est la valeur de courant de court-circuit que le sectionneur peut supporter à condition d'être associé à un dispositif de protection contre les courts-circuits défini par le constructeur.

Caractéristiques (selon CEI 60947-3)

Courant thermique I_m (40°C)	250 A	400 A	630 A	800 A	1250 A	1600 A	1800 A
Tension assignée d'isolement U_i (V)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Tension assignée de tenue aux chocs U_{sm} (kV)	8	12	12	12	12	12	12

Courants assignés d'emploi I_n (A)

Tension assignée	Catégorie d'emploi	A/B ⁽¹⁾	A/B ⁽¹⁾	A/B ⁽¹⁾	A/B ⁽¹⁾	A/B ⁽¹⁾	A/B ⁽¹⁾
400 VAC	AC-22 A / AC-22 B	250/250	400/400	630/630	800/800	1250/1250	1600/1600
	AC-23 A / AC-23 B	250/250	400/400	630/630	630/630	1250/1250	1600/1600
500 VAC	AC-22 A / AC-22 B	250/250	400/400	630/630	800/800	1250/1250	1600/1600
	AC-23 A / AC-23 B	200/250	315/400	500/630	630/630	1000/1000	1250/1250
690 VAC ⁽²⁾	AC-21 A / AC-21 B	250/250	400/400	630/630	800/800	1250/1250	1600/1600
	AC-22 A / AC-22 B	250/250	400/400	500/630	630/800	1000/1000	1250/1250
400 VDC	AC-23 A / AC-23 B	200/250	315/400	400/500	500/500	800/800	1000/1000
	DC-20 A / DC-20 B	250/250	400/400	630/630	800/800	1250/1250	1600/1600
	DC-21 A / DC-21 B	250/250	400/400	630/630	800/800	1250/1250	1600/1600
	DC-22 A / DC-22 B	250/250	400 ⁽³⁾ /400 ⁽³⁾	630 ⁽³⁾ /630 ⁽³⁾	800 ⁽³⁾ /800 ⁽³⁾	1250 ⁽³⁾ /1250 ⁽³⁾	1600 ⁽³⁾ /1600 ⁽³⁾
	DC-23 A / DC-23 B	200/250	315 ⁽³⁾ /400 ⁽³⁾	500 ⁽³⁾ /630 ⁽³⁾	630 ⁽³⁾ /800 ⁽³⁾	1250 ⁽³⁾ /1250 ⁽³⁾	1250 ⁽³⁾ /1250 ⁽³⁾

Puissance Moteur en AC-23 (kW)⁽⁴⁾⁽⁵⁾

400 VAC sans CA de précoupure	132/132	220/220	355/355	355/355	710/710	900/900	900/900
690 VAC sans CA de précoupure	185/220	295/400	400/475	475/475	750/750	900/900	900/900

Puissance réactive (kvar)⁽⁶⁾

À 400 VAC	115	185	290	365	575	-	-
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	---	---

Courant assigné de court-circuit conditionnel avec fusible gG DIN⁽⁶⁾

Courant de court-circuit présumé (kA eff.)	100	100	100	100	100	120	120
Calibre du fusible associé (A)	250	400	630	800	1250	2 x 800	2 x 900

Fonctionnement en court-circuit

Courant assigné de courte durée admissible (0,3 s.) I_{cs} (kA eff.)	17	25	50	65	65	80	80
Tenue dynamique en Icc (kA crête) ⁽⁶⁾	30	45	55	80	100	120	120

Raccordement

Section minimale câbles Cu (mm ²)	95	185	2 x 150	2 x 185	-	-	4 x 240
Section minimale barre Cu (mm ²)	-	-	2 x 30 x 5	2 x 40 x 5	2 x 60 x 5	2 x 80 x 5	-
Section maximale câbles Cu (mm ²)	240	240	2 x 300	2 x 300	4 x 185	6 x 240	8 x 240
Largeur maximale barre Cu (mm)	40	40	50	63	100	100	100
Couple de serrage mini (Nm)	20	40	40		20	40	40

Caractéristiques mécaniques

Durabilité (nombre de cycles de manœuvres)	8 000	8 000	5 000	5 000	5 000	3 000	3 000
Masse d'un appareil en 3 pôles (kg)	6,5	7	8	11	14	19	21
Masse d'un appareil en 4 pôles (kg)	7,5	8	9,5	13	16	21,5	23,5

(1) Catégorie avec indice A = manœuvres fréquentes / Catégorie avec indice B = manœuvres non fréquentes.

(2) Avec cache-bornes ou écran de séparation de plages.

(3) Pôles non juxtaposés.

(4) Appareil 4 pôles avec 2 pôles en série par polarité.

(5) La valeur de puissance est donnée à titre indicatif, les valeurs de courant varient d'un constructeur à l'autre.

(6) Pour une tension assignée d'emploi $U_i = 400$ VAC.

Figure 3.8 – Exemple de caractéristiques de catalogue (d'après Socomec).

1. L'appellation symbolique I_q est utilisée dans la norme EN 634-947-4-1 à propos des contacteurs.

Les interrupteurs sectionneurs doivent bien sûr répondre à ces caractéristiques, mais doivent en plus assurer leur aptitude à établir et couper un courant électrique dans des conditions définies.

Ces caractéristiques sont précisées au chapitre 4.

3.2 Protection contre les courts-circuits

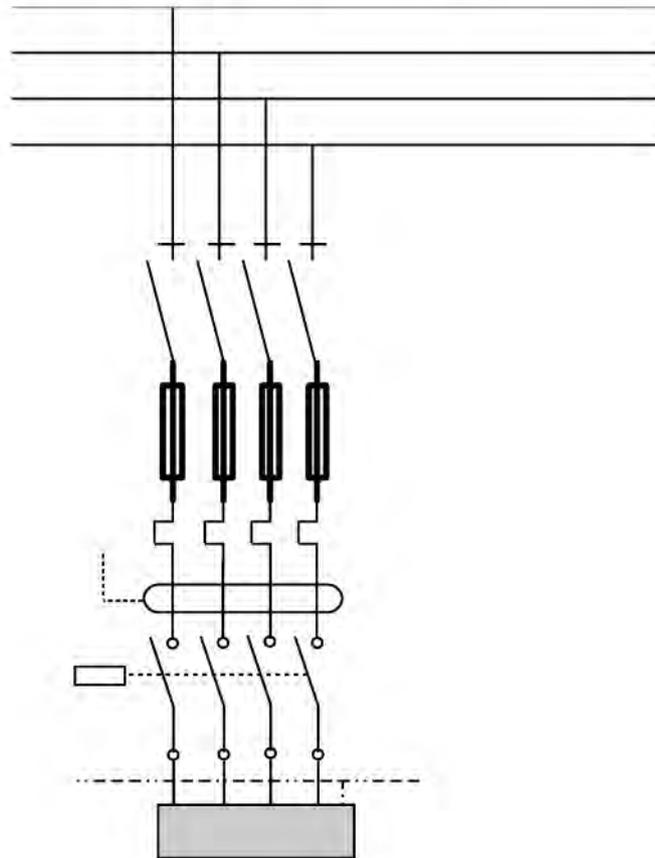


Figure 3.9

Un courant de court-circuit est défini par la norme NF C15-100 comme « une surintensité produite par un défaut ayant une impédance négligeable entre des conducteurs actifs présentant une différence de potentiel en service normal. »

Cette surintensité peut prendre une valeur très élevée que ne peuvent supporter très longtemps les parties conductrices parcourues par ce courant.

Il est essentiel de se souvenir que, selon la norme, un court-circuit est toujours considéré comme « parfait », c'est-à-dire que s'il est provoqué par un défaut entre deux conducteurs, ce défaut a une impédance nulle ; aucune résistance de contact ni arc électrique n'est observable.

Dans un premier temps nous décrirons les effets des courants de courts-circuits sur les câbles et les jeux de barres.

Puis nous décrirons les propriétés des appareils de protection qui, à ce jour restent essentiellement les fusibles et les disjoncteurs, ainsi que leurs règles de sélection.

3.2.1 Protection des câbles contre les courts-circuits

En cas de court-circuit, la tension du réseau s'exerce sur les seuls conducteurs. Leur impédance totale a une valeur souvent de l'ordre de la centaine, voire de la dizaine de $m\Omega$. Si la tension du réseau est 230 ou 400 V, le courant produit aura une valeur de l'ordre du kA, voire de la dizaine de kA.

L'énergie développée par le courant est :

$$E = R \times I^2 t$$

Pour un conducteur de section $S(\text{mm}^2)$ et de longueur $L(\text{m})$ la résistance R est égale à :

$$R = \rho \times L/S$$

L'expression peut donc s'écrire :

$$E = \rho \times L/S \times I^2 t$$

- ρ : résistivité du conducteur ;
- L : longueur ;
- S : section.

Cette énergie va rapidement élever la température du conducteur. Dans un premier temps il n'y aura pas de dissipation de chaleur. On dit que cet échange d'énergie se fait de manière « adiabatique ».

Si le conducteur (cuivre en général) a une capacité calorifique spécifique c , l'énergie reçue sera de :

$$E = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

La masse du conducteur est, si sa masse spécifique est d :

$$m = d \times S \times L$$

On peut donc écrire :

$$E = d \times S \times L \times c \cdot (t_2 - t_1)$$

Si on rapproche l'énergie produite de l'énergie reçue (qui sont égales dans ce cas d'échange adiabatique) on a :

$$\rho \times L/S \times I^2 t = d \times S \times L \times c \cdot (t_2 - t_1)$$

L'égalité devient indépendante de la longueur et peut s'écrire :

$$I^2 t = (d \times c \cdot (t_2 - t_1) / \rho) \times S^2$$

- d est la masse spécifique du conducteur (cuivre par ex.) ;
- c est la capacité calorifique spécifique du conducteur (cuivre) ;
- ρ est la résistivité du conducteur ;
- t_1 est la température initiale du conducteur. Celle-ci dépend du type de câble et de ses conditions d'utilisation initiales ;
- t_2 est la température finale, au bout du temps t .

Les matières isolantes des câbles sont en PVC ou autres matériaux. Elles ont une limite de température au-delà de laquelle une dégradation devient sensible. Si cette température est représentée par t_2 , la valeur $t_2 - t_1$ ne dépend que de l'isolant.

Si on affecte la valeur :

$$K^2 = (d \times c \cdot (t_2 - t_1) / \rho)$$

notre expression devient :

$$I^2 t = K^2 \times S^2$$

Tableau 3.5 – Quelques valeurs de K .

Matière	Isolant	Température initiale	Température limite	K
Cuivre	PVC	70 °C	160 °C	115
Cuivre	PVC	90 °C	160 °C	100
Cuivre	PR/EPR	90 °C	250 °C	143
Aluminium	PVC	70 °C	160 °C	76
Aluminium	PVC	90 °C	160 °C	66
Aluminium	PR/EPR	90 °C	250 °C	94

Le coefficient K (tableau 3.5) représente une limite. Il dépend de la matière du conducteur et du type d'isolant. Il convient donc d'écrire la règle :

$$I^2 t < K^2 \times S^2$$

Cette règle peut s'écrire également sous la forme :

$$\sqrt{t} < K \times S / I$$

Les coefficients K supposent que les intensités soient exprimées en ampères, les sections en mm^2 et les temps en secondes.

■ Exemples d'application

□ Cas 1

Considérons un câble type U1000R02V, dont l'isolant est de type PR, de section 95 mm^2 . Le coefficient K est de 143. Quel est le temps maximum de coupure pour un courant de court-circuit de 45 000 A ?

Réponse :

$$t = (K \times S / I)^2$$

soit $t = (143 \times 95 / 45\,000)^2$

ou $t = 0,091 \text{ s}$, soit 91 ms.

Un disjoncteur dont le temps de fonctionnement n'excéderait pas 90 ms conviendrait pour la protection de ce câble. Ce qui est le cas pour tous les disjoncteurs, même pour ceux dont le « déclencheur à court retard » présenterait un temps de fonctionnement inférieur à cette valeur.

□ **Cas 2**

Considérons un câble type H07V..., dont l'isolant est de type PVC, de section $2,5 \text{ mm}^2$. Le coefficient K est de 115. Quel est le temps maximum de coupure pour un courant de court-circuit de $20\,000 \text{ A}$?

Réponse : la formule

$$t = (K \times S / I)^2$$

donne pour ces valeurs : $(115 \times 2,5 / 20\,000)^2 = 0,0002 \text{ s}$, soit $0,2 \text{ ms}$!

Si on réalise que le temps d'une demi-alternance de courant à 50 Hz est de 10 ms (**figure 3.10**), et que le temps de coupure d'un bon disjoncteur « normal » est d'environ 10 à 20 ms , on comprend qu'un autre type de raisonnement et de solutions doit être envisagé. **Un dispositif limiteur doit être utilisé.**

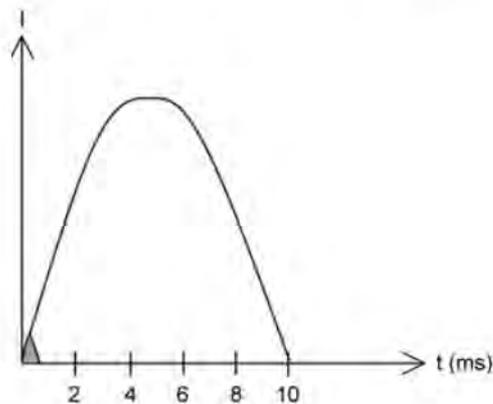


Figure 3.10 – Représentation d'un courant coupé.

Un dispositif limiteur doit couper un courant de court-circuit en un temps inférieur à 5 ms . Les fusibles offrent cette propriété, à condition qu'ils soient calibrés de façon adaptée. En revanche, les disjoncteurs ne peuvent pas atteindre ce temps par leur disposition électromécanique classique. Ils doivent être conçus selon d'autres principes. Ceux-ci sont décrits en partie A, chapitre 2.

■ **Dispositifs de protection contre les courts-circuits (DPCC)**

La courbe de fonctionnement d'un DPCC représente la variation du temps de fonctionnement en fonction du courant qui lui est appliqué $t = f(I)$.

I est exprimé en courant efficace. Cette courbe doit représenter des temps très courts pour des courants très élevés, et des temps très longs pour de faibles surintensités. C'est pourquoi une échelle logarithmique est utilisée pour les représenter. Chaque division représente un multiple du courant de réglage ou du calibre (fusible).

La **figure 3.11** montre les courbes typiques d'un fusible type gG et un disjoncteur 100 A . Pour le présent nous nous en tiendrons à observer leurs caractéristiques dans la zone des très forts courants. On observe qu'à calibre égal, le fusible est, dans cette zone, sensiblement plus rapide que le disjoncteur.

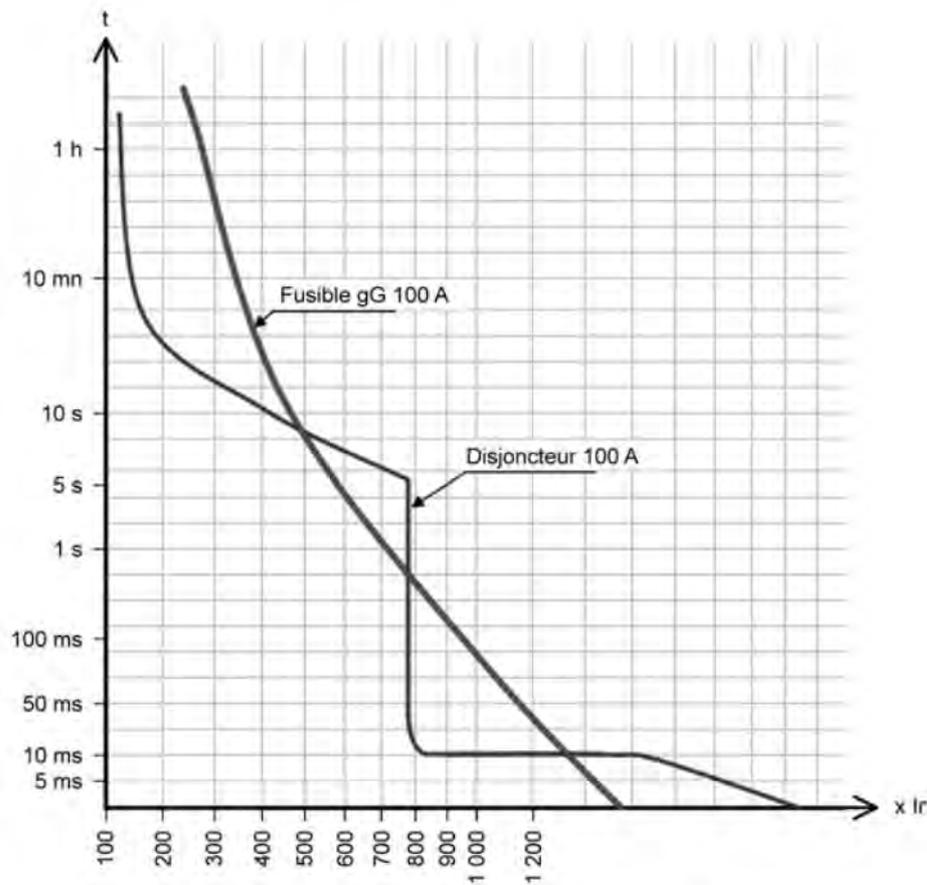


Figure 3.11 – Courbes caractéristiques d'un fusible et d'un disjoncteur de même intensité d'emploi.

■ Contrainte thermique passante

Pour un temps de fonctionnement inférieur à 10 ms, le courant ne suit plus une sinusoïde. On ne peut plus vraiment parler de « courant efficace ». Pour cette raison les constructeurs utilisent la valeur I^2t ou plutôt la valeur totale de $\int i^2 dt$. Cette valeur est appelée « contrainte thermique passante ». Elle est exprimée également sous forme de courbe, en échelle logarithmique, en A^2s en fonction d'un courant de court-circuit présumé en kA_{eff} (figure 3.12).

■ Application de la contrainte thermique passante

Dans l'exemple précédent (cas n° 2), nous avons vu que pour un courant de court-circuit de $20 kA_{eff}$, un fil de cuivre isolé au PVC de $2,5 \text{ mm}^2$ de section ne peut pas supporter une valeur I^2t supérieure à K^2S^2 , soit :

$$115^2 \times 2,5^2 = 8,27 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$$

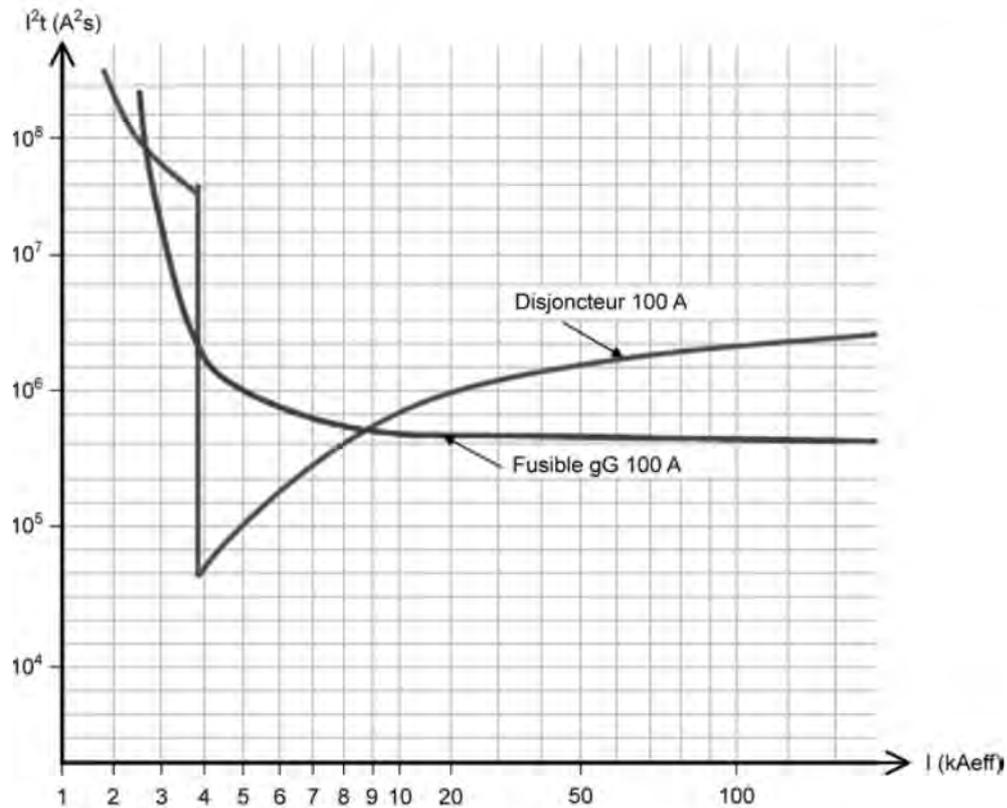


Figure 3.12

En utilisant les courbes de la **figure 3.13**, si on superpose une ligne horizontale d'ordonnée $I^2t = 8,26 \times 10^4$ au réseau de courbes de différents calibres de disjoncteurs (A et B), ou de fusibles (C), on peut sélectionner les appareils laissant passer une contrainte thermique inférieure à cette valeur. On observe dans l'exemple de la figure de gauche (courbe fictive mais représentative de disjoncteurs peu limités) que tous les disjoncteurs d'intensité inférieure à 32 A conviennent. Pour les modèles de disjoncteurs de la courbe B, tous les appareils conviennent, seulement ils n'ont pas un pouvoir de coupure de 20 kAeff. Enfin tous les fusibles jusqu'à 80 A conviennent.

Pour mémoire, l'intensité admissible pour un fil isolé de $2,5 \text{ mm}^2$ ne dépasse jamais 30 A.

□ Que peut-on conclure ?

Les exemples ci-dessus, démontrent que si un disjoncteur ou un fusible est calibré selon l'intensité admissible par un conducteur, la protection contre les courts-circuits est toujours assurée par les appareils conformes aux normes actuelles. En revanche, si le DPCC est destiné uniquement à protéger contre les courts-circuits, cette vérification doit être effectuée.

REMARQUE

La valeur de courant à prendre en considération est la valeur maximale du courant de court-circuit présumé en bout de ligne (**figure 3.14**).

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le
 © Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus
 aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

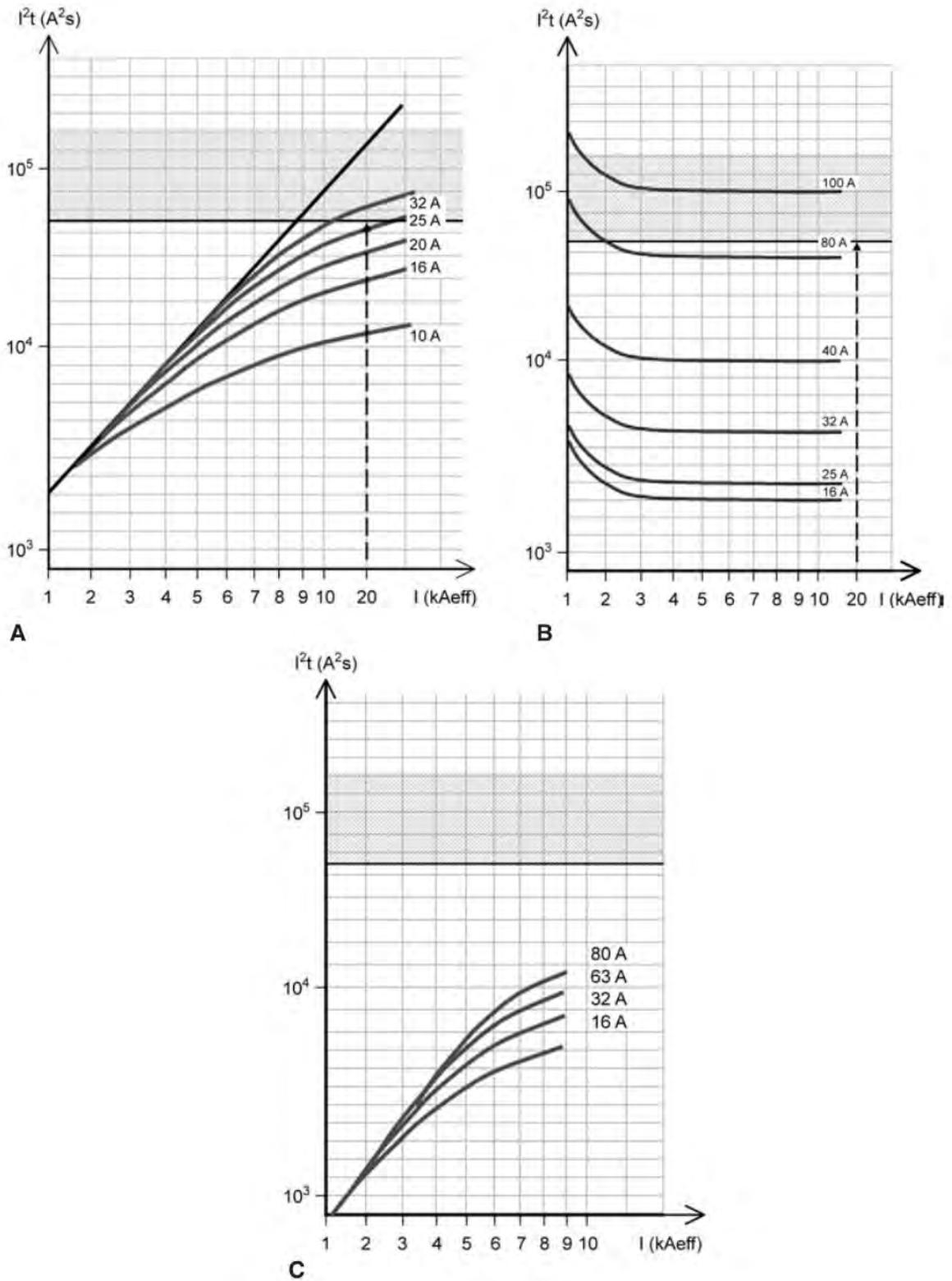


Figure 3.13 – Contraintes thermiques passantes pour plusieurs types de dispositifs.

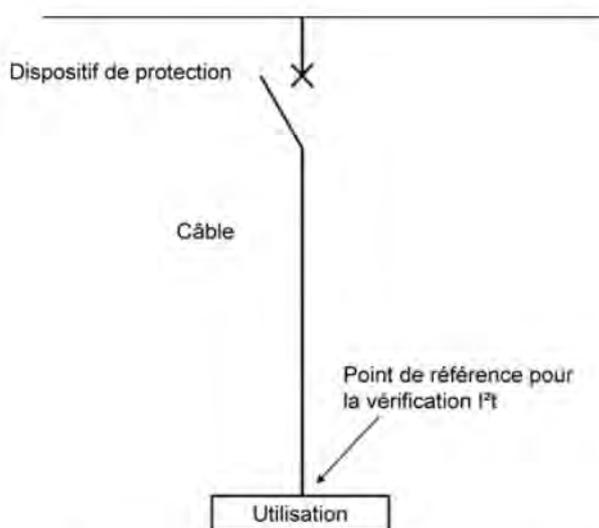


Figure 3.14 – Point de référence pour vérifier la protection d'un câble contre les courts-circuits.

3.2.2 Protection des jeux de barres contre les courts-circuits

Les jeux de barres sont constitués de conducteurs généralement nus supportés par des isolateurs. Ils sont utilisés dans les tableaux électriques pour répartir le courant sur différents circuits. Ils sont également utilisés comme systèmes de distribution en tant que « canalisations électriques préfabriquées ».

Les jeux de barres peuvent supporter pendant de courts instants des températures élevées en cas de courts-circuits. Toutefois ils sont le siège d'autres contraintes.

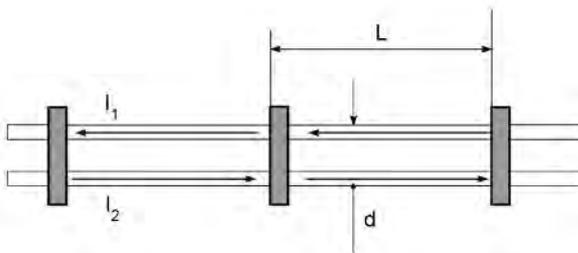


Figure 3.15 — Répulsion de deux barres voisines.

Nous savons, en effet, grâce à André-Marie Ampère, que deux conducteurs parcourus chacun par un courant électrique i_1 et i_2 et éloignés d'une distance d sont le siège d'une force électrodynamique égale à :

$$F = k \times L \times i_1 \times i_2 / d$$

- F est exprimé en Newton ;
- i_1 et i_2 en ampères instantanés ;
- L et d en mètres ;
- k a la valeur de $2 \cdot 10^{-7}$.

Pour compliquer un peu mais aussi être rigoureux envers les physiciens, la valeur de k est égale à :

$$k = \mu_0 / 2\pi$$

μ_0 est la « perméabilité » de l'air. Elle est égale à :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

La force est maximale pour l'intensité de crête qui est égale à :

$$I_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_{c\text{eff}}$$

L'explication de l'origine du courant crête et son calcul sont donnés en partie C, chapitre 11, § 11.7.

■ Exemple d'évaluation

Supposons deux barres distantes de 1 cm et supportées par des isolateurs distants de 30 cm, parcourues par un courant alternatif de 30 000 A.

Le courant de crête I_p sera de :

$$I_p = \kappa \times \sqrt{2} \times 30\,000 \text{ A}$$

Si on considère se trouver à proximité d'un transformateur, la valeur κ calculée selon la méthode citée étant de 1,952, le courant I_p sera de $1,952 \times 30\,000$, soit de 58 560 A.



Figure 3.16 – Jeu de barres (Socomec).

La force exercée sur ces jeux de barres sera alors de :

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \times 0,30 \times (58\,560)^2 / 0,01 = 20\,575 \text{ N}$$

c'est-à-dire plus de 2 tonnes par 30 cm !

On comprend facilement que les barres ou même les isolateurs ne supporteront pas forcément une telle contrainte.

■ Tenue électrodynamique des jeux de barres

Ce calcul suppose que les barres soient filiformes (sans épaisseur). Pour un jeu de barres triphasé + neutre, ayant une section de forme variée, le calcul serait beaucoup plus complexe. Dans la pratique, les constructeurs effectuent des essais à partir de génératrices capables de fournir des courants très élevés pour définir le courant maximal au-delà duquel les effets électrodynamiques entraîneraient des déformations irréversibles.

Tableau 3.6 – Distance des supports pour des barres distantes de 60 mm (d'après Socomec).

Caractéristiques en 3 et 4 pôles avec barres de 5 mm								
	L maxi (entraxe supports en mm) pour :							
$I_{cc_{crête}}$ (kA)	15	24	48	63	82	114		
$I_{cc_{eff}}$ (kA)	9	12	23	30	39	52		
Barre × nb							d (mm)	lz (A) ¹
25 × 5 × 1	775	475	225	175	140	100	60	330
25 × 5 × 2	675	425	200	160	125		60	590
40 × 5 × 1	1 000	625	300	225	175	130	60	500
40 × 5 × 2	950	575	275	225	170	125	60	850
50 × 5 × 1	1 000	700	350	250	200	130	60	600
50 × 5 × 2	1 000	675	325	250	200	145	60	1 050
60 × 5 × 1	1 000	775	375	300	225	130	60	700
60 × 5 × 2	1 000	775	375	300	225	165	60	1 200
63 × 5 × 1	1 000	800	400	300	225	130	60	700
63 × 5 × 2	1 000	800	400	300	225	170	60	1 250
80 × 5 × 1	1 000	950	475	350	225	125	60	900
80 × 5 × 2	1 000	975	475	375	275	200	60	1 550
100 × 5 × 1	1 000	1 000	550	400	225	125	60	1 100
100 × 5 × 2	1 000	1 000	575	425	325	225	60	1 900

(1) Courant nominal admissible pour une température dans l'armoire de 45 °C et de 80 °C pour les barres. Autres configurations de montage : nous consulter.

Cette limite se nomme « tenue électrodynamique » elle s'exprime en $k\hat{A}$, c'est-à-dire en kilo-ampères crête.

Les fabricants de disjoncteurs et de fusibles présentent des courbes caractéristiques de limitation de leurs appareils selon un diagramme en échelle log/log (**figure 3.17**).

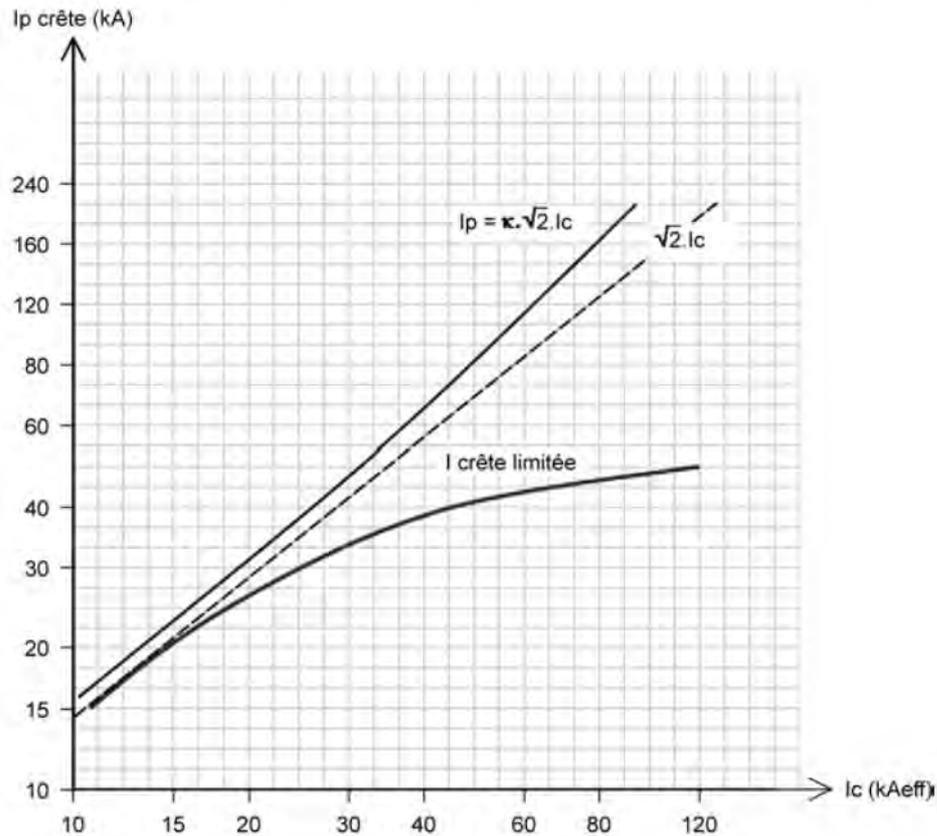


Figure 3.17 – Représentation typique de la limitation $I_{crête}$ par un disjoncteur.

En régime symétrique, lorsque le court-circuit est établi depuis plusieurs alternances, le courant de crête serait de $\sqrt{2} \times I_{c\text{eff}}$.

En régime asymétrique, immédiatement après la création du court-circuit, le courant de crête serait de $\kappa \times \sqrt{2} \times I_{c\text{eff}}$.

La valeur $I_{crête\text{ limitée}}$ est la plus grande valeur du courant instantané laissée passer par un DPCC, pour un courant de court-circuit présumé.

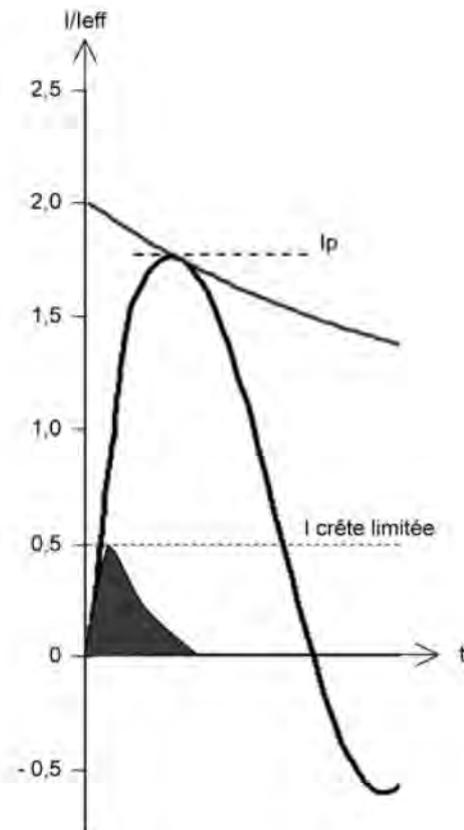


Figure 3.18

■ Application

Cherchons à choisir un disjoncteur devant protéger une canalisation préfabriquée de tenue électrodynamique de 40 kA crête, pour un courant de court-circuit présumé de 50 kAeff.

Les deux valeurs considérées sont portées sur le réseau de caractéristiques de plusieurs disjoncteurs **figure 3.19**.

À l'aide de réseau de courbes, seuls les disjoncteurs nommés L250 et LH100 conviennent.

REMARQUE

La valeur de courant à prendre en considération est la valeur maximale du courant de court-circuit présumé à l'endroit de la première dérivation de la canalisation préfabriquée.

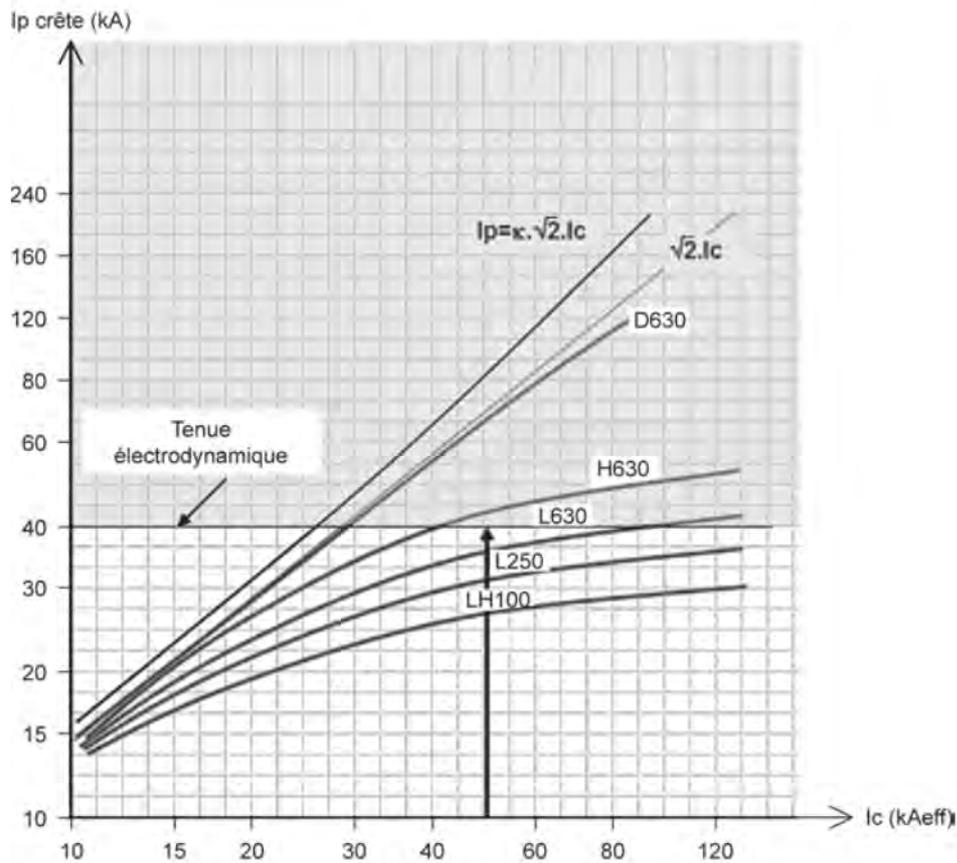


Figure 3.19 – Exemple fictif de représentation des caractéristiques de limitation pour une gamme de disjoncteur¹.

3.3 Pouvoirs de coupure

Le titre de paragraphe est mis au pluriel car en effet la définition du pouvoir de coupure est différente selon l'identité du disjoncteur (domestique ou industriel), et à un même disjoncteur industriel, plusieurs pouvoirs de coupure peuvent être affectés.

En premier lieu, nous distinguerons clairement deux notions de pouvoir de coupure :
 Le **pouvoir assigné de coupure** : c'est le courant qu'un appareil de commande (interrupteur, contacteur...) est capable de couper selon un service et un nombre de manœuvres définis par son constructeur.

Les essais nécessaires à la vérification de cette caractéristique sont décrits dans la norme EN 60947-4-1. Il est décrit plus loin, dans le chapitre 4.

Le **pouvoir assigné de coupure en court-circuit** : c'est le courant qu'un DPCC (fusible ou disjoncteur) est capable de couper sous un court-circuit, selon un cycle d'essais défini par la norme de référence.

La norme de référence pour les disjoncteurs « domestiques » est la norme EN 60898.

1. Les références et caractéristiques ne correspondent à aucun produit de catalogues de constructeurs, elles ont une valeur purement explicative.

La norme de référence pour les disjoncteurs « industriels » est la norme EN 60947-2. La norme de référence pour les fusibles industriels est la norme EN 60269-2.



Figure 3.20 – Exemples de disjoncteurs sous boîtiers moulés.

3.3.1 Disjoncteurs industriels

■ Catégories de disjoncteurs

La norme EN 60947-2 distingue deux catégories de disjoncteurs « industriels » :

- **Catégorie A** : disjoncteurs à action instantanée dont le déclencheur de court-circuit est non temporisé.
- **Catégorie B** : disjoncteurs dont le déclencheur de court-circuit est temporisé en vue d'assurer une sélectivité.

Pour les disjoncteurs de catégorie A, deux définitions de pouvoirs de coupure sont proposées :

- **pouvoir de coupure de service** : *Ics* ;
- **pouvoir de coupure ultime** : *Icu*.

Pour les disjoncteurs de catégorie B, les deux définitions de pouvoirs de coupure sont applicables, mais une troisième est annoncée :

- **courant de courte durée admissible** : *Icw*.

Cette valeur doit être associée à un temps t , lequel est de 1 s, à moins que le constructeur ne la définisse pour une autre durée.



Figure 3.21 – Disjoncteur à coupure dans l'air (Siemens).

Le courant I_{cw} est le courant que peut supporter le disjoncteur pendant le temps t sans que l'appareil ne chauffe excessivement, principalement à ses bornes.

Ces pouvoirs de coupure se différencient par les essais qui leur sont soumis, en tenant compte des résultats constatés après ces essais.

Le principe est d'appliquer une certaine séquence de manœuvres sur court-circuit. Le **tableau 3.7** résume les cycles d'essais. Les séquences d'essai sont décrites par les lettres symboles suivantes :

- O signifie une ouverture automatique sur un court-circuit établi par un organe extérieur au disjoncteur ;
- CO signifie une ouverture automatique sur un court-circuit établi par la fermeture du disjoncteur lui-même ;
- t signifie un temps de pause entre 2 essais.

Tableau 3.7 – Essais concernant les pouvoirs de coupure I_{cu} , I_{cs} , I_{cw} .

	Ordre	I_{cs}	Ordre	I_{cu}	Ordre	I_{cw}
Vérification du déclencheur de surcharge			1	à $2 \times I_r$	1	à $1 \times I_r$
Séquence de manœuvre	1	O - t - CO - t - CO	2	O - t - CO	4	O - t - CO
Vérification du courant thermique I_{th}	3	Essai : I_{th} conservé			3	Essai : I_{th} conservé
Vérification du courant de réglage I_r	4	Essai thermique complet : I_r conservé	4	Vérification du fonctionnement à $2,5 \times I_r$	1	Essai à $1 \times I_r$
Vérification de la tenue diélectrique	2	$\geq 1000 \text{ V}$ ou $\geq 2 \times U_e$	3	$\geq 1000 \text{ V}$ ou $\geq 2 \times U_e$	5	$\geq 1000 \text{ V}$ ou $\geq 2 \times U_e$
Vérification I_{cw}					2	Application de I_{cw} pendant le temps t annoncé : échauffement à la température maximale de 80 K aux bornes de l'appareil
Disjoncteurs catégorie A						
Disjoncteurs catégorie B						

REMARQUE

La colonne « ordre » indique l'ordre dans lequel les essais doivent être effectués.

Si les disjoncteurs sont présentés avec l'aptitude à la fonction de sectionnement les essais complémentaires suivants doivent être effectués :

- essais mécaniques et diélectriques spécifiques aux sectionneurs (voir fonction de sectionnement) ;
- vérification du courant de fuite ; celui-ci doit rester inférieur à 0,5 mA sous une tension d'essai de $1,1 \times U_e$.

3.3.2 Disjoncteurs domestiques

Ces disjoncteurs sont décrits dans la norme EN 60898. Ils sont souvent appelés « disjoncteurs modulaires ». Cette appellation vient du fait que les pôles de ces appareils sont fabriqués indépendamment et assemblés pour constituer différentes

combinaisons. Les pôles sont liés par leurs déclencheurs et par leur manette de commande.

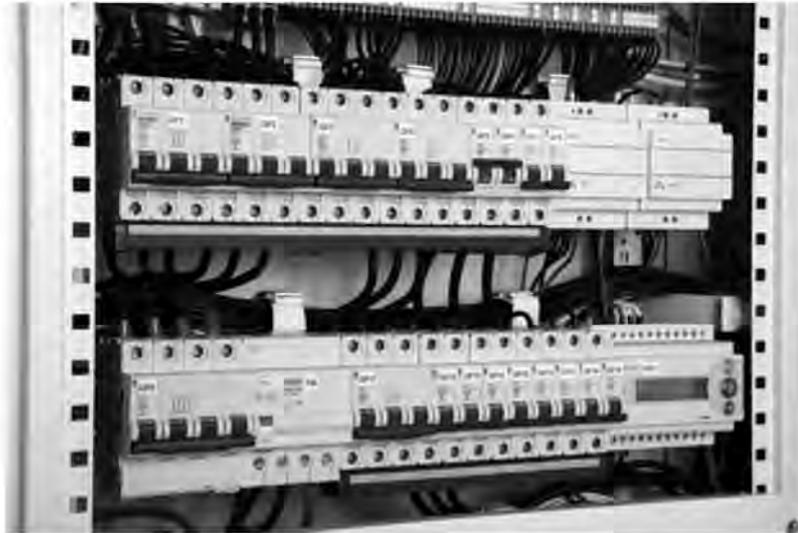


Figure 3.22 – Disjoncteurs modulaires.

La notation de leur pouvoir de coupure est I_{cn} .

Les essais de pouvoir de coupure sont très différents de ceux des disjoncteurs industriels.

Ils s'effectuent sur plusieurs séries d'échantillons. Les montages et tensions d'application dépendent du nombre de pôles des appareils.

La norme EN 60898 ne prévoit pas de pouvoir de coupure $I_{cn} > 10 \text{ kA}_{\text{eff}}$.

La description du détail de ces essais n'apporterait rien à ce chapitre, il faut simplement noter que les essais sont très significativement plus contraignants que ceux qui sont appliqués aux disjoncteurs industriels.

C'est la raison pour laquelle les constructeurs annoncent des pouvoirs de coupure selon les deux normes, les essais selon la norme EN 60947-2 donne des résultats plus « flatteurs ».

3.3.3 Choix du pouvoir de coupure

Si l'installation est de type « domestique » c'est-à-dire que la source est un branchement à basse tension au réseau EDF, les disjoncteurs doivent être choisis dans une gamme conforme à la norme EN 60898. Le pouvoir de coupure est I_{cn} selon cette norme.

Il doit être indiqué en ampères sous cette forme : **6000**

Dans les autres cas la norme EN 60947-2 est applicable.

Pour les disjoncteurs temporisés de catégorie B, le courant I_{cw} doit être clairement indiqué (associé au temps de référence), si les valeurs I_{cu} ou I_{cs} sont inférieures, ce sont elles qui doivent servir de référence.

Pour les disjoncteurs de catégorie A, les pouvoirs de coupure I_{cs} ou I_{cu} peuvent être utilisés. En France aucune règle n'oriente sur l'une ou l'autre des deux caractéristiques.

Les professionnels de l'installation basse tension ont pris l'habitude d'utiliser le plus favorable, soit I_{cu} .

Toutefois on pourrait raisonnablement choisir la valeur I_{cs} pour tous les départs fortement sollicités en manœuvres ou en intervention, par exemple les départs moteurs ou les départs équipés de systèmes de délestage/relestage ; les fonctions d'alimentation devraient également être choisies avec cette caractéristique.

3.3.4 Pouvoir de coupure en schéma IT

Ce thème est un « vieux sujet » qui a été découvert bien après la reconnaissance qu'un deuxième défaut provoquait un court-circuit en schéma IT. Exposons le fait : Dans tous les schémas de liaison à la terre, lorsqu'un court-circuit survient, qu'il soit triphasé ou monophasé phase-neutre, la tension génératrice est 230 V (pour un réseau 230/400 V). Pour un court-circuit biphasé phase-phase, la tension est de 400 V, mais deux pôles participent simultanément à la coupure, de sorte que chaque pôle doit couper 200 V.

En schéma TT, un défaut phase-terre ne crée pas de court-circuit, mais un courant de défaut éliminé par les dispositifs différentiels.

En schéma TN, un défaut phase PE (N) crée un court-circuit en 230 V.

En revanche, en schéma IT, en cas de double défaut mettant en jeu deux phases, la tension génératrice est 400 V, mais en général, un seul disjoncteur déclenchera sur un seul pôle.

Ce cas n'était pas envisagé par la norme des disjoncteurs pendant une longue période. *Il faut réaliser que seule la France a adopté à grande échelle ce type de schéma et les instances internationales de normalisation n'étaient pas très motivées pour définir un essai spécifique...*

Alors la norme NF C15-100 a préconisé que les constructeurs définissent le pouvoir de coupure sur un seul pôle sous la tension entre phases. Mais cet essai ne pouvait faire l'objet de normes nationales en vertu des traités européens interdisant les normes nationales qui puissent être considérées comme des « barrières techniques ».

La norme suggérait de se baser sur le pouvoir de coupure en 690 V (qui donne sur chaque pôle 400 V).

Depuis les années 1990, la norme EN 60947-2 a édité une annexe H qui règle définitivement le problème.

Il faut, pour être complet, observer que dans tous les cas, un pouvoir de coupure est toujours associé au courant de court-circuit présumé au lieu où le disjoncteur est installé (plus précisément à ses bornes aval). En revanche pour un double défaut en schéma IT, le courant est associé à un défaut situé **en aval des circuits**. Il est donc proche des réglages des magnétiques car, pratiquement toujours, leur réglage est défini par ce courant.

C'est sur cette observation que l'annexe de la norme a défini l'essai. Celui-ci est basé sur le réglage magnétique le plus élevé, augmenté de 20 %.

L'essai est obligatoire du fait que le constructeur se réfère à cette norme. S'il est positif, le constructeur n'a aucune obligation d'information.

En revanche, s'il est négatif, l'appareil doit avoir un marquage de la forme : .

Si l'échec ne concerne qu'une tension par exemple 690 V, le marquage doit être :



Cette règle est bien sûr valable pour les petits disjoncteurs si le constructeur se réfère à cette norme, au même titre que la fonction de sectionnement, comme nous l'avons précisé précédemment.

3.3.5 Aptitude d'un disjoncteur à l'utilisation en schéma IT

L'expression « pouvoir de coupure en schéma IT » n'est donc plus utilisable. Elle a apporté d'ailleurs trop d'incompréhensions amenant à des choix absurdes. Seule la caractéristique « **aptitude d'utilisation en schéma IT** » doit être exprimée. La réponse est « oui » ou « non ».

Le moyen d'information est décrit ci-dessus.

Nous insistons encore une fois sur la nécessité de vérifier l'aptitude à la fonction de sectionnement en schéma IT (voir **tableau 3.4**).

3.4 Protection contre les surcharges

3.4.1 Effets des surcharges sur les câbles

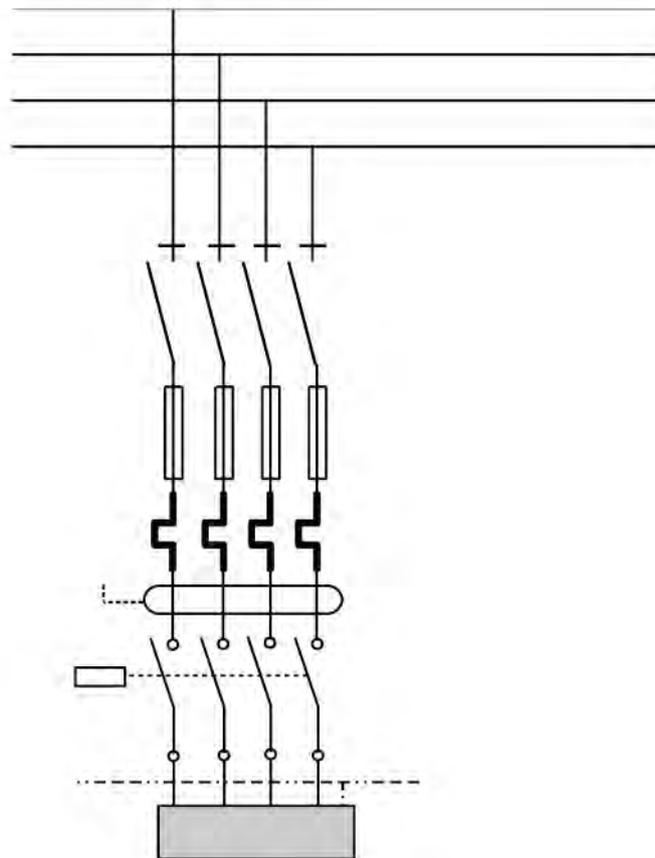


Figure 3.23

Dans les schémas cette fonction est représentée par le symbole du « relais thermique » ou « déclencheur thermique ».

Nous nous rappelons que tout courant électrique parcourant un conducteur lui fournit une énergie, provoquant une élévation de sa température (selon la loi de Joule). Cette élévation dépend des conditions de dissipation de la chaleur, et de la température ambiante.

Lorsque l'énergie produite est égale à l'énergie dissipée, la température atteinte est stable.

Pour évaluer l'intensité admissible du courant dans un câble il est donc nécessaire de connaître les conditions de dissipation et sa température maximale acceptable.

Pour cette dernière question, les études menées au sein du CENELEC (Comité européen de normalisation des industries électriques) ont mené aux décisions suivantes :

Tableau 3.8 – Températures maximales admissibles dans les câbles et conducteurs isolés.

Type d'isolation	Température maximale (°C)
Polychlorure de vinyle (PVC)	70
Polyéthylène réticulé (PR) et éthylène-propylène (EPR)	90

3.4.2 Effets des surcharges sur les enroulements bobinés

De la même manière les matériels, parcourus par un courant, voient leur température s'élever. Parmi ceux-ci, les matériels comportant des enroulements, tels les moteurs et les transformateurs, ont une puissance maximale utilisable dépendant des conditions de leur ventilation, de la température ambiante et surtout de la température limite de leurs enroulements.

Pour ces matériels les températures limites sont définies par les « classes des matières isolantes » (**tableau 3.9**).

Tableau 3.9 – Limites d'échauffement pour les bobines isolées dans l'air.

Classe des matières isolantes	Limites d'échauffement (K)
A	85 K
E	100 K
B	110 K
F	135 K
H	160 K

Remarquons que ce sont les échauffements qui sont notés, c'est-à-dire l'élévation de température par rapport à la température ambiante de référence qui est de 35 °C.

La température limite des isolants de classe B est donc de $110 + 35 = 145$ °C. Cette température est celle qu'on peut mesurer au cœur des bobines ou des enroulements. Une règle simple à connaître est la suivante : pour les enroulements à fils émaillés, une élévation de température de 10 K (c'est-à-dire de 10 % sur une base de 100 K), diminue la longévité des isolants de moitié. Puisque la température dépend de I^2 , on en déduit qu'une telle élévation correspond à une élévation du courant de 5 %. On découvre alors que les règles de protection contre les surcharges des appareils à enroulements bobinés tels que les moteurs et les transformateurs sont beaucoup plus « pointues » que la protection des câbles.

C'est pourquoi les deux cas seront distingués : protection des câbles et protection des moteurs et autres matériels à enroulements bobinés.

3.4.3 Protection des câbles contre les surcharges

■ Principes et règles

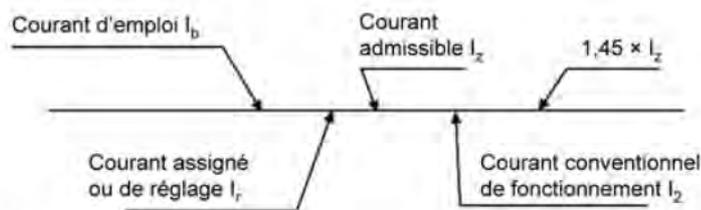


Figure 3.24 – Principe de la protection des câbles contre les surcharges.

La norme NF C15-100 § 433 présente les conditions de choix et de réglage des dispositifs de protection contre les surcharges.

La règle est la suivante. Soient :

- I_b : le courant d'emploi du câble ;
- I_z : le courant admissible dans le câble dans des conditions de pose données ;
- I_r : le courant assigné (= courant nominal) du fusible ou du petit disjoncteur, ou le courant de réglage du disjoncteur « industriel » ;
- I_2 : le courant maximum de fonctionnement pour une durée longue, du dispositif de protection contre les surcharges.

Deux conditions doivent être respectées :

- le courant nominal ou le courant de réglage I_r doit être supérieur ou égal au courant d'emploi I_b et être inférieur ou égal au courant admissible dans le câble I_z :

$$I_b \leq I_r \leq I_z$$

- le courant maximum de fonctionnement I_2 doit être inférieur ou égal à 1,45 fois le courant admissible dans le câble I_z :

$$I_2 \leq 1,45 \times I_z$$

■ Dispositifs de protection contre les surcharges

Les dispositifs de protection contre les surcharges sont :

- les fusibles, parmi lesquels nous retiendrons que ceux de type « gG » conformes à la norme EN 60269-2 ;
- les petits disjoncteurs « domestiques » conformes à la norme EN 60898 ;
- les disjoncteurs « industriels » conformes à la norme EN 60947-2 ;
- les disjoncteurs moteurs et relais thermiques conformes à la norme EN 60947-4-1.

La **figure 3.25** montre de façon symbolique, les courbes de déclenchement de ces quatre catégories d'appareils.

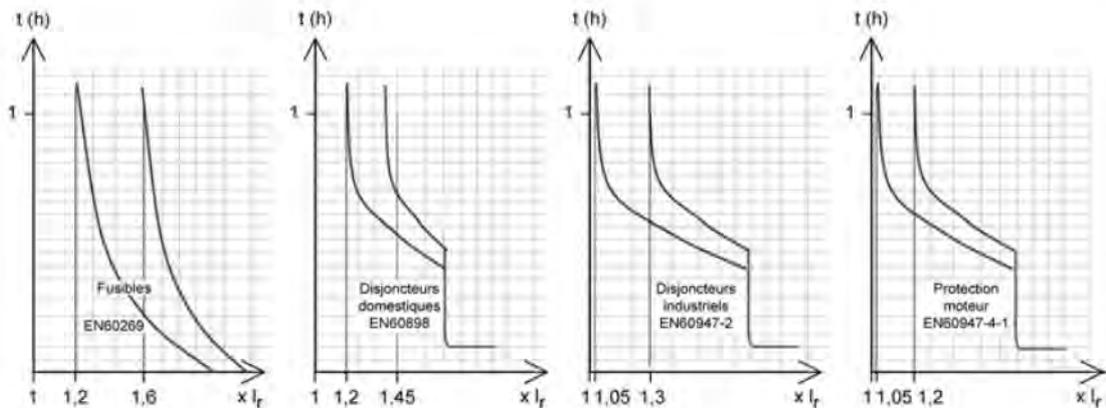


Figure 3.25 – Courbes de déclenchement.

On peut noter que pour la condition idéale, où $I_b = I_z = I_r$, seul le fusible ne répond pas à la condition $I_2 \leq 1,45 \times I_z$. Le courant I_2 d'un fusible étant de 1,6, un câble protégé par un fusible n'est utilisable qu'à $1,45/1,6$ soit $0,91 \times I_z$.

Ce peut être un peu handicapant pour les câbles de faible longueur, mais pour ceux de longueur plus importante, c'est, le plus souvent, la chute de tension maximale admissible qui détermine la section.

La **figure 3.26** représente la synthèse des différents dispositifs de protection pour $I_b = I_r = I_z$.

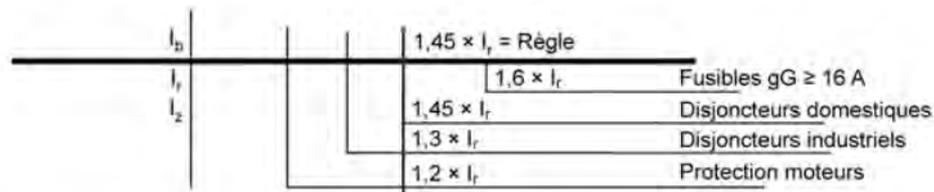


Figure 3.26 – Protection des câbles par les différents dispositifs de protection.

3.4.4 Protection des moteurs

De façon résumée, l'utilisation d'un moteur se caractérise par un courant de démarrage dont la valeur est assez typiquement égale à 6 fois le courant nominal.

Ce courant persiste durant tout le temps de démarrage qui dépend du type de moteur utilisé et de la charge qui lui est appliquée, variant de 2 à 30 secondes. Lorsque le moteur est lancé, une surcharge de 5 % est considérée comme acceptable, mais une surcharge de 20 % doit absolument être éliminée.

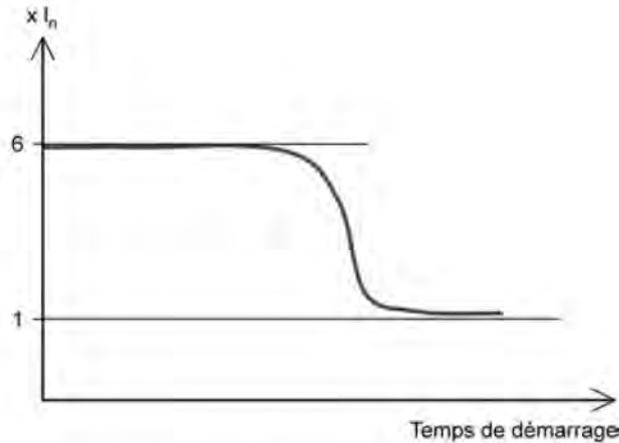


Figure 3.27 – Variation du courant d'un moteur pendant le démarrage.

Un cas particulier entraînant une surintensité consiste à envisager la coupure d'une phase. Dans cette situation, si le moteur est lancé, il continuera de tourner, mais un courant inverse traversera les enroulements, provoquant un échauffement. Pour se prémunir des conséquences d'un tel événement, un dispositif spécial doit être apporté, nommé « dispositif de protection contre la marche en monophasé » ou encore DPMM.

La protection des moteurs contre les surcharges doit répondre aux conditions suivantes :

- le dispositif de protection ne doit pas fonctionner pour une utilisation normale du moteur ;
- le dispositif doit fonctionner pour protéger le moteur au calage, cela assez rapidement car le moteur, dans cette condition n'est pas ventilé ;
- le dispositif doit fonctionner au maximum entre $1,05$ à $1,2 \times I_r$;
- en cas de coupure de phase le dispositif doit fonctionner entre 1 à $1,15 \times I_r$ (voir chapitre 2, § 2.3.5) ;
- enfin, si le dispositif fonctionne sur un principe thermique (bilame par exemple), celui-ci doit être peu sensible aux variations de température. Une variation de $0,25$ % par Kelvin d'échauffement est considérée comme un objectif pour les relais ou déclencheurs thermiques « compensés en température ».

■ Classes de déclenchement

On appelle classe de déclenchement d'un dispositif de protection moteur, une catégorie de ces appareils qui permet un temps de démarrage donné.

La norme EN 60947-4-1 prescrit un essai à $7,2 \times I_r$.

Certains dispositifs permettent un réglage de la classe de déclenchement. Ces dispositifs sont toujours électroniques.

À PROPOS

Un déclencheur a une action mécanique sur un disjoncteur, tandis qu'un relais agit sur un contact, lequel est utilisé pour provoquer une action.

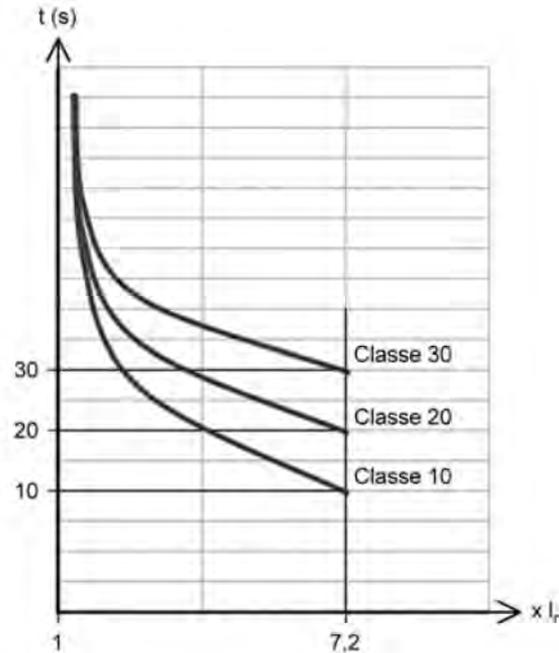


Figure 3.28 – Courbes de déclenchement des relais thermiques selon leur classe.

OBSERVATION

Nous avons vu que le courant de démarrage est d'environ 6 fois I_n . Ce courant correspond à la charge d'impédance que constitue le moteur au calage. Mais au moment de la mise sous tension, le flux n'est pas encore formé. Il faut environ 3 ms pour que celui-ci prenne sa pleine valeur. De sorte que la composante réactive de l'impédance est, au départ, nulle, ne restant que la résistance. Or les constructeurs cherchent à réaliser des moteurs à faibles pertes Joule (donnant des économies d'énergie, simplifie la ventilation et augmente le rendement). L'effet pervers est que la résistance étant faible, le courant de mise sous tension est considérable. Il peut atteindre, voire dépasser $16 \times I_n$. Le temps d'apparition de ce courant est très court, toutefois un dispositif de protection contre les courts-circuits risque de fonctionner. Si le dispositif est un fusible, celui-ci ne fondra pas, mais risquera de vieillir prématurément. Sa fusion inopinée surprendra les services de maintenance.

Si le dispositif est un disjoncteur, le déclencheur de court-circuit (déclencheur magnétique) devra être réglé à $14 \times I_n$ (en valeur efficace).

■ Protection des transformateurs

La protection des transformateurs à primaire à basse tension, pose les mêmes problèmes que la protection des moteurs. En effet, il s'agit de protéger les enroulements de fils émaillés. Leurs limites répondent aux mêmes règles que ces derniers. À la mise sous tension, le flux n'existant pas encore, seule la résistance de l'enroulement primaire est vue par le réseau. Il s'en suit une forte pointe d'intensité avant l'établissement du courant.

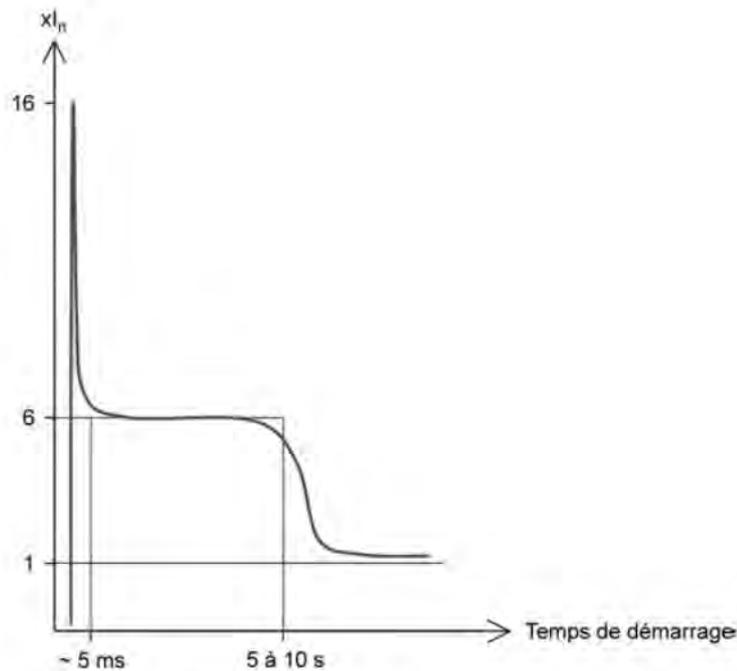


Figure 3.29 – La pointe de magnétisation à la mise sous tension d'un moteur peut atteindre $16 \times I_n$.

Contrairement aux moteurs, la protection des transformateurs peut être répartie entre le primaire et le secondaire. La protection contre un court-circuit qui s'établirait aux bornes secondaires, doit toujours être installée en amont. Le principe de la sélection du dispositif est de calculer le courant de court-circuit selon l'équation :

$$I_{cc} = I_{n1} / U_{cc\%} \times 100$$

I_{n1} étant l'intensité au primaire, pour une puissance transmise égale à la puissance nominale.

Le calcul de la valeur de I_{cc} doit tenir compte de l'impédance amont du circuit d'alimentation. Toutefois, pour des puissances n'excédant pas la dizaine de kVA celle-ci est négligeable en regard de celle du transformateur. La valeur de réglage du déclencheur magnétique du disjoncteur ne doit pas dépasser cette valeur, en tenant compte de l'imprécision de son fonctionnement qui est fixée à 30 %.

Le choix de fusibles pour la protection des transformateurs contre un court-circuit ne peut s'effectuer qu'en respectant les instructions du constructeur, en effet la durée admissible d'un court-circuit dépend pour une grande part de la construction et de la classe d'isolation des enroulements.

Une autre pointe de courant peut se produire lors de la coupure en charge du circuit secondaire. En effet, en vertu de la loi de Lentz selon laquelle une self inductance s'oppose à toute variation d'intensité, une pointe de courant apparaîtra au primaire, tentant de s'opposer à la coupure de courant. Cette pointe risque de faire déclencher le disjoncteur amont.

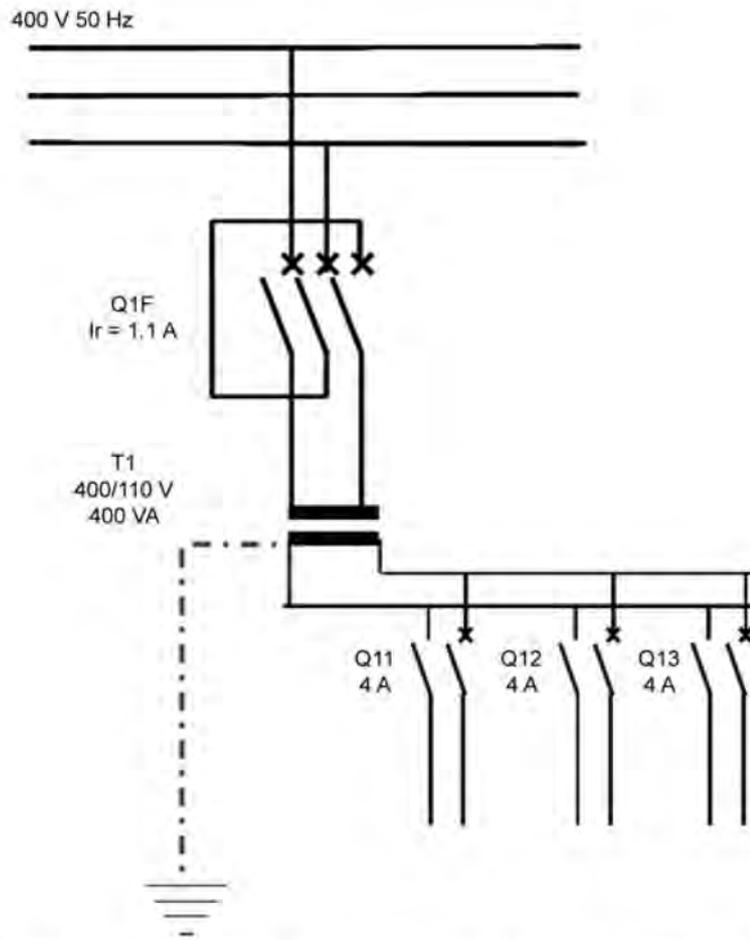


Figure 3.30 – Protection de transformateur par disjoncteur moteur.

La protection du transformateur est assurée par Q1F.

Les disjoncteurs Q11, Q12, Q13 n'assurent que la protection des lignes.

Toutefois, il est utile d'utiliser des disjoncteurs type protection moteur, en mettant même deux pôles en série sur l'une des phases. Les bilames de ces disjoncteurs d'intensités relativement faibles, ont une résistance interne assez élevée. Cette résistance amortit considérablement les pointes aux mises sous et hors tension, suffisamment pour éviter tout déclenchement intempestif (*voir aussi chapitre 6, § 6.1.2*).

3.5 Protection des personnes

3.5.1 Introduction

Ce chapitre est intitulé « protection des personnes », pour se conformer aux appellations des catalogues des fabricants.

Il concerne plus généralement les protections contre des faibles courants de défaut qui, dans certaines conditions, en particulier en cas de défaillance des liaisons équipotentielles entre masses et éléments conducteurs, peuvent amener une situation dangereuse pour une installation ou pour les personnes (ou animaux).

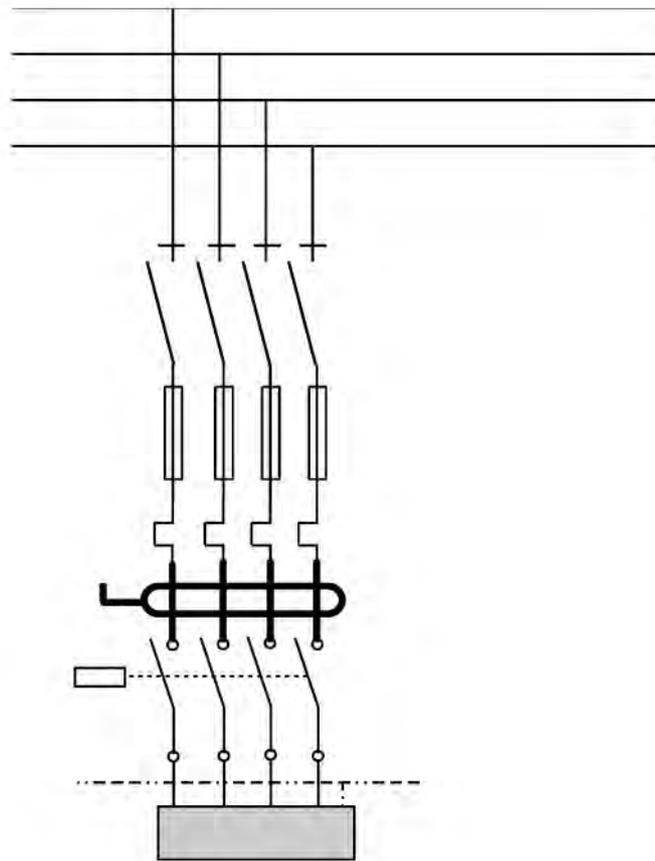


Figure 3.31

Les appareils utilisés sont les dispositifs nommés « différentiels résiduels ». Ils sont souvent présentés comme des dispositifs indispensables. Ils éviteraient même, selon certaines explications, les calculs fastidieux de courants de défaut en vue d'assurer les réglages magnétiques adéquats. Ils assureraient même à eux seuls les problèmes de sélectivité !

Ce chapitre se propose de faire le point sur l'usage de ces dispositifs. Il explique l'utilité de leurs apports complémentaires à la protection des personnes et des biens. Même en schéma TT, ces dispositifs ne doivent pas exister seuls. Les autres protections citées dans les autres chapitres de ce dossier, restent indispensables.

3.5.2 Dangers des faibles courants de défaut

Nous savons qu'un courant électrique a un parcours « aller » et « retour ». Sur une même dérivation les courants d'aller et de retour sont identiques. En courant alternatif triphasé avec ou sans neutre, cette loi s'exprime plus généralement : « *La somme de tous les courants des conducteurs actifs (phases et neutre) d'un même circuit est nulle.* » Si cette somme n'est pas nulle, c'est qu'une « fuite » est présente : le courant a trouvé un autre chemin parallèle au chemin normal (**figure 3.32**). La cause principale est un défaut d'isolement entre un conducteur actif et l'environnement conducteur extérieur. C'est la raison pour laquelle toutes les parties conductrices susceptibles

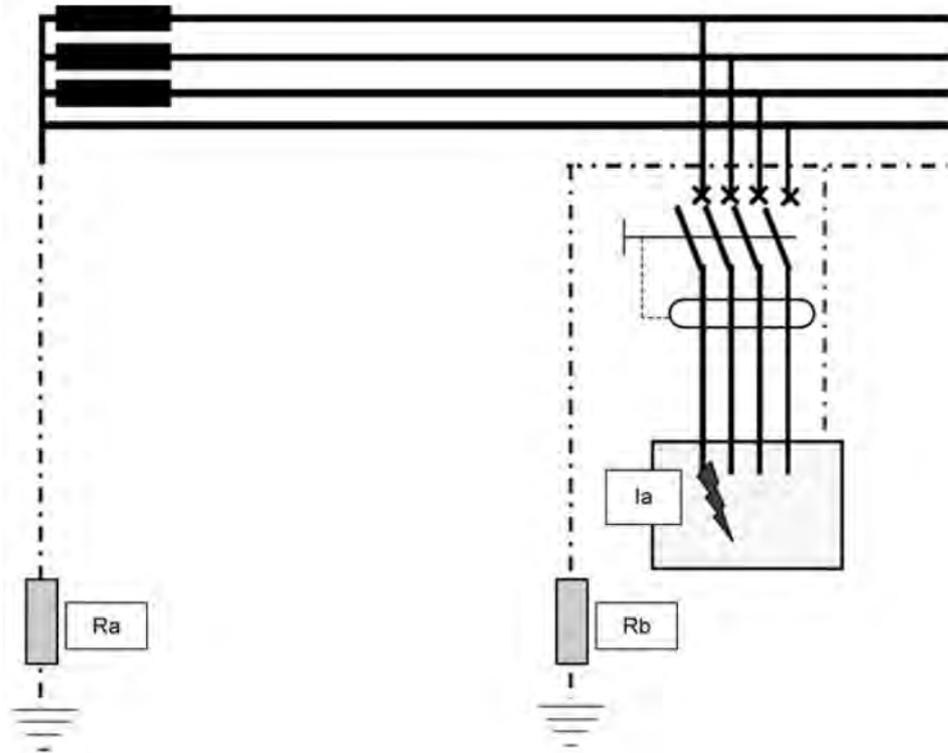


Figure 3.32 – Courant résiduel en cas de défaut à la terre.

d'être mises en contact, directement ou indirectement avec les conducteurs actifs, doivent être connectées entre elles par un conducteur de protection lequel est relié à la terre.

Nous appelons ce « courant de fuite » : courant résiduel.

Nous désignerons sous l'appellation « faible courant de défaut » un courant résiduel dont la valeur est inférieure au courant d'emploi d'un circuit.

Il est évident qu'un tel courant, s'il est dangereux, doit être détecté par un autre moyen qu'un dispositif à maximum d'intensité. C'est pourquoi la solution est de mesurer le courant résiduel en captant la somme des courants actifs. La valeur mesurée représente la « valeur résiduelle » du courant de défaut. Le dispositif est nommé « dispositif à courant différentiel résiduel » ou encore DDR.

3.5.3 Quels sont les effets possibles d'un courant résiduel ?

Dans un schéma TT

Lorsqu'un défaut d'isolement entre phase et masse survient, un courant I_a s'établit égal à (voir **figure 3.32**) :

$$I_a = U_0 / (R_a + R_b)$$

D'autre part, la différence de potentiel entre la masse en défaut et la terre s'élève à la valeur :

$$U_a = I_a \times R_b$$

Cette tension est appelée tension de défaut. Si une personne peut toucher simultanément cette masse en défaut et une partie métallique reliée à la terre, elle sera soumise à une tension de contact $U_c = U_a$.

Si on cherche à limiter la tension de contact U_c à 50 V, cela implique un lien direct entre la valeur de la prise de terre R_b et le seuil de sensibilité I_d du dispositif à courant différentiel résiduel DDR :

$$I_d < 50/R_b$$

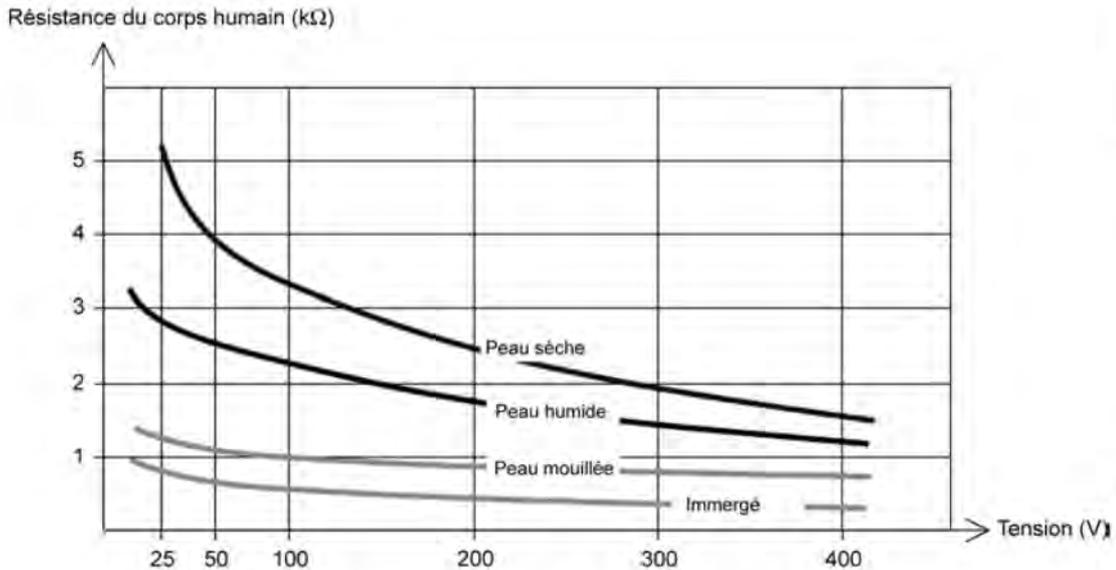


Figure 3.33 – Résistance du corps humain en fonction de la tension.

Chez un « particulier », une bonne résistance de terre sera de 50 à 100 Ω, ce qui implique que la sensibilité du DDR devra être au maximum de :

$$I_d < 50/100 \text{ soit } 500 \text{ mA}$$

Si une personne est en contact avec une masse portée à 50 V et la terre, un courant la traversera, égal à $50/R_b$. R_b est la propre résistance du corps humain.

Selon la **figure 3.33**, la résistance du corps humain varie selon la tension supportée et l'humidité de la peau.

On peut noter que sous 50 V, le corps a une résistance de 4 kΩ. Sous cette tension il serait parcouru par un courant de $50/4\ 000$ soit 12,5 mA.

Rappelons-nous les principaux seuils d'action du courant électrique sur le corps humain (**figure 3.34**) :

- 0,5 mA à 1 mA : seuil de perception picotements ;
- 5 mA à 10 mA : secousse électrique ;
- 10 mA à 20 mA : seuil de non-lâcher, contraction musculaire ;
- 20 mA à 30 mA : téτανisation des muscles ; seuil de paralysie respiratoire ;
- 40 mA à 80 mA : fibrillation ventriculaire ;
- 200 mA : fibrillation cardiaque irréversible ;
- 1 A : arrêt du cœur.

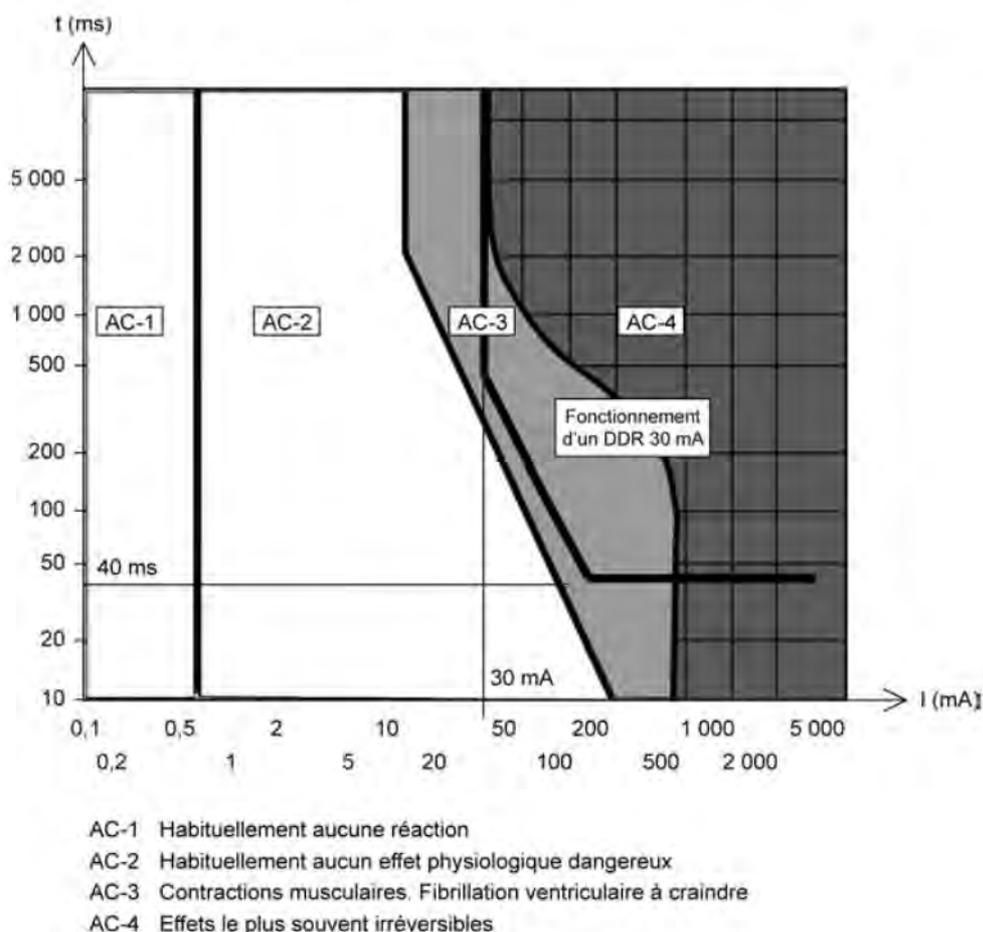


Figure 3.34 – Réaction du corps humain en cas de traversée d'un courant pendant un temps donné.

Au-dessus de 10 mA, ces seuils dépendent du temps de réception de ce courant : un « petit répit » de 30 à 500 ms est toléré (voir **figure 3.34**).

IMPORTANT !

Il est fondamental de noter que ce courant de 12,5 mA traversant le corps, en cas de contact avec une masse, ne s'établit que si cette masse est reliée à la terre.

Dans le cas inverse, ou si la mise à la terre est défectueuse, la tension reçue est de 230 V (voire de 400 V en schéma IT).

Dans le cas de 230 V, la résistance du corps humain est de l'ordre de 2 300 Ω , le courant serait de 0,1 A soit 100 mA.

Ce contact risque d'être permanent car la pauvre victime est tétanisée, incapable de bouger, si le courant passe par la région du cœur, son avenir sera très vite compromis. Si le DDR en amont est réglé à 250 mA, comme il a été calculé précédemment, il sera dans l'incapacité de réagir.

Pour cette raison, si un appareil, normalement relié à la terre, est alimenté par l'intermédiaire d'un câble dont l'isolant risque d'être blessé ou dont l'un ou l'autre des conducteurs risque d'être coupé, en particulier le conducteur de terre « PE », un DDR de haute sensibilité sera installé « pour limiter les effets ».

On appelle **DDR de haute sensibilité** un dispositif ayant un courant de fonctionnement inférieur ou égal à 30 mA et dont le temps de fonctionnement pour 5 fois le courant de fonctionnement est au plus égal à 40 ms. Cet appareil permet dans le cas de défaillance des autres dispositions de sécurité de limiter la durée de passage du courant dans le corps humain.

On peut encore appliquer l'exercice au cas d'un schéma IT dont une phase serait reliée à la terre par défaut d'isolement. Les autres phases sont portées à 400 V. En cas de contact direct avec l'une de ces polarités, Sous 400 V la résistance du corps humain n'est plus que de 1,5 kΩ (voir **figure 3.34**). L'intensité le traversant serait de $400/1\,500 = 0,267$ A, soit 267 mA. Avec une telle valeur on se rapproche dangereusement de la zone AC-4 délimitant les risques de lésions irréversibles.

Ne pas interpréter qu'un DDR de sensibilité 30 mA limite le courant à cette valeur. Un DDR limite seulement la durée de passage du courant résiduel. Le diagramme de la **figure 3.34** montre les différentes zones de danger. La courbe de fonctionnement d'un DDR de 30 mA y a été superposée. On peut observer que quelle que soit la valeur du courant de défaut, le temps de fonctionnement reste dans la zone de limite de danger grave de type « contraction musculaire ».

Il existe pourtant des appareils dits « **DDR de très haute sensibilité** » de courant de fonctionnement de 10 mA. Il est illusoire de croire qu'ils vont limiter le courant de défaut à 10 mA.

On peut tout juste espérer que la malheureuse personne qui entre en contact avec un potentiel susceptible d'atteindre 230 V ne subira cette valeur que « progressivement ». Sinon le DDR de « très haute sensibilité » coupera en 40 ms, tout comme un DDR de 30 mA.

3.5.4 À retenir

Un DDR ne constitue un système de protection des personnes qu'à deux conditions :

- Toutes les masses sont correctement mises à la terre avec une résistance de prise de terre R_b respectant la règle :

$$R_b < 50/I_d$$

I_d étant le courant différentiel de fonctionnement du DDR.

- L'environnement d'utilisation des appareils électriques reste un milieu sec, maintenant la peau sèche et donc une résistance élevée du corps humain. Le contact simultané entre les masses et les parties métalliques reliées à la terre reste exceptionnel.

Dans les conditions plus sévères, il faut utiliser des « **mesures actives de protection** » (un rappel : les mesures actives de protection sont celles qui empêchent un danger de survenir ; tandis que les mesures passives sont celles qui limitent les effets d'un danger). Les mesures actives de protection sont : la double isolation (appareils de classe II), utilisation de la très basse tension de sécurité, 24 V par exemple (voir partie C).

L'utilisation des DDR est souvent souhaitable principalement en cas de risque de défaillance de la bonne continuité du conducteur de protection. Certes la rupture du PE n'entraînera pas le déclenchement, même en cas de défaut d'isolement d'une phase sur une masse qui ne serait plus reliée à la terre. Au contraire celle-ci aura son potentiel directement élevé à 230 V. Toute personne rentrant

en contact avec cette masse subira cette tension. Le DDR, à condition que son temps de réponse soit très court (< 40 ms), ne pourra que limiter la durée du choc.

3.5.5 Autres utilisations des DDR

Nous savons que le conducteur de protection PE a pour rôle de drainer les courants de défaut qui peuvent prendre dans certains cas des valeurs élevées.

Les appareils d'utilisation tels que les machines sont en contact permanent avec la structure de leur bâtiment. De sorte que cette structure se trouve en parallèle avec le réseau des conducteurs PE. Une partie des courants de défaut passe donc inévitablement par cette structure.

C'est pourquoi la **règle numéro UN** est d'interconnecter les éléments conducteurs de cette structure afin que la résistance globale soit la plus faible possible. Néanmoins on ne peut pas contrôler tous les éléments conducteurs qui ne font d'ailleurs pas forcément partie de la structure, tels des profilés mis en stock, des fûts métalliques, etc.

Le courant « baladeur » peut passer par des parties métalliques en « mauvais contact », c'est-à-dire en contact avec une résistance suffisamment élevée pour qu'un point chaud se produise. Or si le milieu ambiant est explosible, un point chaud dépassant le « point éclair » peut provoquer une explosion.

Comme on ne peut pas mesurer les « courants baladeurs » puisque par définition on ne sait pas où ils peuvent passer, la seule solution est de provoquer un déclenchement dès que le courant de défaut atteint une valeur trop élevée.

Pour cela la norme NF C15-100 prescrit d'installer des DDR de « moyenne sensibilité » soit ≤ 300 mA sur les circuits dont le parcours traverse des zones à risque d'incendie (BE2) ou d'explosion (BE3)¹.

Les relais différentiels (voir plus en avant) peuvent être très utilement installés dans des circuits sensibles en schéma TN-S, TT ou même IT afin de détecter une dégradation d'isolation en vue de provoquer une alerte, dans le but d'engager une action préventive. Il existe de tels relais à plusieurs voies (jusqu'à 12) facilitant la centralisation des informations. Une telle solution confère aux installations en schémas TN-S et TT une surveillance d'isolement au moins comparable à celles réalisées en schéma IT.

3.5.6 À quoi peuvent servir des DDR à très basse sensibilité ?

On qualifiera de « très basse sensibilité » les DDR dont la valeur de courant différentiel de fonctionnement est de 0,2 à 0,5 fois le courant d'emploi d'un circuit. Cela peut conduire à des courants de 20, 50, 100, 200 A...

Ils peuvent servir à surveiller le courant passant dans un PEN (voir schéma TN-C). Puisque le PEN doit être relié à la terre le plus souvent possible, on ne peut pas mesurer le courant le traversant. On peut en revanche mesurer sur les trois phases le courant résiduel qui n'est pas obligatoirement un courant de défaut, mais un simple déséquilibre. Toutefois si le PEN a une section réduite il est parfois utile de contrôler le courant afin de prévenir toute surcharge.

1. NF C15-100 § 531.2.3.3.

Ces DDR peuvent également être utiles en schéma TN-S ou IT pour de très longues lignes pour lesquelles le courant de défaut présumé serait très bas. Ce serait le cas des alimentations de pompes de puisage ou d'arrosage.

3.5.7 Limites d'utilisation des DDR

Nous avons vu qu'un DDR peut être un complément utile, voire incontournable pour la protection en cas de défaut d'isolement entre conducteur actif et PE, surtout si un faible courant de défaut reste dangereux.

Mais il ne faut pas oublier que les défauts entre conducteurs actifs restent tout aussi plausibles que les défauts à la terre ou la rupture du PE.

Dans ces cas, les DDR ne « voient » pas de courant car la somme des courants d'emploi et de court-circuit reste nulle. Seuls les dispositifs à maximum d'intensité (fusibles ou disjoncteurs) peuvent faire face à la situation.

Si une ligne d'un circuit phases-neutre est longue, le courant de court-circuit minimum en bout de ligne phase-neutre sera faible. Ce courant déterminera le réglage des déclencheurs magnétiques. Le DDR n'a aucune utilité.

En définitive, même avec l'utilisation d'un DDR, il est nécessaire de calculer les courants minima de court-circuit afin de régler correctement les déclencheurs magnétiques.

3.5.8 Différentes catégories de DDR

Les DDR peuvent être :

- des interrupteurs différentiels ;
- des relais différentiels (associés à un dispositif de coupure) ;
- des déclencheurs différentiels (associés à un disjoncteur) ;
- des disjoncteurs à fonction DDR intégrée.

3.5.9 Interrupteurs différentiels

Les interrupteurs différentiels ID sont des appareils destinés aux installations domestiques. Leur usage principal est d'être associé à des circuits protégés par fusibles. Ils sont décrits par la norme EN 61008.

Ils n'ont pas obligatoirement une fonction d'interrupteur-sectionneur, à moins que le constructeur n'indique son courant assigné d'emploi en AC2xx (voir fonction de commande). Ils n'ont pas de fonction de protection contre les courts-circuits. Ils doivent en revanche être protégés par un dispositif de protection contre les courts-circuits. Étant donné leur vocation, ce dispositif est presque toujours un fusible. La protection par disjoncteur est une protection conditionnelle : appareil et calibre doivent être spécifiés.

Ce fusible n'est pas obligatoirement situé en amont. S'il est en aval, la liaison intermédiaire doit être réalisée de façon qu'aucun risque de court-circuit ne soit plausible.

Si l'interrupteur alimente plusieurs circuits, son intensité thermique assignée doit être au moins égale à la somme des intensités admissibles dans les circuits, sans facteur de foisonnement.

3.5.10 Relais différentiels

Les relais différentiels ont des appareils destinés aux installations industrielles ou assimilées, c'est-à-dire surveillée et entretenue régulièrement.

Un relais est un dispositif de mesure (en l'occurrence du courant résiduel) avec une fonction de protection ayant pour organe de sortie un ou plusieurs contacts.

Un relais a besoin d'une alimentation, son contact de sortie agira sur un déclencheur voltétrique d'un disjoncteur ou interrupteur (ou sur la bobine de contacteur), lequel a également besoin d'une tension

On distingue les associations dispositif de coupure + relais DDR en deux catégories :

■ Associations à sécurité positive

En cas de coupure du circuit d'alimentation, le disjoncteur s'ouvre. Pour ce faire, une bobine à manque de tension est utilisée.

Il est bien évident qu'une telle association est particulièrement gênante en distribution bâtiments, car le circuit s'ouvre dès une (micro)coupure de la tension. Toutefois ces relais peuvent être utiles en tête d'équipement de machines. Le relais peut alors être associé à la fonction d'arrêt d'urgence qui elle aussi doit être à sécurité positive.

■ Autres associations

Elles ont la propriété de ne pas déclencher en cas de coupure des circuits d'alimentation du dispositif de déclenchement. Elles ne doivent pas être employées dans les locaux d'habitation ou assimilés, non exploités par des personnes averties, lorsque le dispositif doit assurer la protection des personnes (NF C15-100 § 531.2.2.2).

Leur emploi est donc pratiquement limité aux installations industrielles pour les circuits où le risque d'explosion est identifié.

3.5.11 Déclencheurs différentiels

Un déclencheur se différencie d'un relais par son organe de sortie qui est un dispositif mécanique destiné à provoquer directement le déclenchement du disjoncteur associé. Il ne nécessite généralement pas d'alimentation externe.

Les déclencheurs sont associés à une gamme précise d'appareils définie par le constructeur.

Ils sont présentés dans les catalogues comme un dispositif complémentaire. La norme EN 61009 (annexe G.4) impose toutefois « *qu'il ne soit possible d'assembler le DDR sur site qu'une seule fois. Tout désassemblage doit laisser des dommages permanents et visibles* ».

ATTENTION

Il est possible que le montage d'un DDR sur un disjoncteur impose un déclassement de l'intensité assignée d'emploi, et éventuellement du pouvoir de coupure. Ces informations doivent être signalées sur le DDR.

3.5.12 Disjoncteurs différentiels DD à usage domestique

Les disjoncteurs différentiels sont des petits disjoncteurs à usage domestiques incorporant un déclencheur sensible au courant différentiel résiduel. Ces appareils cumulent donc la fonction de disjoncteur conformément à la norme EN 60898 et la fonction DDR. Étant donné leur grande diffusion, les caractéristiques et les essais

de ces appareils sont décrits par la norme EN 61009. Celle-ci présente plusieurs types de disjoncteurs différentiels.

■ DD de type AC

Ce sont des appareils dont le déclenchement est assuré pour des courants différentiels résiduels alternatifs sinusoïdaux, soit appliqués brusquement, soit augmentant progressivement (EN 61009-1 § 5.2.9.1)

Ces disjoncteurs doivent être marqués par le symbole .

■ DDR de type A

Ce sont des appareils dont le déclenchement est assuré pour des courants différentiels résiduels alternatifs sinusoïdaux ou continus pulsés, soit appliqués brusquement, soit augmentant progressivement (EN 61009-1 § 5.2.9.2).

Ces disjoncteurs doivent être marqués par le symbole .

■ DDR de type S

Ce sont des appareils temporisés en vue d'assurer une sélectivité en cas de défaut à la terre avec des dispositifs DDR de types A ou AC.

Ces disjoncteurs doivent être marqués par le symbole .

Les types A et AC se différencient par leur sensibilité ou non aux courants pulsés (c'est-à-dire aux courants non sinusoïdaux, mais non continus lisses, par exemple aux courants redressés).

Le **tableau 3.10** présente les temps de fonctionnement requis par la norme EN 61009-1 applicable aux disjoncteurs différentiels ou dispositifs différentiels associés à un disjoncteur. Ces temps sont déterminés dans le but d'assurer une sélectivité entre un appareil de type S et un appareil de type « général » A ou AC, sans dépendre de l'origine des appareils. La **figure 3.35** représente sous forme graphique les temps de fonctionnements énoncés par ce tableau.

Tableau 3.10 – Valeurs du temps de fonctionnement des DDR
(extrait du tableau 2 de la norme EN 61009-1).

Type	I_n A	Δn	Valeurs du temps de coupure et de non-fonctionnement				
			$1 \times \Delta n$	$2 \times \Delta n$	$5 \times \Delta n$	$1 \times \Delta t$	
A ou AC	Toutes valeurs	Toutes valeurs	0,3 s	0,15 s	0,04 s	0,04 s	Temps de fonctionnement maximal
S	≥ 25	> 30 mA	0,5 s	0,2 s	0,15 s	0,15 s	Temps de fonctionnement maximal
			0,13 s	0,06 s	0,05 s	0,04 s	Temps minimal de non-réponse

Δt = valeur supérieure au réglage maximal du magnétique du disjoncteur associé, avec au moins 500 A.

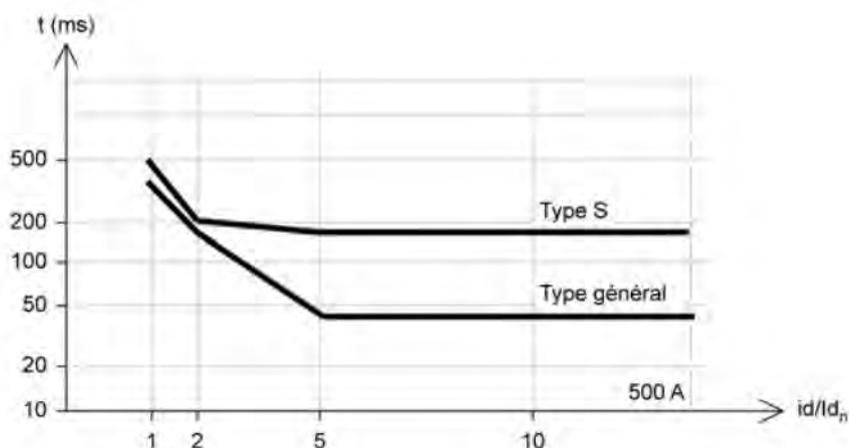


Figure 3.35

■ ID et DDR de type B

Une norme récente est destinée à compléter les normes EN 61008 et EN 61009. Il s'agit de la norme CEI EN 62423. Celle-ci concerne les interrupteurs et disjoncteurs différentiels de type B. Leur application reste domestique. Leurs caractéristiques sont identiques au type A, mais, selon cette norme « *sont aptes à assurer la protection en cas de courants différentiels alternatifs sinusoïdaux jusqu'à 1 000 Hz, de courants différentiels continus pulsés et de courants différentiels continus lissés dans le cas d'une alimentation triphasée* ».

3.5.13 Dispositifs différentiels résiduels à usage industriels

En usage industriel, la multiplicité des normes CEI définissant les dispositifs différentiels apporte plus de confusion que de précision.

La plus utile est la norme des disjoncteurs EN 60947-2, dont une partie décrit les caractéristiques et essais des dispositifs différentiels associés aux disjoncteurs. Rappelons-nous que le domaine industriel se caractérise par un milieu perturbé et par une adaptation permise à des professionnels afin d'effectuer les réglages utiles à l'installation.

3.6 Protection contre les surtensions

Nous appelons surtension, une tension dépassant des valeurs admissibles par un ouvrage électrique et ses composants.

Nous distinguerons d'une part les surtensions provoquées par une défaillance permanente d'un élément d'installation et d'autre part les surtensions dues à un effet transitoire provoqué par un événement lié à l'installation ou un événement externe tel qu'une surtension atmosphérique.

3.6.1 Surtensions dues aux défaillances d'éléments d'installation

Les défaillances d'éléments d'installation pouvant engendrer une surtension sont les suivantes :

■ Défaut de la source

Ce sont par exemple un court-circuit entre spires d'un transformateur, un défaut d'excitation d'un groupe électrogène, un réglage défaillant d'un onduleur... Ces occurrences peuvent être évitées en surveillant la tension des sources par des relais à maximum de tension, provoquant une alerte ou une coupure automatique au-delà d'une certaine valeur.

■ Rupture du conducteur neutre

Cette coupure peut provoquer une surtension grave pour les récepteurs monophasés. En effet, le « retour du courant » des charges monophasées ne pouvant plus s'effectuer par le neutre, utilise les impédances des autres phases. Si les impédances sont très différentes, le déséquilibre d'intensité provoque un déséquilibre des tensions appliquées aux récepteurs, pouvant être proches de 400 V (**figure 3.36**). Il est évident que les appareils prévus pour fonctionner sous 230 V ne pourront pas supporter longtemps une telle surtension. Pourtant aucun dispositif de protection automatique n'est prévu, sauf pour des appareils de forte valeur ou de forte criticité d'utilisation (appareils médicaux par exemple). Seules des dispositions préventives peuvent être appliquées.

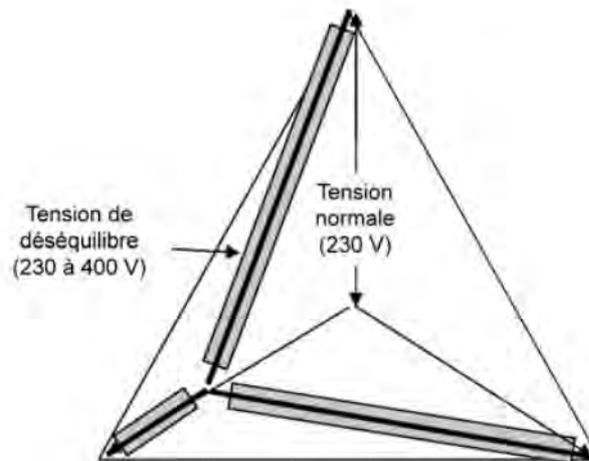


Figure 3.36 – En cas de coupure du neutre, la tension entre phase et neutre peut s'élever jusqu'à 400 V.

Les causes les plus probables de coupure du neutre sont :

□ Rupture du conducteur neutre ou brûlure d'une borne

La rupture du conducteur intervient près d'une borne, due à un mauvais serrage ou un choix de borne inadapté. Il faut reconnaître que les bornes à serrage élastique apportent une solution significative. On rencontre d'ailleurs ce type de bornes dans beaucoup d'appareils à usage domestique.

□ Utilisation de fusible sur le neutre

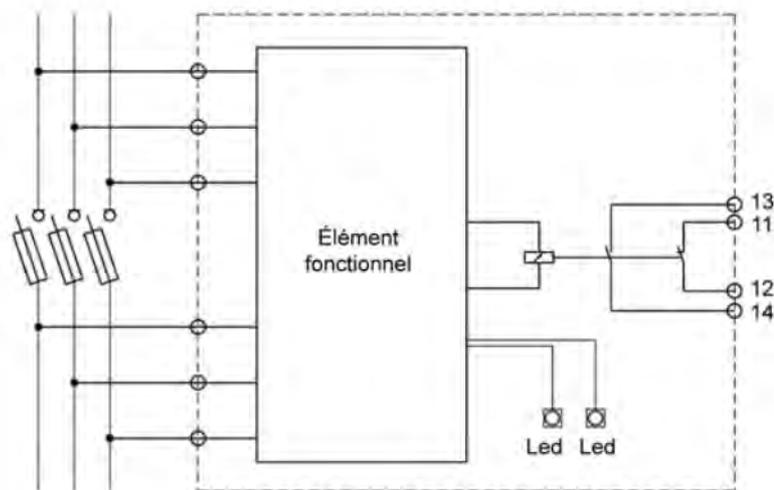
Lorsque celui-ci est nécessaire, il doit entraîner la coupure simultanée des phases. Pour éviter cette situation, certains fusibles peuvent être équipés d'un dispositif mécanique de détection de fusion, nommé « percuteur ». Celui-ci est destiné à commander un contact auxiliaire capable de commander l'ouverture d'un contacteur tétrapolaire. La solution souffre de plusieurs défauts :

- les percuteurs ne sont pas toujours fiables. Leur fonctionnement ne peut être contrôlé ;
- les cartouches fusibles peuvent être montées à l'envers ;
- le contacteur n'existe pas toujours, principalement en protection de ligne dans les tableaux de distribution.

Pour pallier les deux premiers défauts, des dispositifs électroniques de surveillance de fusion de fusibles sont proposés sur le marché.



(a)



(b)

Figure 3.37 – Fusibles à percuteurs et relais de détection de fusion de fusibles.

Curieusement, la norme NF C15-100 affecte cette probabilité de défaillance aux seuls schémas TT et TN. En schéma IT, le neutre peut être rompu pour les mêmes raisons, entraînant les mêmes conséquences¹.

3.6.2 Premier défaut en schéma IT

En cas de défaut d'isolement amenant le potentiel d'une phase à celui de la terre, les autres phases sont portées à la tension composée $U_0 \times \sqrt{3}$, soit 400 V en réseau 230/400 V. Si des récepteurs monophasés sont utilisés sur ces phases, ceux-ci devront avoir une tension assignée d'isolement supérieure à cette valeur. Les appareillages ne posent en principe pas de difficulté, bien qu'une prise de courant, par exemple, soit marquée pour une tension d'isolement de 250 V. Mais pour ce qui est des appareils d'utilisation, rien n'est vraiment organisé, en marquages ou en essais afin de vérifier leur aptitude à être utilisés en schéma IT. La norme NF C15-100 et ses rédacteurs se retranchent sur le fait que le domaine d'application de la norme est limité aux parties fixes d'une installation.

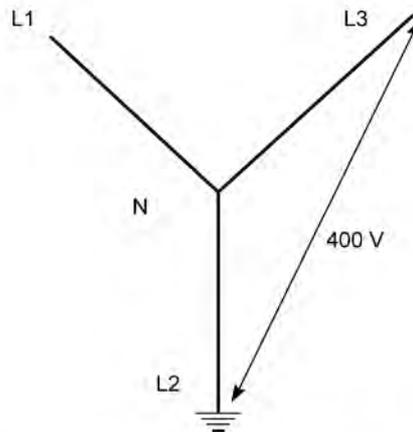


Figure 3.38 – Surtension en cas de premier défaut en schéma IT.

En revanche, qu'en est-il des appareils à usage « parodomestiques » (aspirateurs, machines à café, matériels de bureautique, luminaires), utilisés dans les centres commerciaux, les bureaux ou hôpitaux dont le réseau serait en schéma IT ? Ceux-ci sont pour la plupart prévus pour une tension assignée d'isolement de 250 V. Ces appareils sont parfois équipés de filtres calibrés pour une tension de 230 V. Rappelons-nous que le schéma IT est totalement ignoré de la plupart des pays étrangers. Il n'y a aucune raison pour que les constructeurs conçoivent leurs produits pour ce schéma.

La solution raisonnable serait de bannir le neutre en schéma IT. C'est ce que conseille la norme ainsi que le décret du 14-11-88, mais sans aller jusqu'à l'imposer. Pour les bâtiments d'usage « tertiaire » où le neutre est largement utilisé, les schémas TN et TT sont à préférer. Une autre solution serait d'utiliser systématiquement des appareils d'utilisation de classe II, à double isolation ou isolation totale. Ceux-ci n'ayant pas de masse accessible, ne sont pas raccordés à la terre.

1. Il faut se souvenir que dans l'esprit de la norme, le neutre ne devrait pas être distribué en schéma IT.

Nous rappelons nos observations concernant la fonction de sectionnement dans cette même situation (§ 3.1.2).

3.6.3 Défaut à la terre de la haute tension

Les différentes configurations de mise à la terre des postes de transformation sont expliquées en partie C.

Pour rappel,

- I_E est la partie du courant de défaut à la terre dans l'installation à haute tension qui s'écoule par la prise de terre des masses du poste de transformation.
- R_p est la résistance de la prise de terre des masses du poste de transformation.
- R_A est la résistance de la prise de terre des masses de l'installation à basse tension.
- R_B est la résistance de la prise de terre du neutre de l'installation à basse tension, pour des installations à basse tension dans lesquelles la prise de terre des masses du poste et du neutre, sont électriquement indépendantes.
- R_{PB} est la résistance des prises de terre interconnectées du neutre et des masses du poste de transformation.

Signification de la lettre-code concernant le poste :

- le poste *S* est relié à une terre séparée des autres terres ;
- le poste *N* est relié à la terre du neutre ;
- le poste *R* est relié à une terre commune au neutre et aux masses.

Tableau 3.11 – Surtension en cas de défaut à la terre de la haute tension.

Schéma	Neutre	Masses	Poste	Surtension au poste de transformation	Surtension subie par les matériels BT
TNR	T	N	R	U_0	U_0
TNS	T	N	S	$R_{pb} \times I_e + U_0$	U_0
TTN	T	T	N	U_0	$R_{pb} \times I_e + U_0$
TTS	T	T	S	$R_p \times I_e + U_0$	U_0
ITR	I	T	R	$U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$
ITN	I	T	N	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_{pb} \times I_e + U_0 \times \sqrt{3}$
ITS	I	T	S	$R_p \times I_e + U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$

3.6.4 Surtensions dues à un effet transitoire

Les effets transitoires envisagés sont de deux catégories :

- surtensions dues à des manœuvres ou des changements brutaux provoqués par des événements liés à l'installation ;
- surtensions dues à des orages.

Ces surtensions se caractérisent par une valeur élevée et un temps d'application très court.

Pour bien comprendre le problème de ces surtensions, nous devons identifier :

- le « coupable » ;
- le mode de transmission ;
- la « victime ».

Pour compléter ces éléments, il y a lieu de rappeler deux règles simples de l'électricité :

1) Toute variation d'intensité appliquée à une self induction engendre une force électromotrice tendant à s'opposer à cette variation. C'est la loi de Lentz qui s'exprime par :

$$E = -L \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

2) Toute variation de tension appliquée à un condensateur engendre une intensité. C'est la loi de Coulomb qui s'exprime par :

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (3.2)$$

Ces deux lois de base ont également pour corollaire :

Toute variation de flux magnétique reçu par un conducteur génère sur celui-ci une force électromotrice E égale à :

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3.3)$$

3) À ces lois il convient d'ajouter cette dernière : toute variation de champ électrique de haute fréquence reçu par un conducteur génère sur celui-ci un courant électrique.

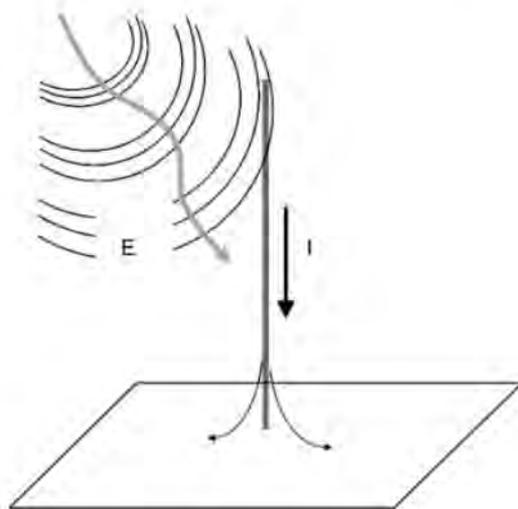


Figure 3.39 – Action d'un champ électrique sur un fil.

$$I = E \frac{L^2 F}{3} \times 10^{-4} \quad (3.4)$$

- I : courant collecté par le conducteur en A ;
- E : champ électrique en V/m ;
- L : longueur du fil en m ;
- F : fréquence en MHz.

De ces règles, on peut retenir que toute variation de courant engendre une tension et que toute variation de tension génère un courant.

3.6.5 Notion de couplage

Cette notion a pour but d'expliquer le principe de génération ou de transmission d'une surtension. La méthode consiste à identifier comment un *coupable* peut perturber une *victime*.

Six modes de couplage sont identifiés :

- couplage par « impédance commune » ;
- couplage « capacitif » ;
- couplage par « diaphonie inductive » ;
- couplage par « diaphonie capacitive » ;
- couplage d'un champ électrique sur un fil ;
- couplage d'un champ magnétique sur une boucle.

Nous ne commenterons pas les types 2 et 4 qui concernent surtout les ensembles électroniques.

■ Couplage par impédance commune

Ce mode est une conséquence directe de la loi d'Ohm : une tension appliquée à un conducteur provoque une différence de potentiel égale à $U = R \times I$.

APPLICATIONS

Un courant perturbateur parcourant un conducteur PE ou de liaison équipotentielle de résistance R_{pe} provoque entre deux points de ce conducteur une ddp U égale à $R_{pe} \times I_{perturbateur}$.

La conséquence pratique est que les conducteurs de protections (PE) doivent avoir la même origine. Les parties conductrices d'un ensemble étant reliées entre elles par leur montage de façon incontrôlable électriquement, doivent être interconnectées le plus souvent possible par des liaisons équipotentielles les plus courtes possibles.

■ Couplage par diaphonie inductive

Une diaphonie est la génération d'une tension entre deux fils aller-retour devant transmettre un signal, ou simplement un courant.

Un conducteur parcouru par un courant I génère un flux magnétique qui sera intercepté par une ligne constituée de deux conducteurs formant une boucle réceptrice (**figure 3.40**).

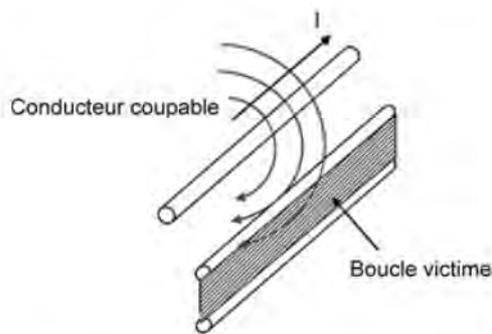


Figure 3.40 – Principe du couplage par diaphonie.

Ainsi un conducteur de terre qui serait parcouru par un pic brutal de courant, induirait sur ses conducteurs voisins une tension perturbatrice.

■ Couplage d'un champ électrique sur un fil

Le couplage d'un champ électrique sur un fil a été expliqué plus haut il est surtout sensible en hautes fréquences, mais les fronts montants de 8 ou 10 ms sont assimilables à un signal HF.

Il faut en déduire qu'il faut bannir tous fils libres de potentiel. Les fils disponibles dans un toron ou un câble multiconducteur doivent être reliés des deux côtés à la masse la plus proche.

■ Couplage d'un champ magnétique sur une boucle

Le couplage d'un champ magnétique sur une boucle est le plus fréquent et le plus générateur de surtensions. Pourtant il est trop souvent ignoré.

Lorsqu'un conducteur de protection est câblé de façon éloignée des conducteurs actifs une boucle de réception s'offre au champ magnétique (figure 3.41). Cela a pour conséquence l'apparition d'une surtension importante.

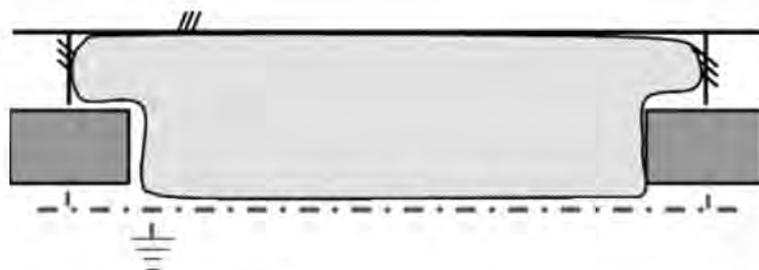


Figure 3.41 – Boucle formée par les conducteurs actifs et le PE.

Un cas encore plus fréquent se présente lorsqu'un appareil type filtre ou parafoudre est monté de manière éloignée des tôles les plus proches (fond d'armoire par exemple). La figure 3.42 montre qu'une boucle de réception est formée. Elle sera génératrice d'une forte surtension. Le parafoudre sera inefficace, son montage incorrect engendrera une situation pire qu'en son absence.

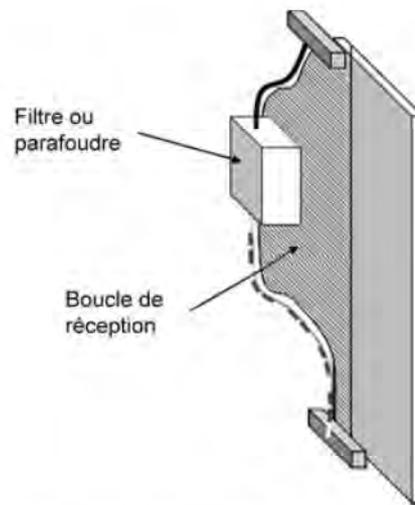


Figure 3.42 – Montage incorrect d'un filtre ou parafoudre.

3.6.6 Notion d'effet réducteur

Un conducteur rectiligne éloigné de tout élément magnétique présente une self inductance de $1 \mu\text{H}/\text{m}$.

Cela signifie par exemple que lorsqu'un courant de choc de forme 8/20 (soit un front de $8 \mu\text{s}$) et de valeur 20 kA traverse un conducteur de 2 m , la tension générée entre les deux extrémités de ce conducteur sera de :

$$E = -L \frac{di}{dt} = 2 \cdot 10^{-6} \times 20 \cdot 10^3 / (8 \cdot 10^{-6}) = 40\,000 / 8 = 5\,000 \text{ V}$$



Figure 3.43 – Plaquer les conducteurs contre la platine de montage.

Lorsqu'un conducteur est plaqué contre une tôle, sa self inductance se voit diminuée dans un rapport pouvant atteindre 1/3, même 1/15. La valeur de 1/10 peut être prise pour guide.

Dans le cas cité, la surtension ne serait plus que de 500 V au lieu de 5 000 V !

L'explication est que l'ensemble conducteur-tôle se comporte comme un transformateur dont le secondaire serait en court-circuit. L'impédance vue du primaire est considérablement diminuée.

Cet effet est maximal en HF. Il l'est également pour des fronts d'intensité de quelques microsecondes.

3.6.7 Autres causes de surtensions

■ Coupure d'une bobine de relais ou contacteur

Lorsqu'un contact ouvre le circuit d'une bobine, une tension inverse tend à s'opposer à la variation du flux. Cette tension s'exerce aux bornes du contact, créant un arc. Cet arc rétablit le courant et annule la tension. La tension étant retombée l'arc s'éteint provoquant à nouveau un dI/dt .

Cela se répète une grande quantité de fois à une fréquence de l'ordre du mégahertz ! C'est pourquoi il est recommandé, voire obligatoire, de disposer aux bornes des bobines, (y compris les relais miniatures) un dispositif de décharge : bloc « RC », varistance ou diode inverse pour les tensions continues (figures 3.44 et 3.45).



Figure 3.44 – Surtension à la coupure d'une bobine.

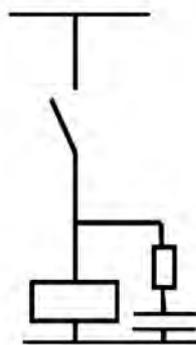


Figure 3.45 – Circuit RC aux bornes d'une bobine.

■ Cas de génération de pointes d'intensité

Citons encore quelques cas assez courants dans les installations de grande puissance :

□ Démarrage des moteurs

Nous avons vu qu'au démarrage d'un moteur (voir § 3.4.4, *Classes de déclenchement*), une pointe d'intensité instantanée de valeur de 12 à 16 fois l'intensité nominale du moteur peut se produire, ne durant pas plus que 3 ms.

□ Batteries de condensateurs

Beaucoup d'installations comportent des batteries de condensateurs ayant pour fonction de réduire la consommation de puissance réactive. Ces ensembles sont réunis par crans commandés par contacteur sous le contrôle d'un régulateur de facteur de puissance.

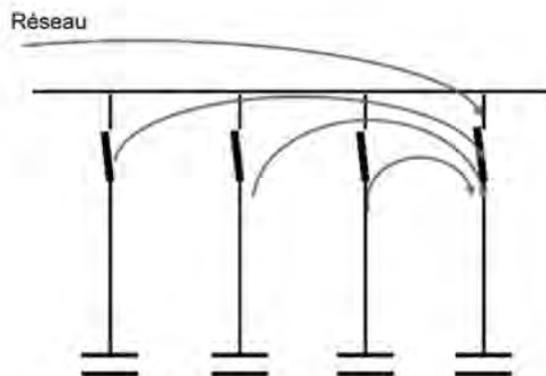


Figure 3.46 – Les condensateurs chargés se déchargent sur le dernier cran mis sous tension.

Lorsque le dernier cran de la batterie s'enclenche, le courant est fourni par le réseau, mais aussi par les autres condensateurs déjà chargés. Il s'ensuit un courant d'appel considérable qui pourrait provoquer la soudure du contacteur et de fortes perturbations sur le réseau.

La parade utilisée par les constructeurs pour amortir la pointe, afin d'éviter la soudure des contacteurs, est d'insérer une faible résistance 1 ou 2 ms avant la fermeture des pôles (voir chapitre 4, § 4.3.2, figure 4.15).

□ Fermeture des appareils de connexion

Lorsqu'un interrupteur, un disjoncteur ou un contacteur se ferme, le choc mécanique transmis à un ensemble élastique provoque inévitablement des mini-rebondissements. De plus la forme des pôles favorise une répulsion électrodynamique. L'effet provoqué est la production de micro-ouvertures accompagnées d'arcs. Ce comportement ne serait décelable que par un appareillage spécifique. Il peut avoir pour conséquence la soudure des pôles, ce qui limite le pouvoir de fermeture. Tant que ce régime est supportable par l'appareil, les variations faibles mais rapides d'intensité peuvent perturber des circuits « victimes ».

3.6.8 Protection des matériels électriques contre les surtensions

Les matériels électriques d'une installation (c'est-à-dire sauf les appareils d'utilisation de type domestique ou bureautique) doivent par leur conception, confirmée par des essais, tenir aux surtensions suivantes :

Tableau 3.12 – Contraintes de tension en fonction de la durée du défaut (NF C15-100 tableau 44A).

Durée(s)	Contraintes de tension admissibles par les matériels des installations à basse tension (U_{tb}) (V)
> 5 s	$U_0 + 250$
≥ 5 s	$U_0 + 1200$

NOTE : la première ligne du tableau est relative aux réseaux d'alimentation à haute tension ayant des temps de coupure longs, par exemple schémas à neutre compensé.

La seconde ligne est relative aux réseaux d'alimentation à haute tension ayant des temps de coupure courts, par exemple schémas à neutre faiblement impédant.

Les matériels installés sont classés selon leur aptitude à supporter une « surtension de choc », par catégories de surtension. La caractéristique qui les différencie est la tension de tenue aux chocs électriques U_{imp} .

Tableau 3.13 – Catégories de surtension.

Catégorie de surtension	Tenue aux chocs U_{imp} pour un réseau 230/400 V	Description	Exemples
I	1,5 kV	Matériels sensibles raccordés aux circuits terminaux	<ul style="list-style-type: none"> Appareils électroniques
II	2,5 kV	Matériels moyennement sensibles raccordés à l'installation fixe du bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> Appareils domestiques non électroniques Outils portatifs
III	4 kV	Matériels d'installation de haut niveau de fiabilité	<ul style="list-style-type: none"> Tableaux de distribution Équipement électrique des machines industrielles Canalisations électriques
IV	6 kV	Matériels situés au niveau des sources	TGBT

RÈGLE

Les matériels d'installation doivent supporter les surtensions auxquelles elles sont susceptibles d'être soumises. Si existe un risque pour qu'un matériel ou ensemble de matériels puisse être soumis à une surtension supérieure à leur valeur U_{imp} admissible, un **dispositif limiteur de tension** doit être installé au niveau de leur alimentation.

REMARQUE IMPORTANTE

Il est essentiel de noter qu'il s'agit de protéger les « victimes » potentielles. Il serait en effet illusoire de limiter les effets des « coupables », car on ne peut pas empêcher de façon absolue les transmissions par couplages dont leur principe est expliqué ci-dessus.

3.6.9 Parafoudres

C'est le nom choisi par les constructeurs français pour définir les limiteurs de surtension, quelle que soit leur utilisation.

Les parafoudres sont définis par la norme EN 61643-11. Celle-ci propose trois types (1 à 3) de parafoudres auxquels sont associées trois classes d'essai (I à III). Toutefois la NF C15-100 et son guide associé (UTE C15-443) traitant de la *protection des installations basse tension contre les surtensions* ne donne pas d'application pour l'utilisation des parafoudres de type 3.

Ces normes sont assez récentes, de même que leurs règles d'application. Ce qui donne aux professionnels l'impression d'utiliser des concepts et des produits nouveaux. Pourtant les parafoudres font partie des appareillages les plus anciens. Ils ont d'abord été utilisés sur les lignes de télégraphie, puis aux installations basse tension dont le premier mode d'exploitation était en neutre isolé (*voir partie C*). La **figure 3.47** présente un parafoudre figurant dans une illustration de 1895.

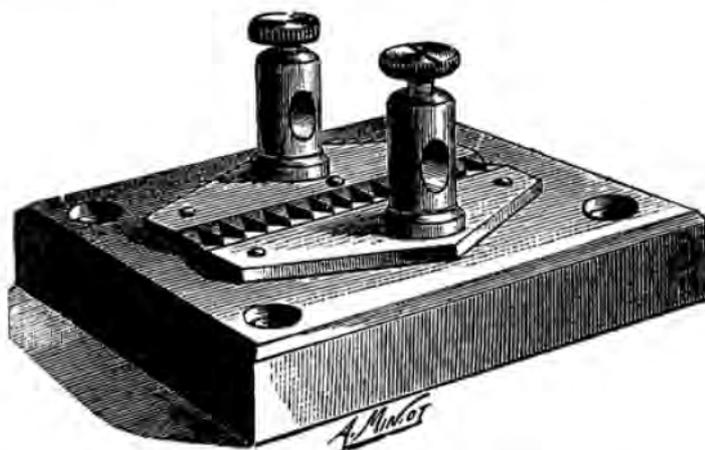


Figure 3.47 – Parafoudre figurant dans une illustration datant de 1895.

- **Parafoudres de type 1**

Les parafoudres de type 1 sont capables d'écouler des courants importants. Ils sont utilisés pour réduire la différence de potentiel entre le système de protection contre

la foudre et l'installation électrique lors de l'écoulement du courant de foudre du paratonnerre de l'installation. L'essai le plus significatif est réalisé avec l'onde de choc en tension de 10/350 μs (voir **figure 3.48**).

■ Parafoudres de type 2

Les parafoudres de type 2 sont surtout destinés à limiter une tension à une valeur U_p . L'essai le plus significatif est réalisé avec l'onde de choc en tension de 8/20 μs (voir **figure 3.48**).

■ Caractéristiques principales des parafoudres

U_p : niveau de protection. C'est la tension limitée par le parafoudre. Pour exprimer simplement sa signification, il faut que $U_p < U_{imp}$ des victimes potentielles.

U_c : tension maximale de régime permanent. Doit être supérieure à la tension maximale pouvant être appliquée compte tenu de la tension du réseau, du schéma de liaison à la terre et du mode de connexion du parafoudre.

U_T : tension de tenue aux surtensions temporaires dues à des défauts sur le réseau BT (voir ci-dessus).

I_n : courant nominal de décharge. La valeur recommandée pour une installation alimentée par le réseau public est de 5 kA.

I_{max} : courant maximal de décharge caractérisant les parafoudres de type 2.

I_{imp} : courant de choc caractérisant les parafoudres de type 1. La valeur minimale est de 12,5 kA.

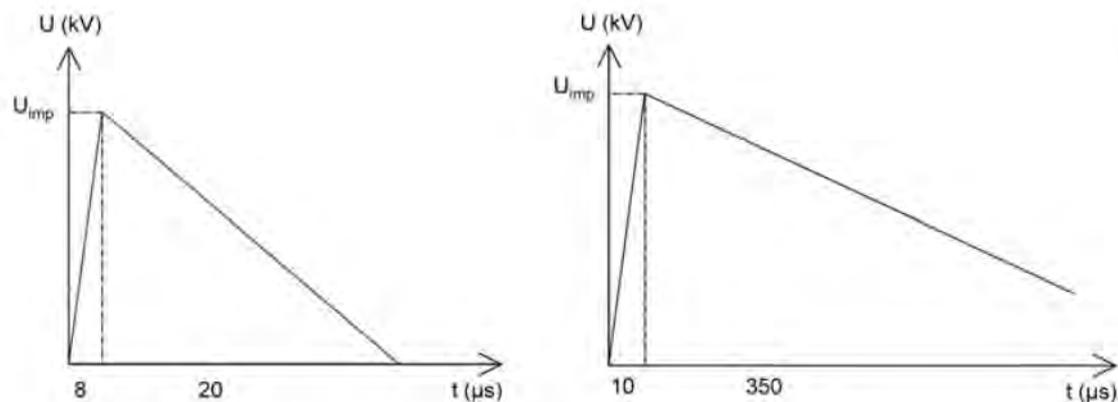


Figure 3.48 – Forme de l'onde de choc d'essai.

À gauche pour les parafoudres de type 2 : onde 8/20.

À droite pour les parafoudres de type 1 : onde 10/350.

■ Choix des parafoudres

Le guide UTE C15-443 présente un tableau de choix des parafoudres en fonction des caractéristiques U_c et U_T minimales (**tableau 3.14**).

Tableau 3.14 – Valeurs minimales des tensions U_C et U_T de parafoudres.

Parafoudre connecté entre	Schémas de liaison à la terre du réseau									
	TT		TN-C		TN-S		IT avec neutre distribué		IT sans neutre	
	U_C	U_T	U_C	U_T	U_C	U_T	U_C	U_T	U_C	U_T
Conducteur de phase et conducteur neutre	253 V	334 V	-	-	253 V	334 V	253 V	334 V	-	-
Chaque conducteur de phase et PE	253 V	400 V	-	-	253 V	334 V	400 V	-	400 V	400 V
Conducteur neutre et PE	230 V	-	-	-	230 V	-	230 V	-	-	-
Chaque conducteur de phase et PEN	-	-	253 V	334 V	-	-	-	-	-	-

3.6.10 Parafoudres à double caractéristique

Certains constructeurs proposent à leur catalogue des parafoudres câblés selon le schéma C2, dont l'élément monté entre neutre et terre répond au type 1. Ces modèles ont donc la double caractéristique des types 1 et 2.

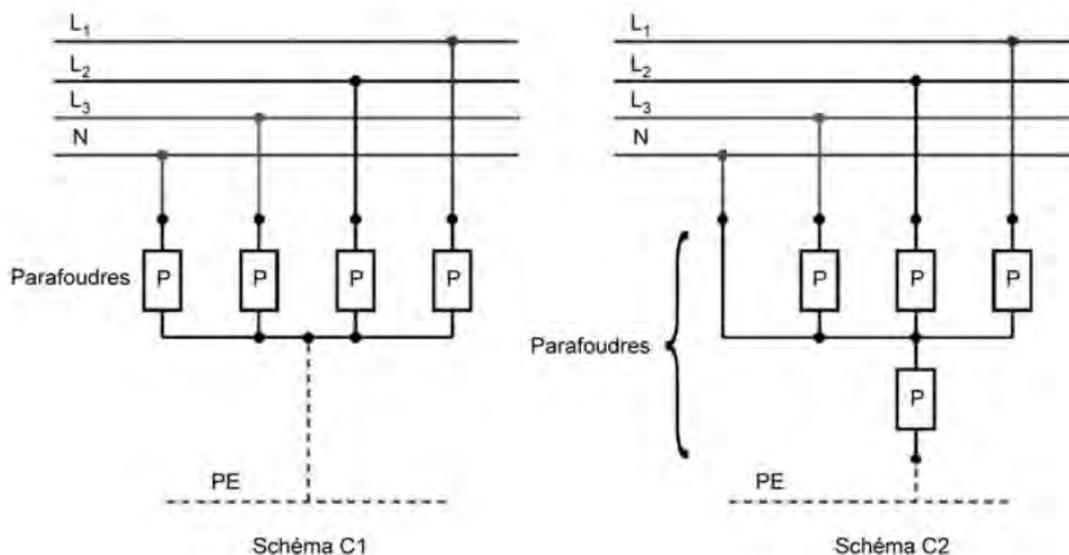


Figure 3.49 – Deux types de montage des parafoudres.

3.6.11 Observations

Le guide UTE C15-443 propose une méthode de calcul d'évaluation du risque, basée sur la probabilité pour une installation d'être victime d'un coup de foudre. Cela afin de justifier la pose d'un parafoudre ou non. Cela pourrait économiquement se comprendre pour une installation domestique, mais on peut douter qu'une telle approche soit accessible à l'artisan ou au particulier.

On n'imaginerait plus qu'une telle démarche soit appliquée à la protection contre les courts-circuits. En revanche il serait souhaitable de mieux expliquer les règles de câblage de ces protections. En effet un parafoudre mal câblé est totalement inefficace, voire plus dangereux que son absence.

Dans le cas du schéma IT, un premier défaut peut se produire et rester permanent jusqu'à ce qu'une intervention de réparation soit effectuée. Celui-ci aura lieu en toute probabilité sur un circuit terminal, proche des appareils d'utilisation, ou même encore dans ces appareils eux-mêmes. Dans une telle situation cette mise à la terre du réseau par ce défaut d'isolement constituera le chemin privilégié d'une décharge de courant, suite à un orage. Un parafoudre en tête d'installation sera trop éloigné pour protéger efficacement l'installation et les appareils qui y sont raccordés. En d'autres termes, un schéma IT ne devrait pas être utilisé en cas de risque, même faible, de coup de foudre. Ce schéma doit être réservé aux installations industrielles qui n'utilisent que des composants et machines de catégorie de surtension III, sans utilisation du neutre.

4 • FONCTIONS DE COMMANDE

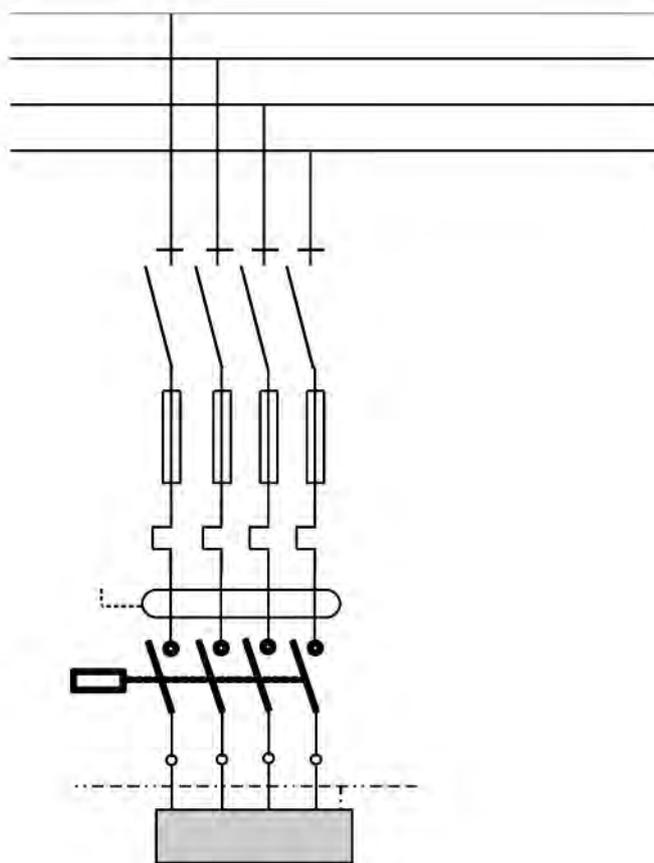


Figure 4.1

La commande électrique est la technique qui a pour but de provoquer la marche et l'arrêt des appareils et systèmes électriques : moteurs des machines, électrovannes, appareils de production de chaleur, éclairage...

La marche et l'arrêt peuvent prendre des variantes plus complexes :

- marche avant/marche arrière ;
- marche petite/grande vitesse ;
- plus vite/moins vite ;
- arrêt simple/arrêt d'urgence ;
- plus chaud/moins chaud ;
- etc.

Un appareil de commande peut également mettre en service/hors service un groupe de circuits, notamment en tête d'installation.

La fonction de commande est la propriété d'un appareil devant établir et couper un courant électrique dont les caractéristiques doivent être connues. Elle peut également avoir un but de régulation afin d'assurer un démarrage ou freinage progressif pour des raisons mécaniques ou électriques, ou même une fonctionnalité de variation de vitesse.

Enfin la fonction de commande est souvent associée à la protection contre les surcharges, des moteurs en particulier.

Un cas spécifique de cette fonction est la commande de sécurité. Cette notion englobe les modes d'arrêts d'urgence et de coupure d'urgence.

Les appareillages industriels de commande sont :

- les interrupteurs : ce sont des appareils à commande manuelle ;
- les contacteurs : ce sont des appareils commandés autrement qu'à la main ;
- les démarreurs : ce sont des combinaisons d'appareils en vue d'assurer le démarrage, l'arrêt et la protection des moteurs.

4.1 Interrupteurs

4.1.1 Définition (NF C15-100 § 253.2)

« Un interrupteur (mécanique) est un appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris éventuellement les conditions spécifiées de surcharge en service, ainsi que de supporter pendant une durée spécifiée des courants dans des conditions anormales spécifiées du circuit telles que celles du court-circuit. »



Figure 4.2 – Exemple d'interrupteur (Socomec).

REMARQUE

Un interrupteur peut être capable d'établir des courants de court-circuit mais n'est pas capable de les couper.

À bien y regarder, cette définition s'applique bien à tous types d'interrupteurs, aussi bien ceux que nous utilisons tous les matins en allumant notre salle de bain, que les gros interrupteurs capables de mettre en route une grosse unité de production.

Les « ingrédients » de cette définition sont :

- L'interrupteur doit supporter un courant dans les conditions normales. Nous nommerons provisoirement cette première caractéristique : **courant assigné d'emploi**. Nous la définirons plus précisément ci-après.
- L'interrupteur doit pouvoir établir un courant dans les conditions normales (par exemple démarrer un moteur) : nous nommerons cette caractéristique **pouvoir assigné de fermeture**.
- L'interrupteur doit pouvoir interrompre un courant dans les conditions normales (par exemple arrêter un moteur durant sa phase de démarrage) : nous nommerons cette caractéristique **pouvoir assigné de coupure**.
- L'interrupteur doit pouvoir supporter des surcharges de service telles que celles provoquées par les démarrages des moteurs ou l'allumage de ballasts, ainsi que des surintensités dues à des courts-circuits éventuels : nous nommerons cette caractéristique **courant de courte durée admissible**.
- L'interrupteur doit pouvoir établir sans destruction et sous condition de disposer d'une protection amont appropriée, un courant de court-circuit : nous nommerons cette caractéristique **pouvoir assigné de fermeture sous court-circuit**.

Afin de définir de façon précise le courant assigné d'emploi, la notion de **catégorie d'emploi** doit être préalablement définie

Les catégories d'emploi définissent l'application prévue du dispositif de commande : interrupteur, contacteur ou démarreur. Les catégories sont énumérées dans le **tableau 4.1**.

Le courant assigné d'emploi se définit par la valeur du courant définie par le constructeur, d'utilisation d'un matériel (interrupteur, contacteur ou démarreur), en tenant compte de la tension assignée d'emploi, de la fréquence assignée d'emploi, du service assigné d'emploi (service continu, service intermittent, service temporaire¹), de la catégorie d'emploi, et du type d'enveloppe de protection, le cas échéant.

1. Voir définitions en annexe.

Tableau 4.1 – Catégorie d'emploi selon EN 60947-3 § 4.4.

Nature du courant	Catégorie d'emploi		Applications caractéristiques
	Manœuvres fréquentes	Manœuvres non fréquentes	
Courant alternatif	AC-20A	AC-20B	Fermeture et ouverture à vide
	AC-21A	AC-21B	Charges résistives, y compris surcharges modérées
	AC-22A	AC-22B	Charges mixtes résistives et inductives, y compris surcharges modérées
	AC-23A	AC-23B	Charges constituées par des moteurs ou autres charges fortement inductives
Courant continu	DC-20A	DC-20B	Fermeture et ouverture à vide
	DC-21A	DC-21B	Charges résistives, y compris surcharges modérées
	DC-22A	DC-22B	Charges mixtes résistives et inductives, y compris surcharges modérées (par exemple moteurs shunt)
	DC-23A	DC-23B	Charges constituées par des moteurs ou autres charges fortement inductives (par exemple moteurs série)

4.1.2 Quelques exemples

Selon le **tableau 4.1** :

- Un interrupteur prévu pour commander un circuit de chauffage doit être de catégorie AC-21A.
- Un interrupteur prévu pour commander un groupe de circuits d'éclairage doit être de catégorie AC-23B, éventuellement AC-22A, si l'éclairage est rarement commandé par cet appareil, mais normalement, par des commandes individuelles.
- Un interrupteur doit être de catégorie AC-23A, si sa fonction principale est de commander fréquemment en charge des circuits d'éclairage. Cette catégorie AC-23 est nécessitée par un pouvoir de fermeture élevé, qui est indispensable pour maîtriser les très forts courants à l'appel rencontrés dans ces circuits (y compris ceux d'éclairage à incandescence, car les résistances à froid des filaments sont très inférieures aux résistances en service).
- Un interrupteur général en tête de machine doit être de catégorie AC-23A, si la machine comporte plusieurs moteurs ne démarrant pas simultanément. Dans le cas contraire il doit de rapporter à une catégorie spécifique à la commande individuelle de moteur. Ce cas est développé ci-après en § 4.2.

- Un interrupteur en tête de tableau de distribution peut être de catégorie AC-22B ; il sera choisi dans la catégorie AC-22A s'il est manœuvré assez fréquemment, ou inversement en AC-21B pour les tableaux de fortes intensités ($\geq 2\,000\text{ A}$), car les manœuvres en surcharge sont inexistantes.

Un interrupteur peut avoir la fonction de sectionnement. Dans ce cas, tous les essais relatifs à cette fonction doivent être menés. En particulier, la vérification de l'aptitude à cette fonction doit être vérifiée après les essais d'aptitude à la fonction d'interrupteur.

Un disjoncteur peut avoir l'aptitude à la fonction d'interrupteur. Cette propriété n'est pas du tout implicite, la capacité de couper un fort courant n'entraîne pas obligatoirement celle de fermer et couper de nombreuses fois un courant selon une catégorie d'emploi.

Cette capacité doit être annoncée par le constructeur sous la forme $I_e(\text{AC-23 A}) = \text{xxx A}$. Dans cette occurrence, les essais de pouvoir de coupure sous court-circuit doivent être menés après les essais d'aptitude à la fonction d'interrupteur.

Enfin si le disjoncteur est déclaré apte à la fonction de sectionnement, les essais relatifs à cette fonction doivent être menés après les deux vérifications précédentes.

4.1.3 Interrupteur général

Cette fonction n'a pas de description en termes d'essais. Elle est relative à une obligation réglementaire, à savoir :

En tête d'installation un dispositif de coupure et de sectionnement doit être disposé afin de séparer le plus rapidement possible et en toutes circonstances l'installation de sa source.

Cette formulation résume celles du décret du 14-11-88, de la norme NF C15-100 et de la norme « machines » EN 60204-1.



Figure 4.3

Un interrupteur général doit être capable de couper le plus fort courant temporaire pouvant se présenter. L'appareil doit avoir la fonction de sectionnement et être capable d'être verrouillé en position « ouvert ».

Nous devons admettre qu'il n'est pas évident qu'un interrupteur (ou surtout un disjoncteur) fermé depuis un temps inconnu puisse s'ouvrir facilement avec toutes ses capacités. L'appareil peut être bloqué mécaniquement. Pour cela le seul remède est préventif : manœuvrer périodiquement l'interrupteur général.

Une seconde cause d'impossibilité d'ouverture de l'appareil est la soudure des pôles. Celle-ci peut être due à un échauffement dû à des longues surcharges. Il est impératif de veiller à ce que l'interrupteur soit protégé en amont contre les surcharges par un dispositif recommandé par le constructeur.

Les pôles peuvent avoir soudé suite à un court-circuit. Il est également indispensable de veiller à ce que l'appareil soit protégé contre les courts-circuits. Voir à ce sujet, le chapitre **coordination de protection**.

4.1.4 Autres exigences concernant l'interrupteur général

La manœuvre d'ouverture doit s'effectuer en abaissant une manette ou un levier ; si la manœuvre est opérée par un bouton tournant, elle doit se faire par une rotation anti-horaire ; si l'organe de manœuvre est constitué de deux boutons « I » et « O », le bouton « O » doit être situé en bas ou à gauche.

L'organe de manœuvre doit être facilement reconnaissable et accessible, Il doit être monté entre 0,6 m et 1,7 m pour les équipements de machines ou entre 0,8 m et 1,6 m selon la norme EN 60439-1¹.

Lorsque l'interrupteur général est situé en tête d'un équipement de commande de machine, sa position « I sous tension » doit verrouiller l'ouverture de la porte donnant accès à l'appareillage de commande, si une tension autre qu'une très basse tension de sécurité est utilisée. L'ouverture de la porte ne peut se faire qu'en position « O ». Toutefois une disposition spéciale manœuvrable à l'aide d'un outil peut permettre cette ouverture sous tension.

4.1.5 Arrêt d'urgence

L'arrêt d'urgence s'applique à un processus ou un mouvement qu'il s'agit, en cas de danger, d'arrêter avec la plus grande sûreté.



Figure 4.4 – Interrupteur en boîtier assurant la fonction d'arrêt d'urgence.

1. Norme EN 60439-1 § 7.6.2.1 : instruction donnée pour la fonction de coupure d'urgence.

La séquence d'arrêt d'urgence n'entraîne pas obligatoirement une coupure immédiate et totale de la tension. Souvent un processus de freinage est engagé ; certaines parties vitales au maintien de la sécurité doivent rester sous tension. L'arrêt d'urgence peut être assuré par un interrupteur, mais le plus souvent il est assuré par une ou plusieurs commandes à distance, situées en différents endroits visibles et accessibles. Les commandes d'arrêt d'urgence doivent obligatoirement être de couleur rouge sur fond orange. Cette prescription fait partie des règles de sécurité des machines et implicitement du code du travail. La coupure d'urgence n'a pas l'obligation d'être de couleur rouge. Cependant, la tradition tend à préférer cette couleur. Toutefois si sur une porte d'armoire électrique cohabitent une commande d'interrupteur général et un arrêt d'urgence, seul ce dernier doit être rouge.

4.1.6 Coupure d'urgence

Cette fonction est demandée (NF C15-100 § 463) pour couper l'alimentation d'une installation ou une partie d'installation afin de supprimer un danger inattendu. Cette fonction peut être réalisée par un interrupteur, dans ce cas c'est bien souvent l'interrupteur général ; mais elle peut être réalisée par des commandes électriques : commande électrique motorisée, ou bobine à émission ou à manque de tension de disjoncteurs, ou par un contacteur. Il est nécessaire d'effectuer une opération manuelle afin de rétablir la tension.

Dans un tableau de distribution d'énergie on n'utilise pas de dispositif à manque de tension, bien qu'il soit à « sécurité positive », car dès la moindre coupure de tension, les dispositifs s'ouvriront automatiquement, ce qui rend l'installation inexploitable.

Ne pas confondre coupure d'urgence et arrêt d'urgence.

Un interrupteur ou contacteur ayant une fonction de coupure d'urgence ou d'arrêt d'urgence doit couper tous les conducteurs actifs. Si le neutre est distribué, il doit le couper de façon simultanée ou mieux un peu avant les pôles. Cependant le PEN ne doit pas être coupé.

4.1.7 Interrupteurs de maintenance

Appelés encore « interrupteurs pour entretien mécanique » ou encore « interrupteurs local de sécurité ».

Des ensembles mécaniques en mouvement sont souvent alimentés par un tableau centralisé situé souvent dans un local technique séparé de la zone de production. Celui-ci n'est pas accessible aux opérateurs mécaniciens qui ont la nécessité de s'assurer qu'un ensemble est totalement hors énergie en vue d'effectuer des opérations de maintenance, de réparation ou de modification. Cette fonction a les caractéristiques d'un interrupteur général et d'arrêt d'urgence (couleur et pouvoir de coupure). Il doit en plus être cadenassable par trois cadenas. Mais dans la position cadenassée, la remise sous tension doit absolument être infraudable, de plus il ne doit pas être possible de cadenasser l'appareil si l'un des pôles est soudé.

Ces appareils peuvent être associés à un dispositif de mise à la terre, utiles dans certains circuits sensibles : présence de condensateurs, réseaux en 690 V, risque d'effet d'antenne (*voir chapitre 3, § 3.6.4*).



Figure 4.5 – Interrupteur local pour entretien mécanique.

Enfin, la manœuvre d'ouverture de cet interrupteur doit provoquer de façon légèrement anticipée celle du départ du tableau centralisé. Puisqu'en position de coupure de sécurité l'appareil doit être infraudable, son boîtier ne doit pas pouvoir être ouvert dans cette position. Celui-ci ne peut être accessible qu'en position « I ». L'électricien autorisé devra alors verrouiller l'alimentation au tableau, en positionnant, par exemple, le tiroir correspondant en position « sectionné ». Souvent l'ensemble mécanique mis en maintenance fait partie d'une chaîne d'automatisme ou au moins d'une chaîne d'information. Un contact auxiliaire doit être mis à disposition en vue du traitement de la situation.

REMARQUE

L'expression « interrupteur de sécurité » ne doit être utilisée que pour exprimer la fonction requise, mais ne peut pas être une caractéristique d'un appareil proposé sur catalogue. Celui-ci ne peut justifier le qualificatif « de sécurité » que lorsqu'il est installé conformément à l'usage attendu.

4.1.8 Essais de type des interrupteurs

Les essais de type des interrupteurs sont définis par la norme EN 60947-3 § 7.2.4. Ils sont basés sur la définition des catégories d'emploi jugées représentatives de l'application de chacune d'elles.

Une **première série d'essais** est destinée à vérifier les pouvoirs de coupure et de fermeture assignés.

Tableau 4.2 – Définition des pouvoirs de coupure et de fermeture.

Catégorie d'emploi		Courant assigné d'emploi	Établissement			Coupure			Nombre de cycles de manœuvres
			I/l_e	U/U_e	$\cos \phi$	I_d/l_e	U_r/U_e	$\cos \phi$	
AC-20A	AC-20B	Toutes valeurs	–	–	–	–	–	–	
AC-21A	AC-21B	Toutes valeurs	1,5	1,05	0,95	1,5	1,05	0,95	5
AC-22A	AC-22B	Toutes valeurs	3	1,05	0,65	3	1,05	0,65	5
AC-23A	AC-23B	$0 < I_e \leq 100 \text{ A}$	10	1,05	0,45	8	1,05	0,45	5
AC-23A	AC-23B	$100 \text{ A} < I_e$	10	1,05	0,35	8	1,05	0,35	3
Catégorie d'emploi		Courant assigné d'emploi	I/l_e	U/U_e	L/R (ms)	I_d/l_e	U_r/U_e	L/R (ms)	Nombre de cycles de manœuvres
DC-20A	DC-20B	Toutes valeurs	–	–	–	–	–	–	
DC-21A	DC-21B	Toutes valeurs	1,5	1,05	1	1,5	1,05	1	5
DC-22A	DC-22B	Toutes valeurs	4	1,05	2,5	4	1,05	2,5	5
DC-23A	DC-23B	Toutes valeurs	4	1,05	15	4	1,05	15	5

Catégorie *C-**A : manœuvres fréquentes

Catégorie *C-**B : manœuvres non fréquentes

I = courant établi

I_c = courant coupé

I_e = courant assigné d'emploi

U = tension appliquée

U_e = tension assignée d'emploi

U_r = tension de rétablissement à fréquence industrielle ou en courant continu

Notons qu'un sectionneur, sans aptitude à couper un courant, est de catégorie AC-20. Les variantes AC-20A et AC-20B ne se distinguent que par le nombre de manœuvres mécaniques (voir **tableau 4.3**).

Tableau 4.3 – Nombre de manœuvres de coupure durant les essais de type des interrupteurs.

1	2	3	4	5	6	7	8
Courant assigné d'emploi	Nombre de cycles de manœuvres par heure	Nombre de cycles de manœuvres					
		Catégorie A : courant alternatif et continu			Catégorie B : courant alternatif et continu		
		Sans courant	Avec courant	Total	Sans courant	Avec courant	Total
$0 < I_e \leq 100 \text{ A}$	120	8 500	1 500	10 000	1 700	300	2 000
$100 < I_e \leq 315 \text{ A}$	120	7 000	1 000	8 000	1 400	200	1 600
$315 < I_e \leq 630 \text{ A}$	60	4 000	1 500	5 000	800	200	1 000
$630 < I_e \leq 2 500 \text{ A}$	20	2 500	500	3 000	500	100	600
$2 500 \text{ A} < I_e$	10	1 500	500	2 000	300	100	400

Une **seconde série d'essais** consiste à vérifier l'aptitude au fonctionnement en service des interrupteurs.

Les essais consistent à manœuvrer dans des « conditions normales » définies par le **tableau 4.4**, un certain nombre de cycles de manœuvres, comme le précise le **tableau 4.3**.

Les valeurs du **tableau 4.3** sont valables pour toutes les catégories, sauf pour les sectionneurs de catégorie AC-20A, AC-20B, DC-20A et DC-20B, où seuls les colonnes 5 ou 8 sont utilisables, mais sans courant. L'utilité principale de ce tableau est la distinction entre les catégories A : manœuvres fréquentes et B : manœuvres non fréquentes.

Tableau 4.4 – Valeurs d'essai pour la vérification de l'aptitude au fonctionnement en service.

Catégorie d'emploi		Valeur du courant assigné d'emploi	Établissement			Coupure		
			I/I_e	U/U_e	$\cos \phi$	I_c/I_e	U_r/U_e	$\cos \phi$
AC-21A	AC-21B	Toutes valeurs	1	1	0,95	1	1	0,95
AC-22A	AC-22B	Toutes valeurs	1	1	0,8	1	1	0,8
AC-23A	AC-23B	Toutes valeurs	1	1	0,65	1	1	0,65

I = courant établi

I_c = courant coupé

I_e = courant assigné d'emploi

U = tension appliquée

U_e = tension assignée d'emploi

U_r = tension de rétablissement à fréquence industrielle ou en courant continu

Tableau 4.4 – Valeurs d'essai pour la vérification de l'aptitude au fonctionnement en service. (Suite)

Catégorie d'emploi		Courant assigné d'emploi	I/I_e	U/U_e	L/R (ms)	I_d/I_e	U_r/U_e	L/R (ms)
DC-21A	DC-21B	Toutes valeurs	1	1	1	1	1	1
DC-22A	DC-22B	Toutes valeurs	1	1	2	1	1	2
DC-23A	DC-23B	Toutes valeurs	1	1	7,5	1	1	7,5

4.2 Contacteurs

Un contacteur est un appareil mécanique de connexion (EN 60947-1 § 2.2.12) ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharge en service.



Figure 4.6 – Contacteurs (Télémechanique).

Les contacteurs les plus usuels sont actionnés à l'aide d'un électroaimant alimenté par une tension auxiliaire dite « tension de commande ».

Dans leur usage le plus courant, les contacteurs ont pour fonction de commander la marche ou l'arrêt d'un moteur, ou encore d'assurer un mode de démarrage ou de freinage, ou encore d'en réguler la vitesse.

Les contacteurs sont souvent associés à des relais de protection des moteurs contre les surcharges.

4.3 Démarreurs de moteurs

Les démarreurs de moteurs sont des appareils (EN 60947-1 § 1.1.2) ou ensemble d'appareils destinés à provoquer le démarrage des moteurs et à les amener à leur vitesse normale, à en assurer le fonctionnement continu, à interrompre leur alimentation et à assurer leur protection contre les surcharges ainsi que celle des circuits associés.

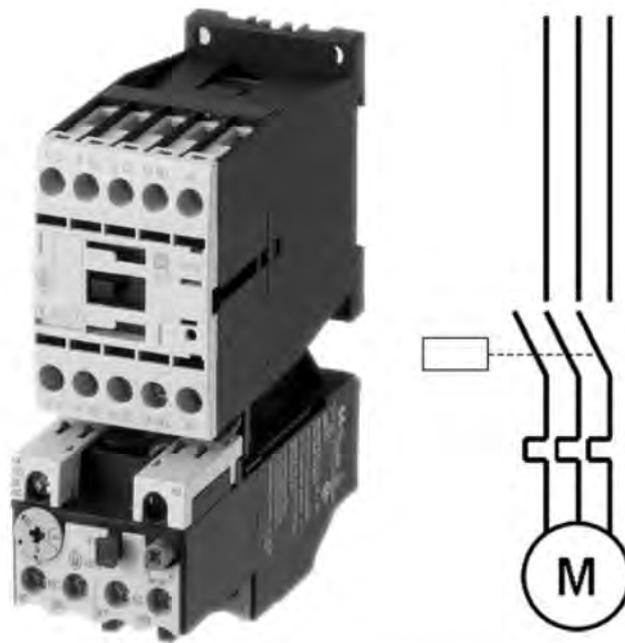


Figure 4.7 – Démarreur direct (Moeller Electric).



Figure 4.8 – Démarreur direct avec disjoncteur moteur (Télémécanique/Moeller Electric).

Le démarreur le plus simple est le **démarreur direct**. Il est souvent constitué d'un contacteur et d'un relais thermique de protection (**figure 4.7**). Cet assemblage, monté souvent en coffret, a été, à une certaine époque, nommé « discontacteur ». L'ensemble peut être composé également d'un disjoncteur dont le relais de surcharge est conçu pour la protection des moteurs et d'un contacteur (**figure 4.8**). Cet ensemble est particulièrement utile pour réaliser des « unités fonctionnelles » de protection moteur, dont la commande est automatisée.

Lorsqu'un démarreur direct ne nécessite pas de commande à distance, la fonction est très souvent réalisée par un « disjoncteur-moteur ». Cet appareil est actionné manuellement par deux boutons ou une manette rotative (**figure 4.9**). Il assure la protection contre les surcharges du moteur grâce à un déclencheur thermique. Ce type d'appareil comprend très souvent une fonction de protection contre les courts-circuits. Bien que peu encombrants et économiques ces appareils doivent répondre à toutes les normes concernées par les fonctions qu'ils assurent.



Figure 4.9 – Disjoncteur moteur.

ATTENTION

Certains disjoncteurs moteur n'assurent pas la fonction de sectionnement, ou ne prennent pas en charge la protection contre les courts-circuits, ou encore pour des raisons précises (protection des appareils de chauffage), n'assurent pas la protection contre les surcharges.

On rencontre les démarreurs directs et les disjoncteurs-moteurs en tête des machines simples (machines à bois), des équipements de garages (ponts élévateurs, compresseurs) ou agricoles (pompes)...

Toutefois, les machines, ou tous dispositifs mécaniques accessibles mus par l'énergie électrique, ne doivent pas être mis en mouvement par le simple retour de la tension. Ainsi une machine telle qu'une perceuse, tour, fraiseuse, convoyeur, élévateur, etc. ne doivent démarrer qu'après un ordre volontaire. En conséquence un disjoncteur

moteur ne peut convenir tel quel à ces applications. Ceux-ci doivent être équipés d'un déclencheur à manque de tension. Lorsque ces machines sont classées particulièrement dangereuses par le code du travail, un arrêt d'urgence doit être installé (**figure 4.10**).



Figure 4.10 – Coffret de protection de machine (Moeller Electric).

4.3.1 Démarreurs électromécaniques

Nous savons (*voir § 3.4.4, Protection des moteurs contre les surcharges*) qu'un démarrage de moteur alternatif à cage provoque un courant de démarrage dont la valeur la plus représentative est 6 fois le courant nominal. La **figure 4.11** représente les courbes (vitesse/couple) et (vitesse/intensité) de démarrage direct d'un moteur.

Dans certains réseaux de grandes longueurs ou de faible puissance d'alimentation, le courant de démarrage peut provoquer une chute de tension importante et perturber le reste du réseau. Dans ces conditions, les moteurs sont démarrés selon une séquence de mise sous tension progressive. Cette combinaison est réalisée à l'aide de démarreurs. Nous appellerons « démarreurs conventionnels » ceux qui sont réalisés à l'aide de contacteurs ; pour certaines applications des démarreurs électroniques sont utilisés.

Nous n'évoquerons ici que deux types de démarreurs conventionnels pour expliquer les **catégories d'emploi** des contacteurs utilisés dans ces conditions : le démarreur statorique à résistance et le démarreur « étoile-triangle ». Dans les deux cas le courant de démarrage est réduit à environ $4 \times I_n$ pour les démarreurs statoriques ou de $2 \times I_n$ pour les démarreurs étoile-triangle.

Dans le cas du démarreur étoile-triangle (**figure 4.12**), la séquence de démarrage est :

- phase de couplage étoile : K1 et K3 fermés et K2 ouvert ;
- phase de couplage triangle : K1 et K2 fermés et K3 ouvert. L'état reste inchangé jusqu'à l'arrêt.

On observe que K1 et K2 sont calibrés pour le courant $I_n \sqrt{3}$ et subissent un courant de démarrage de $2 \times I_n$.

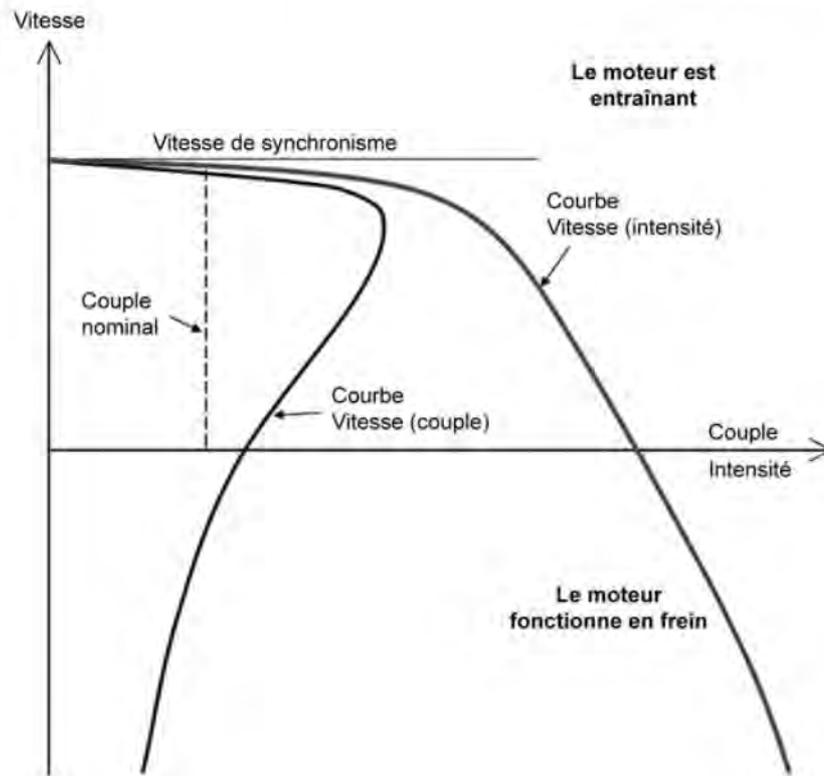


Figure 4.11 – Caractéristiques de démarrage direct d'un moteur.

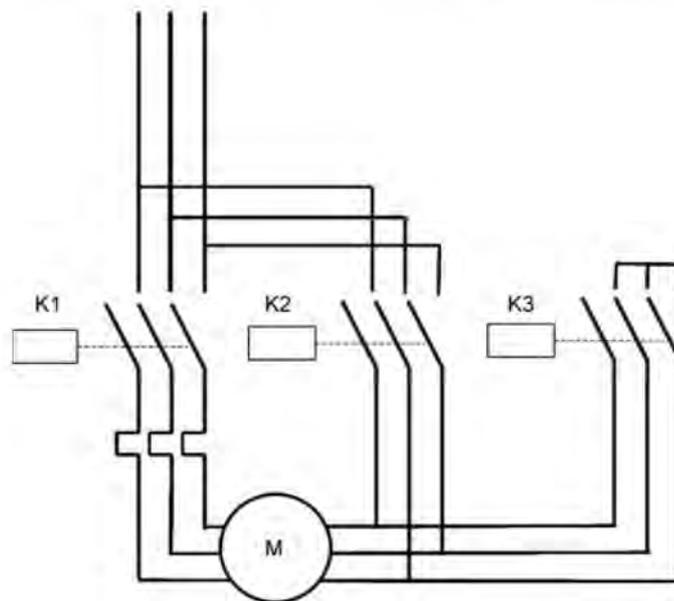


Figure 4.12 – Démarreur étoile triangle.

Le contacteur K3 subit un courant de démarrage de $2 \times I_n$ mais avec un service temporaire de quelques dizaines de secondes par cycle de démarrage. En conséquence ce contacteur est généralement déclassé. Il est choisi non pas en fonction de son intensité d'emploi, mais de ses pouvoirs de coupure et de fermeture.

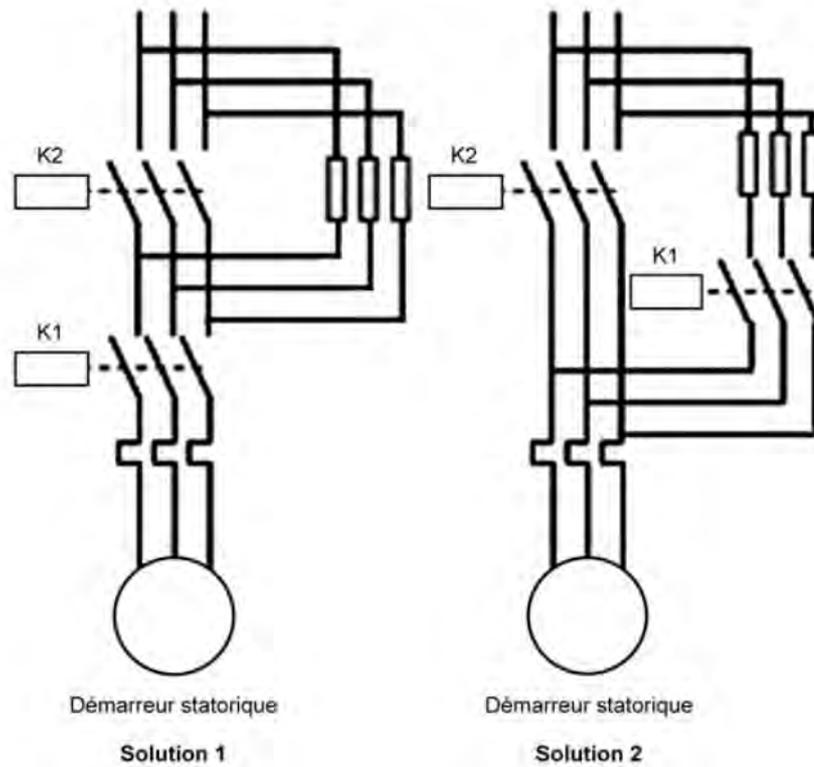


Figure 4.13 – Schéma de principe d'un démarreur statorique.

Dans le cas du démarreur statorique (**figure 4.13**) le courant de démarrage est, selon le choix de la résistance, de l'ordre de 2 à $4 \times I_n$. Dans la variante 2 du démarreur, le contacteur K1 ne sert plus après la première phase de démarrage, il peut être ouvert dès que K2 est fermé. Il a lui aussi un service temporaire. Avec cette courte explication sur les démarreurs, nous pouvons mieux appréhender les différentes catégories d'emploi des contacteurs.

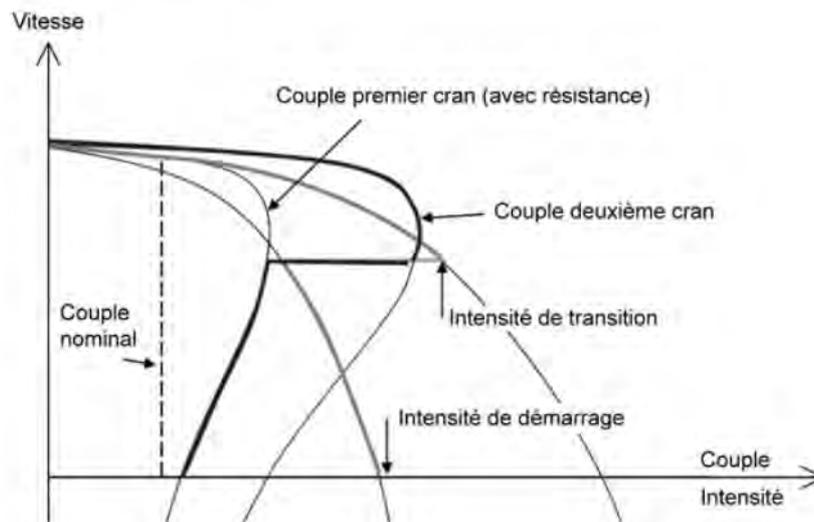


Figure 4.14 – Courbes caractéristiques de démarrage statorique.

4.3.2 Catégories d'emploi

La norme EN 60947-4-1 définit plusieurs catégories d'emploi applicables aux contacteurs. Celles-ci sont énoncées dans le **tableau 4.5**.

Tableau 4.5 – Catégories d'emploi des contacteurs selon EN 60947-4-1.

Nature du courant	Catégorie d'emploi	Applications caractéristiques
Courant alternatif	AC-1	Charges non inductives ou faiblement inductives, fours à résistances
	AC-2	Moteurs à bagues : démarrage, coupure
	AC-3	Moteurs à cage : démarrage, coupure des moteurs lancés
	AC-4	Moteurs à cage : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups
	AC-5a	Commande de lampes à décharge
	AC-5b	Commande de lampes à incandescence
	AC-6a	Commande de transformateurs
	AC-6b	Commande de batteries de condensateurs
	AC-7a	Charges faiblement inductives pour appareils domestiques et applications analogues
	AC-7b	Moteurs pour applications domestiques
	AC-8a	Commande de moteurs de compresseurs hermétiques de réfrigération avec réarmement manuel des déclencheurs de surcharge
	AC-8b	Commande de moteurs de compresseurs hermétiques de réfrigération avec réarmement automatique des déclencheurs de surcharge
Courant continu	DC-1	Charges non inductives ou faiblement inductives, fours à résistances
	DC-3	Moteurs shunt : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups, coupure dynamique de moteurs pour courant continu
	DC-5	Moteurs série : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups, coupure dynamique de moteurs pour courant continu
	DC-6	Commande de lampes à incandescence

Les catégories AC-1 à AC-4, et DC-1 à DC-5 ont été les premières catégories d'emploi définies par la CEI. Les autres ont été ajoutées par la suite afin de résoudre des problèmes spécifiques, ou d'optimiser certains contacteurs conçus pour un usage défini et d'intégrer certaines spécifications de différents pays afin d'élaborer une norme internationale applicable universellement.

Les catégories d'emploi de démarreurs moteurs ont existé avant celles pour les interrupteurs. C'est pourquoi certains interrupteurs sont définis pour une intensité assignée d'emploi en AC-1 au lieu de AC-21.

La catégorie AC-3 est de très loin la plus utilisée, c'est pourquoi les contacteurs sont définis dans les catalogues par leur intensité d'emploi ou leur puissance d'emploi correspondant à celle-ci.

La catégorie AC-6b est une catégorie correspondant à un emploi très sévère. En effet à la fermeture de condensateurs, le courant de charge est excessivement élevé. Si les condensateurs sont montés en batterie (plusieurs condensateurs sont enclenchés par crans successifs en parallèle), lors de la fermeture de dernier cran, le condensateur est chargé par la source du réseau mais en plus par les autres condensateurs déjà chargés. Le « rush » de courant est voisin d'un court-circuit qui se produit au moment où les pôles ferment. Or quand les pôles ferment, ils ont tendance à « rebondir » mécaniquement, ce qui limite énormément leur pouvoir de fermeture.

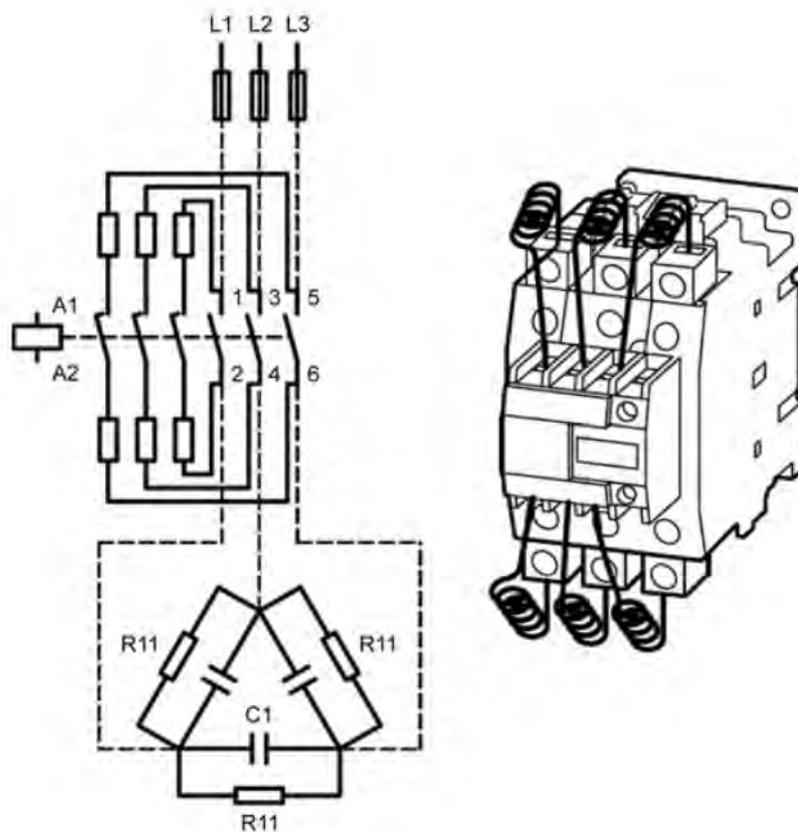


Figure 4.15 – Contacteur pour condensateur.

Les constructeurs utilisent alors un « stratagème » pour contourner le problème : les contacteurs sont dotés de pôles auxiliaires spéciaux, fermant légèrement avant les pôles principaux, et sont reliés par des connexions apportant une résistance chutrice, laissant passer un courant suffisant pour « précharger » le condensateur.

4.3.3 Caractéristiques des catégories d'emploi

Le **tableau 4.6** donne une synthèse des valeurs utiles des tableaux VII et B1 de la norme EN 60947-4-1. Il définit les valeurs de courants et de tensions caractérisant chacune des catégories d'emploi.

Tableau 4.6 – Selon EN 60947-4.1, tableau VII & B1.

Catégorie d'emploi	Valeur du courant assigné d'emploi	Pouvoir de fermeture à $1,05 \times U_e$	Établissement			Pouvoir de coupure à $1,05 \times U_e$	Coupure		
			I/I_e	U/U_e	$\cos \phi$		I_c/I_e	U_r/U_e	$\cos \phi$
AC-1	Toutes valeurs	1,5	1	1	0,95	1,5	1	1	0,95
AC-2	Toutes valeurs	4,0	2,5	1	0,65	4,0	2,5	1	0,65
AC-3	$I_r \leq 17 A$	10,0	6	1	0,65	8,0	1	0,17	0,65
AC-3	$I_r > 17 A$	10,0	6	1	0,35	8,0	1	0,17	0,35
AC-4	$I_r \leq 17 A$	12,0	6	1	0,65	10,0	6	1	0,65
AC-3	$I_r > 17 A$	12,0	6	1	0,35	10,0	6	1	0,35
Catégorie d'emploi	Courant assigné d'emploi	Pouvoir de fermeture	I/I_e	U/U_e	L/R (ms)	Pouvoir de coupure	I_c/I_e	U_r/U_e	L/R (ms)
DC-1	Toutes valeurs	1,5	1	1	1	1,5	1	1	1
DC-3	Toutes valeurs	4,0	2,5	1	2	4,0	2,5	1	2
DC-5	Toutes valeurs	4,0	2,5	1	7,5	4,0	2,5	1	7,5

I = courant établi

I_c = courant coupé

I_e = courant assigné d'emploi

U = tension appliquée

U_e = tension assignée d'emploi

U_r = tension de rétablissement à fréquence industrielle ou en courant continu

On peut y observer que :

En AC-1 (correspondant à un récepteur résistif), le courant est normalement coupé sous la pleine tension.

En AC-3, à la coupure d'un moteur lancé, le moteur offre une force contre électromotrice voisine de la tension du réseau, la différence correspond à la chute ohmique de tension. Le contacteur coupe le courant d'emploi, mais sous tension réduite et sous un facteur de puissance relativement peu sévère. De ce fait, la coupure en AC-3 est plutôt plus facile qu'en AC-1, car elle ne génère pas de puissance d'arc de coupure très élevé.

Le « déclassement » souvent constaté en AC-3, par rapport au courant d'emploi en AC-1 vient surtout de la nécessité d'assurer un pouvoir de fermeture et de coupure sous la pleine tension.

Il faut également réaliser que la fermeture de pôles sous un courant élevé use les pastilles de contacts, alors que les coupures de courant mettent à l'épreuve plutôt les chambres de coupure.

En AC-4, la fermeture se fait sur courant de démarrage, et la coupure se fait sous ce même courant, sous la pleine tension et sous un facteur de puissance très inductif. Les contraintes d'établissement et de coupure sont donc maximales. Ce sont les raisons pour lesquelles les catalogues de constructeurs indiquent un fort déclassement des contacteurs pour cette catégorie d'emploi.

Les valeurs indiquées, et selon des procédures de laboratoire plus complètes, servent aux constructeurs à établir des diagrammes de longévité des contacteurs (appelée « durabilité » dans les normes).

Le diagramme de la **figure 4.16** montre la variation du courant assigné d'emploi en fonction de la catégorie d'emploi et de la durabilité indiquée par ce constructeur (*bien sûr, ce diagramme n'a qu'une valeur explicative*).

Ce type de diagramme est utilisable pour dimensionner les contacteurs en fonction de leur catégorie d'emploi et de la longévité requise. Le principe consiste à évaluer le nombre d'opérations par unité de temps donnée, par exemple par jour, en fonction de la cadence de travail estimée pour une machine ou tout autre système équivalent.

Le nombre de manœuvres total est défini par la longévité globale de la machine spécifiée par le constructeur multipliée par la cadence.

EXEMPLE

Une machine est prévue pour être utilisée 16 heures par jour pendant 300 jours par an. La cadence du contacteur étudié est de 600 manœuvres par heures pour un service AC-3.

Le nombre de manœuvres annuel est de :

$$300 \times 16 \times 600 = 2\,340\,000 \text{ manœuvres.}$$

Sur le diagramme de la **figure 4.16**, le nombre de manœuvres de 2,3 millions indique l'intensité d'emploi utilisable pour une espérance de vie du contacteur de 1 an. Si la machine est prévue pour une longévité plus importante, soit un appareil de puissance d'emploi plus élevé est choisi, soit le constructeur propose une opération de maintenance prévoyant de changer le contacteur tous les ans. Les solutions utilisant les technologies d'électronique de puissance prennent ici tout leur intérêt.

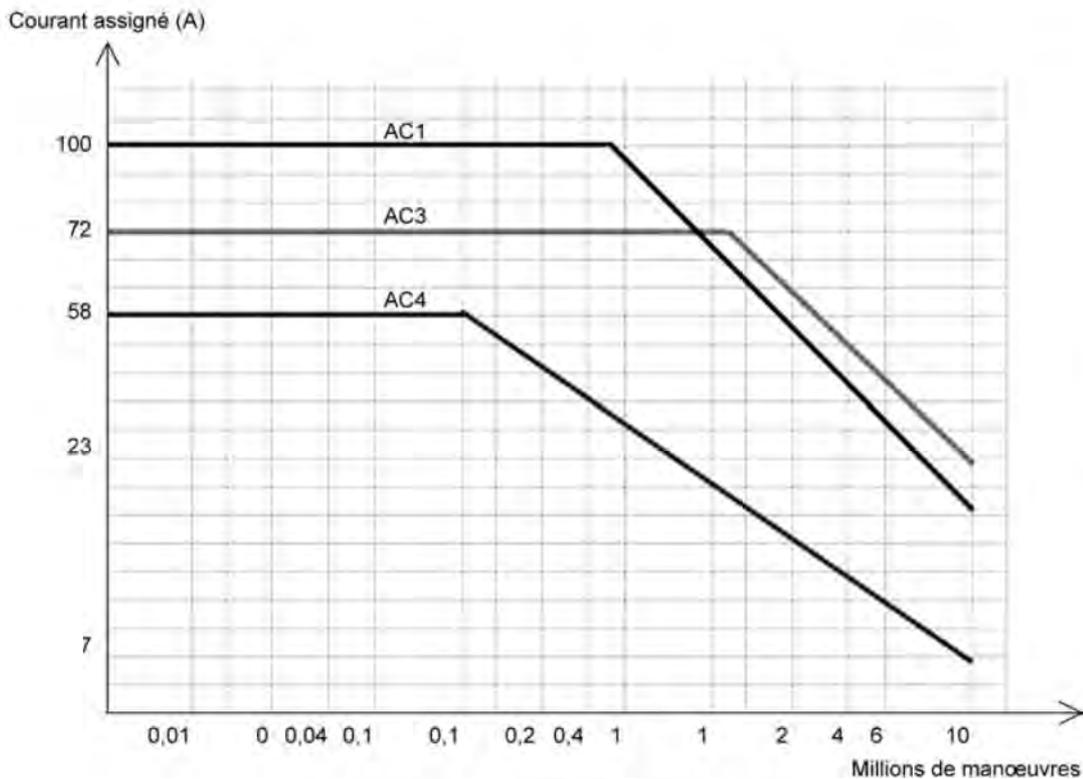


Figure 4.16 – Diagramme typique de durabilité.

4.3.4 Démarreurs électroniques

L'intention de cet ouvrage n'est pas de développer les différentes techniques de commande de moteur par les modules d'électronique de puissance.

Les démarreurs électroniques remplacent les solutions électromécaniques ayant pour but de varier la tension de démarrage des moteurs. Ils diminuent l'intensité de démarrage afin de réduire les chutes de tension et les consommations excessives d'énergie. Ils réduisent également le couple en vue d'atténuer le bruit et les à-coups sur les éléments mis en mouvement. Ils n'assurent aucune régulation, sinon celle de limiter l'intensité. La vitesse finale est toujours celle du moteur. Une fois que celui-ci a atteint sa vitesse, le démarreur n'a plus aucune fonction. Pour cette raison il est souvent shunté puis mis hors tension. Dans certaines applications, telles que de grandes stations de pompage, plusieurs moteurs de puissance identiques sont utilisés. Il est particulièrement avantageux de réaliser un démarrage en cascade. Le même démarreur électronique est utilisé pour démarrer successivement chaque moteur. À la fin de chaque démarrage, le moteur est commuté au réseau par un contacteur inverseur.

La **figure 4.17** illustre ce principe. Le contacteur (1) permet le démarrage progressif du premier moteur, puis le contacteur (2) connecte le moteur au réseau, puis (1) est ouvert, libérant le démarreur pour la mise sous tension progressive du moteur suivant.

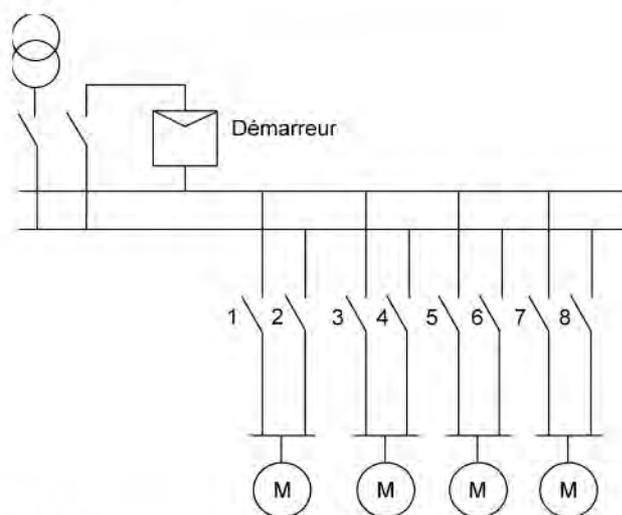


Figure 4.17 – Principe d'un démarrage en cascade de moteurs utilisant un même démarreur électronique.

4.4 Fonctions de commande de sécurité

La norme EN 60204-1 décrit les conditions selon lesquelles les équipements des machines doivent être conçus en vue d'assurer la sécurité de leur utilisation. Différents sujets y sont abordés dont pratiquement tous sont traités dans cet ouvrage en particulier en partie C. Il y a lieu cependant d'évoquer ici la notion de **commande de sécurité**. Celle-ci se résume à énoncer deux obligations :

- Un ordre de mise en marche d'un mouvement ne doit s'opérer que s'il est expressément demandé et que toutes les conditions sont réunies pour l'autoriser.
- Un ordre d'arrêt doit toujours conduire à l'effet recherché.

Pour expliquer la première règle, nous donnons quelques exemples :

- Un ordre de marche ne doit pouvoir être permis que si les conditions électriques et mécaniques l'autorisent. Aucune sécurité ne doit être active, aucun seuil limite ne doit être franchi, aucune action incompatible ne doit être active...
- Une défaillance de matériel telle que la soudure d'un contact ou la rupture d'un conducteur doit interdire la séquence suivante ou la répétition du cycle.
- Le réarmement d'une protection telle qu'un relais thermique ou disjoncteur ne doit pas provoquer la mise en marche d'un mouvement. Une action spécifique d'ordre de marche ou de réinitialisation est nécessaire.
- La détection de la bonne position d'un protecteur, tel que capot protégeant contre l'accès de pièces en mouvement extrêmement dangereux, doit être absolument sûre, sans possibilité de « fraude » de la part de l'opérateur dans le but de gagner du temps ou de s'affranchir d'une contrainte.

L'analyse des risques de défaillance fait l'objet d'une imposition sévère prescrite par la directive européenne 89/392/CEE. Son principe est exposé dans la norme EN 292-1 & 2. Le document énonce les objectifs généraux à atteindre, mais laisse

aux concepteurs l'entière responsabilité de l'analyse des risques et des solutions apportées. La volonté est que la sécurité soit intégrée dès la conception de la machine et non pas tributaire d'instructions de précautions, ni de mise en place d'accessoires ou d'équipements complémentaires de protection.

La norme EN 954-1 aide les concepteurs à analyser les degrés d'appréciation des risques.

POUR SIMPLIFIER

L'importance d'un risque dépend :

- de la gravité de ses conséquences,
- de la fréquence d'exposition,
- et des possibilités d'évitement.

De cette méthode, la norme propose 5 degrés de risques d'où découlent 5 degrés de solutions nommés B, 1, 2, 3, 4.

Les solutions s'appliquent aux appareillages, aux dispositifs mécaniques et aussi à des schémas de sous-ensembles dûment vérifiés. Le principe de redondance à plusieurs niveaux est appliqué à l'extrême. Il faut noter qu'un schéma à redondance de circuits qui aboutirait à un seul contacteur ou une seule électrovanne constituerait un non-sens.

La **figure 4.18** illustre un exemple de schéma de contrôle d'ordre de marche et d'arrêt avec commande d'arrêt d'urgence procurant une sécurité de niveau maximal : 4. Ce schéma tient compte de toutes les avaries imaginables : rupture de fil, collage de contact, shuntage de contact, bobine grillée...

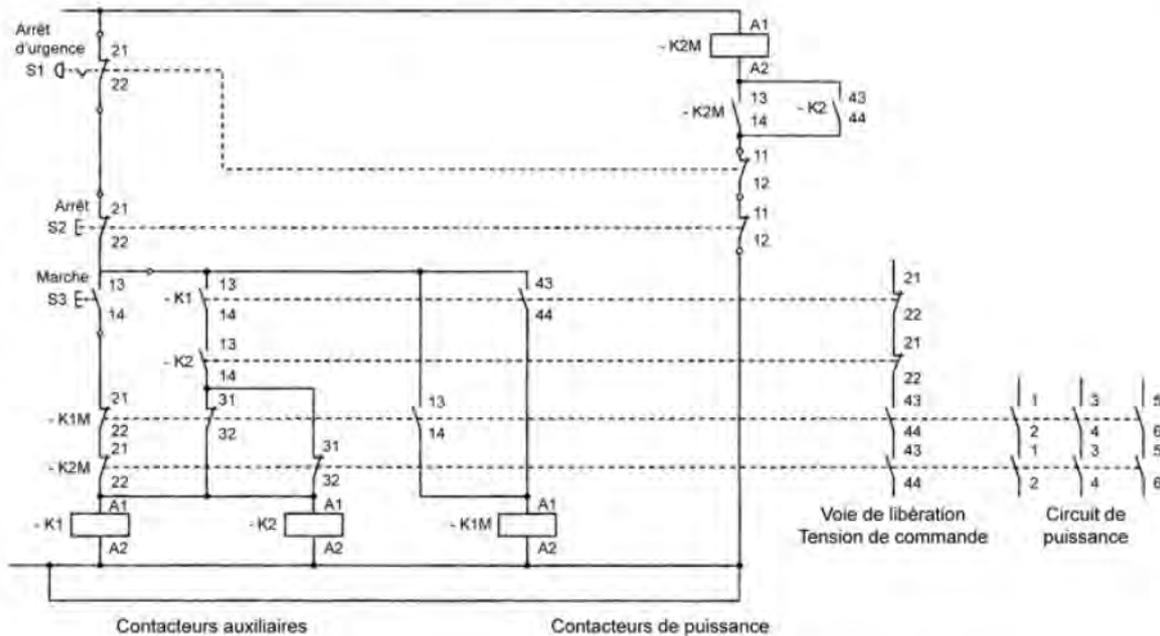


Figure 4.18 – Schéma de contrôle d'arrêt d'urgence à redondance jusqu'à la partie puissance (d'après Moeller Electric).

4.5 Différents types d'arrêt

En commande de machine, un arrêt dans des conditions de sécurité ne signifie pas toujours la mise hors tension d'un moteur ou d'un ensemble. Souvent un arrêt demande une réduction de vitesse jusqu'à la vitesse nulle, quelque fois un freinage dynamique est nécessaire.

La norme EN 60204 définit trois catégories d'arrêt :

- *Catégorie 0 : arrêt par suppression immédiate de la puissance sur les actionneurs.*
- *Catégorie 1 : arrêt contrôlé en maintenant la puissance sur les actionneurs pour obtenir l'arrêt de la machine, puis coupure de la puissance sur les actionneurs.* Il s'agit par exemple de donner à un variateur de vitesse la consigne « vitesse 0 », ou à un démarreur électromécanique de passer en petite vitesse ou de provoquer un freinage dynamique. Après contrôle de l'arrêt, la machine ou le sous-ensemble, est mis hors tension par l'ouverture d'un contacteur électromécanique.
- *Catégorie 2 : arrêt contrôlé en maintenant la puissance sur les actionneurs.* Un démarreur ou variateur électronique fait partie de cette catégorie.

Seuls les arrêts de catégorie 0 ou 1 peuvent être utilisés en arrêt d'urgence.

4.6 Auxiliaires de commande

Les auxiliaires de commande transforment une action mécanique en une variation de sortie électrique. L'action mécanique peut être :

- une action manuelle, c'est le cas de toute la catégorie des boutons poussoirs, sélecteurs, commutateurs, manipulateurs, etc. ;
- une action par une pièce ou organe en mouvement, c'est le cas de la catégorie des contacts de proximité, appelés aussi fins de course ;
- une mesure d'un paramètre physique tel qu'un niveau, une pression, une température, un champ magnétique, une composition chimique, un degré d'acidité, etc.

La sortie électrique peut être :

- le basculement de contacts « secs » capables d'établir ou d'interrompre une ligne de circuit de commande ;
- le basculement de l'état d'un semi-conducteur ;
- un signal type front montant, descendant ou impulsionnel.

Le changement d'état de la sortie s'opère selon une loi décrite par le constructeur. Le propos de cet ouvrage n'est pas de décrire l'ensemble des auxiliaires de commande proposés sur le marché, mais d'expliquer certaines caractéristiques importantes nécessaires à leur choix et à leur mise en œuvre.

4.6.1 Contacts auxiliaires

Les éléments de contact ont pour rôle d'établir la fermeture ou l'ouverture d'un seul chemin conducteur d'un circuit (EN 60947-5-1 § 2.3.3). L'organe commandé peut être un électroaimant tel qu'une bobine de contacteur, un élément résistif tel qu'un voyant lumineux, ou encore une entrée d'un ensemble électronique. De tels récepteurs ont des caractéristiques complètement différentes qu'il faudra décrire afin de définir avec exactitude les performances des contacts. C'est dans ce but que des catégories d'emploi ont été définies par la norme EN 60947-5-1.

4.6.2 Catégories d'emploi des contacts auxiliaires

La norme EN 60947-5-1 définit des catégories d'emploi qui décrivent les différentes conditions d'utilisation des contacts auxiliaires. Il est aisé d'imaginer que la commande de bobine d'un contacteur ou celle d'un voyant lumineux constitue des services différents.

Le **tableau 4.7** présente les catégories identifiées par la norme.

Tableau 4.7 – Catégories d'emploi des contacts auxiliaires selon EN 60947-5.1.

Nature du courant	Catégorie d'emploi	Applications caractéristiques
Courant alternatif	AC-12	Commande de charges ohmiques et de charges statiques isolées par photocoupleur
	AC-13	Commande de charges statiques isolées par transformateur
	AC-14	Commande de faibles charges électromagnétiques d'électro-aimants (≤ 72 VA)
	AC-15	Commande de charges électromagnétiques d'électro-aimants (> 72 VA)
Courant continu	DC-12	Commande de charges ohmiques et de charges statiques isolées par photocoupleur
	DC-13	Commande d'électroaimants
	DC-14	Commande d'électroaimants ayant des résistances d'économie

Le **tableau 4.8** donne une synthèse des valeurs utiles des tableaux IV et V de la norme EN 60947-5-1. Il définit les valeurs de courants et de tensions caractérisant chacune des catégories d'emploi.

Tableau 4.8 – Extrait de la norme EN 60947-5.1, tableaux IV & V.

Catégorie d'emploi	Pouvoir de fermeture à $1,1 \times U_e$	Établissement			Pouvoir de coupure à $1,05 \times U_e$	coupure		
		I/I_e	U/U_e	$\cos \phi$		I/I_e	U/U_e	$\cos \phi$
AC-12	1	1	1	0,9	1	1	1	0,9
AC-13	10	2	1	0,65	1,1	1	1	0,65
AC-14	6	6	1	0,3	6	1	1	0,3
AC-15	10	10	1	0,3	10	1	1	0,3

Tableau 4.8 – Extrait de la norme EN 60947-5.1, tableaux IV & V. (Suite)

Catégorie d'emploi	Pouvoir de fermeture	I/I_e	U/U_e	L/R (ms)	Pouvoir de coupure	I_c/I_e	U_r/U_e	L/R (ms)
DC-12	1	1	1	1	1	1	1	1
DC-13	1,1	1	1	2 $6 \times P^1$	1,1	1	1	2 $6 \times P^1$
DC-14	10	10	1	15 ms	10	1	1	15 ms

(1) P est la puissance de l'électroaimant en VA. Pour $P = 50$ VA la formule empirique donne 300 ms.

Il révèle en particulier des conditions sévères de fermeture et de coupure pour les catégories AC15 et DC15 correspondant à la commande de bobines de contacteurs. Ces catégories s'appliquent à tous contacts auxiliaires, de boutons poussoirs comme de contacteurs de puissance ou de disjoncteurs.

4.6.3 Caractéristiques spécifiques

■ Manœuvre positive d'ouverture et fonction de sectionnement

Certains auxiliaires de commande doivent prendre en charge des fonctions de sécurité. Ces fonctions sont généralement basées sur l'ouverture certaine du contact utilisé lorsque l'action de commande de sécurité est engagée. Une manœuvre positive d'ouverture n'est prise en compte que pour un effort mécanique externe non élastique (sans l'intermédiaire de ressort) s'exerçant directement sur le contact à ouverture. Un contact « à rupture brusque » fonctionnant selon le principe du basculement d'un ressort n'est donc pas utilisable.

Un auxiliaire est déclaré à manœuvre positive d'ouverture si la pleine ouverture de l'élément de contact à ouverture est assurée pour une force et pour une course minimale, déclarées par le constructeur (EN 60947-5-1 § 2.1). En cas de soudure des contacts, la force ne peut pas être appliquée, à moins de provoquer une ouverture « malgré tout », c'est-à-dire après cassure de l'élément contact. En cas normal, le contact doit, en position correspondant à la course d'ouverture positive, la distance de séparation doit supporter une tenue aux chocs U_{imp} de 2 500 V.

MARQUAGE

Les contacts « O » à ouverture positive doivent être identifiés par leurs bornes ainsi que par le symbole .

■ Aptitude au sectionnement

Un auxiliaire apte au sectionnement doit avoir une manœuvre positive d'ouverture, avoir une position stable en situation « ouvert » et assurer une tenue aux chocs U_{imp} correspondant à la tension assignée d'emploi. Cette caractéristique est indispensable pour un interrupteur général devant couper un circuit de commande en même temps que les pôles.

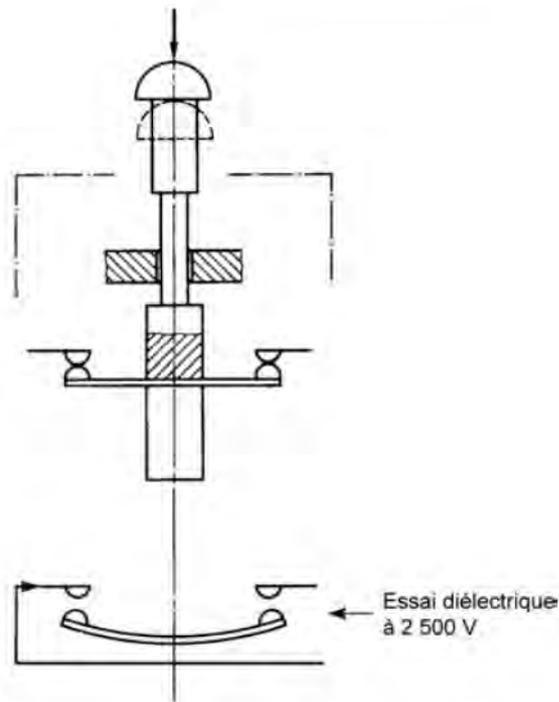


Figure 4.19 – Contact à manœuvre positive d'ouverture (norme CEI 947-5-1). Pendant l'application de la force de manœuvre, le contact doit s'ouvrir. Un essai diélectrique à 2500 V doit être mené.

IEC 60947-5-1

Coordination de l'isolement (et qualité diélectrique)

- La norme IEC 60664 définit 4 catégories de surtensions transitoires présumées. Il est important pour l'utilisateur de choisir l'auxiliaire de commande supportant ces surtensions. A cet effet, le constructeur annonce la tension assignée de tenue aux chocs (U_{imp}) supportée par le produit.

Bornes de raccordement

- La capacité de raccordement, la robustesse mécanique, ainsi que le non desserrage et la non détérioration des bornes sont vérifiés par des essais conventionnels.
- Le marquage des bornes est conforme à la norme EN 50013.

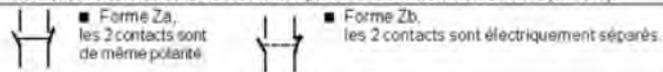
Pouvoir de commutation

- Avec charges électriques maximales. Une désignation simple (A300 par exemple), permet d'indiquer les caractéristiques de l'élément de contact selon sa catégorie d'emploi.

Manœuvre positive d'ouverture (IEC 60947-5-1 annexe I)

- Pour les contacts utilisés dans les applications de sécurité, fin de course, dispositif d'arrêt d'urgence, etc. L'assurance d'ouverture est exigée (voir IEC 60204, EN 60204) après chaque essai, l'ouverture du contact est vérifiée par un essai à la tension de choc (2500 V).

Représentation électrique des contacts



Représentation de la positivité

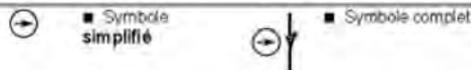


Figure 4.20 – Extraits de catalogue Interrupteurs de position à contact à ouverture positive (d'après Télémécanique).

■ Protection conditionnelle aux courts-circuits

Il est important qu'un contact auxiliaire ayant un rôle essentiel à la sécurité soit protégé, avec le maximum de confiance, contre le risque de soudure. Les pastilles de contact étant pratiquement toujours en argent, ce risque est réel (*voir aussi partie A*). La protection des contacts auxiliaire contre les courts-circuits vise principalement à éviter leur soudure. Cette protection est conditionnée à l'utilisation d'un fusible ou disjoncteur dont les types et calibres sont spécifiés par le fabricant.

Il est utile de noter que contrairement aux interrupteurs, l'essai est pratiqué en fermant le court-circuit par le contact lui-même. Certains constructeurs indiquent une protection conditionnelle aux courts-circuits en position fermée celle-ci est utile pour les contacts de relais de protection tels que ceux des relais thermiques.

■ Contacts liés positivement

Cette notion est décrite dans un document allemand ZH1/457 elle est reprise par l'amendement n° 2, annexe L de la norme CEI 60947-5-1. Elle s'applique principalement aux contacteurs auxiliaires, mais aussi aux arrêts d'urgence. Elle consiste à garantir le fait que les contacts « F » et les contacts « O » ne peuvent jamais être fermés en même temps, même pour un court instant ; même si l'un des contacts est soudé. Cette propriété est indispensable pour autoriser des actions à condition que tous les verrouillages soient effectivement libérés. La norme des contacteurs, NF EN 60947-4-1 annexe F introduit la notion de contacts « miroirs ». Ce sont des contacts « O » qui donnent une parfaite image inversée de la situation des pôles.

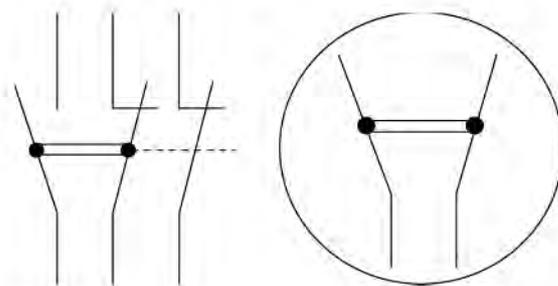


Figure 4.21 – Contacts liés positivement (d'après Moeller Electric).

À gauche : principe de représentation. Les deux premiers contacts de gauche sont liés, le troisième n'a pas cette propriété.

À droite : exemple de représentation sur un appareil de la propriété de contacts liés positivement.

■ Aptitude à la fermeture des courants faibles

Les contacts auxiliaires doivent parfois maîtriser de forts courants : courant thermique élevé, pointe d'enclenchement élevé, courts-circuits... Il serait illusoire de croire que de tels contacts soient largement capables d'assurer le passage de très faibles courants sous de faibles tensions. En effet les pastilles de contacts peuvent être légèrement polluées par un film ou de fines poussières, isolants. En cas de commutation sous tension supérieure à 24 V ce film est immédiatement « claqué » par un court arc électrique. Ce « nettoyage » ne se produit pas en très basse tension et pour la fermeture de très faibles courants. Des dispositions constructives permettent d'améliorer cette aptitude avec une fiabilité acceptable. Cette aptitude est d'ailleurs exprimée en fréquence probable de défauts pour un nombre de manœuvres donné.

Caractéristiques techniques Petits contacteur, ensembles démarreurs

http://catalog.moeller.net

Moeller HPL0211-2007/2008

DILEM

			DILEM4	DILEM4-G	
Contacts auxiliaires					
Contacts liés positivement selon ZH 1/457, y compris modules de contacts auxiliaires			oui	oui	
Tension assignée de tenue aux chocs	U_{imp}	V AC	6000	6000	
Catégorie de surtension/Degré de pollution			III/3	III/3	
Tension assignée d'isolement	U_i	V AC	690	690	
Tension assignée d'emploi	U_e	V AC	600	600	
Conformité avec les règles de séparation selon VDE 0106-101 et 101/A1					
entre la bobine et les contacts auxiliaires		V AC	300	300	
et entre les contacts auxiliaires eux-mêmes		V AC	300	300	
Courant assigné d'emploi					
AC-15	220/240 V	I_n	A	6	
	380/415 V	I_n	A	3	
		I_n	A	1.5	1.5
DC-13	1	24 V	A	2.5	
DC-13 L/R \leq 15 ms	2	60 V	A	2.5	
Pôles en série :	3	100 V	A	1.5	
	3	220 V	A	0.5	0.5
Courant thermique conventionnel		I_{th}	A	10	10
Fiabilité des contacts (sous $U_e = 24$ V DC, $U_{min} = 17$ V, $I_{min} = 5.4$ mA)		λ	Taux de défaillances	< 10%, < 1 défaut sur 100 millions de manœuvres	
Longévité de l'appareil sous $U_e = 240$ V					
AC-15		manœuvres	$\times 10^6$	0.2	0.2
DC13 ¹⁾	L/R = 50 ms : 2 contacts en série sous $I_n = 0.5$ A.	manœuvres	$\times 10^6$	0.15	0.15
Tenue aux courts-circuits sans soudure					
Par disjoncteur (calibre max.)				PKZM0-4	PKZM0-4
Par fusible (calibre max.)	500 V		A gG/gL	6	6
	500 V		A rapide	10	10
Pertes par effet Joule sous I_n					
Par circuit			W	0.2	0.2

Remarques

¹⁾ Conditions d'enclenchement et de coupure en DC-13, L/R constant selon indications

Figure 4.22 – Fiabilité des contacts sous tensions faibles.
Exemple de catalogue (Moeller Electric).

4.6.4 Arrêts d'urgence

Les contacts d'arrêts d'urgence doivent être à manœuvre positive d'ouverture. Le contact ne doit pas être à action brusque (à ressort). Mais la commande doit être à basculement brusque et maintenu. C'est-à-dire qu'une ouverture impulsionnelle du contact ne peut pas être possible. Si la commande est initiée elle doit s'effectuer totalement et un dispositif d'accrochage doit conserver l'état actionné jusqu'à ce qu'une manœuvre volontaire de réarmement soit opérée. Dans certains cas, le réarmement peut n'être permis qu'à l'aide d'une clé. Il est également envisagé l'utilisation de plombage ou de bris de vitre.

Lorsqu'un contact à fermeture signale à distance l'action d'un arrêt d'urgence, ce contact ne doit s'établir que lorsque le contact à ouverture est effectivement ouvert.



Figure 4.23 – Arrêt d'urgence (Moeller Electric).

5 • FONCTIONS D'INFORMATION

B

FONCTIONS DE BASE DES APPAREILLAGES ÉLECTRIQUES

Nous grouperons dans ce chapitre les règles définies internationalement consistant à proposer une compréhension claire des ordres de manœuvre et de leurs effets, ainsi que de la conduite des processus. Une confusion entre un ordre de marche et d'arrêt parce qu'une couleur ou un sens de manœuvre n'est pas conforme, peut avoir des conséquences fâcheuses, voire dramatiques. De même un voyant lumineux indiquant un état normal au lieu d'une situation dangereuse, peut autoriser un enchaînement de réactions totalement inappropriées de la part des opérateurs, avec pour conséquence un processus destructeur ou dangereux.

Pour ces raisons nous rappelons ici les règles définissant les sens de manœuvres des organes de commande, les couleurs des boutons poussoirs et des voyants lumineux.

5.1 Sens de manœuvre des organes de commande

La norme CEI EN 60447 « établit les principes généraux de manœuvre des organes de commande manœuvrés à la main, faisant partie de l'interface homme-machine, associés à des équipements électriques. Son but est :

- d'améliorer la sécurité (par exemple des personnes, des biens, de l'environnement) par la sûreté d'exploitation des équipements ;
- de concourir à une utilisation rationnelle et opportune des organes de commande.

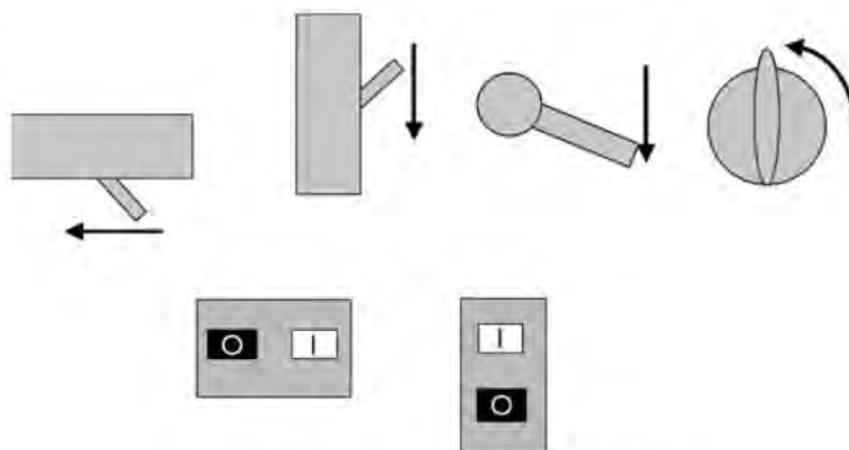


Figure 5.1 – Exemples de sens de manœuvre
(la flèche indique le sens de manœuvre amenant à l'ouverture).

Ces principes s'appliquent pour l'exploitation des équipements électriques, des machines ou des usines, non seulement dans les conditions normales, mais aussi dans les conditions de défaut ou d'urgence. »

5.2 Couleur des boutons poussoirs

Ces couleurs sont définies dans la norme EN 60204-1 « Sécurité des machines ». Il faut savoir que cette norme est citée par le code du travail en tant qu'instructions minimales à la conception des machines, en application de la directive européenne 89/392/CEE. Ces couleurs sont donc obligatoires.

Tableau 5.1 – Codes de couleur pour les organes de commande à bouton poussoir et leur signification (extrait du tableau 2 de la norme EN 60204-1).

Couleur	Signification de base	Exemple
Rouge	Urgence	Arrêt d'urgence
Jaune	Situation anormale	Marche dégradée Cycle de réglage
Vert	Situation sûre	Initialisation Mise sous tension
Bleu	Obligation	Réarmement
Blanc	Spécifique	Marche
Noir	Spécifique	Arrêt

Il faut noter de ce tableau que la couleur rouge est exclusivement réservée aux arrêts d'urgence. L'ordre d'arrêt est de préférence de couleur noire.

La couleur verte est quant à elle réservée aux situations sûres et simples. L'action sur un bouton vert ne doit pas nécessiter de vérification préliminaire. En général il ne provoque pas le démarrage d'un mouvement ou le changement de vitesse ou de direction d'un mouvement. La couleur verte est principalement destinée aux fonctions d'initialisation et de mise sous tension.

La couleur bleue est réservée aux fonctions de réarmement, de marche exceptionnelle, de commandes impulsives de réglage, etc.

La norme admet toutefois que les couleurs blanches, grises ou noires peuvent être utilisées à des fonctions de marche ou d'arrêt, à condition que d'autres moyens d'identification (texte, synoptiques...) leur soient donnés.

5.3 Couleur des voyants lumineux

Il est encore très fréquent d'observer que les voyants « marche » sont souvent de couleur verte voire même rouge. On imagine bien qu'un voyant vert affecté à une

fonction « marche » pourrait être interprété comme une situation d'arrêt par un opérateur, avec les conséquences qu'on peut imaginer.

Tableau 5.2 – Couleurs des voyants lumineux de signalisation et leur signification (extrait du tableau 3 de la norme EN 60204-1).

Couleur	Signification de base	Exemple
Rouge	Urgence, danger	Arrêt sur défaut Demande d'arrêt immédiat.
Jaune	Situation anormale	Température excessive Dépassement demandant correction.
Vert	Situation sûre Prêt à démarrer	Sous tension Arrêt
Bleu	Obligation	Demande d'action pour retour à une situation normale
Blanc	Neutre	Marche, en service Information générale

5.4 Panneaux de commandes électroniques

Le principe de gestion des ordres de commandes par claviers, touches de fonction, écrans tactiles, etc. est de décomposer un ordre en 4 phases :

- identification de l'opération ;
- demande de modification du mode de fonctionnement (par exemple demande de mise en marche) ;
- affichage de l'ordre demandé et demande de confirmation ;
- confirmation de l'ordre.

Ces phases peuvent être apparemment réduites en utilisant une variation de couleurs ou de clignotement du texte ou de l'icône utilisé.

5.5 Mesures

Nous incluons dans ce chapitre dédié aux fonctions d'informations, les dispositifs de mesures incorporés de façon permanente dans les tableaux électriques. Ils ont pour rôle, effectivement, de renseigner l'exploitant sur des paramètres physiques nécessaires à la gestion des installations ou des processus, ou encore à l'optimisation de l'énergie ou de sa qualité.

Les données peuvent être instantanées. C'est le cas en général pour la mesure des tensions. Elles peuvent être « intégrées » pour un temps donné, c'est-à-dire que l'appareil prend en compte une valeur moyenne sur un temps donné, cela par calcul ou disposition physique.

C'est le moment d'expliquer ici quelques points méconnus, souvent causes d'erreurs ou de mauvaises interprétations.

5.5.1 Classes de précision

Pour un appareil de mesure à aiguille, la classe de précision est l'erreur maximale possible exprimée en % de la déviation « nominale ». Pour un ampèremètre 50 A, sa graduation pouvant afficher de 10 à 50 A, mais avec une indication sans précision assurée jusqu'à 100 A, la valeur nominale est 50 A.

Une classe de précision 3 signifie que l'erreur d'affichage serait de 3 % de la valeur nominale, dans notre exemple : 50 A. Soit de 1,5 A. Il est important de noter que cette imprécision de 1,5 A est valable pour toute l'échelle. Si l'ampèremètre indique 20 A, il faut interpréter $20 \text{ A} \pm 1,5 \text{ A}$.

REMARQUE

On utilise de préférence le terme *imprécision* plutôt qu'*erreur* qui évoquerait un dysfonctionnement.

5.5.2 Transformateurs d'intensité

Un transformateur d'intensité (TI) est un transformateur de courant (TC) prévu pour une utilisation de mesure. Un transformateur de courant est conçu pour fonctionner avec l'enroulement secondaire en court-circuit ou du moins sous très faible impédance. Dans cette configuration, le courant secondaire est proportionnel au courant primaire. Cette affirmation n'est toutefois vraie que si le flux est suffisant mais sans être trop élevé, car la saturation du circuit magnétique dévie la proportionnalité entre primaire et secondaire.

La classe de précision d'un TI est définie par le **tableau 5.3**.

Tableau 5.3 – Imprécision des transformateurs d'intensité en fonction de leur charge.

Classe de précision	Erreur (\pm en % de I_n)						
	Niveau de charge						
	$0,1 \times I_n$	$0,2 \times I_n$	$0,5 \times I_n$	$1 \times I_n$	$1,2 \times I_n$	$5 \times I_n$	$10 \times I_n$
0,5	1,0	0,75		0,5			
1	2,0	1,5		1,0			
3			3	3	3		
5			5	5	5		
5P5				5		5	
5P10				5			5

Nous noterons que les classes 3 et 5 sont destinées à des utilisations courantes de mesure d'intensité. Toutefois elles ne garantissent aucune de précision d'angle de phases. Des TI de ces classes ne sont pas adaptés aux mesures combinées U et I telles que les mesures de puissances, de comptage de consommation ou de facteur de puissance. Pour ce type d'utilisation les classes 1 et 0,5 sont nécessaires. Les classes 5P5 et 5P10 sont appelées « classes de protection » car les transformateurs de courant de cette classe sont destinés non pas à la mesure mais à l'utilisation de relais de protection. Ainsi un TC de primaire 400 A et secondaire 5 A de classe 5P10 assure une précision de 5 % Jusqu'à une surcharge de $10 \times I_n$ soit 4 000 A vu du primaire.

5.5.3 Puissance de précision

Nous avons évoqué qu'un transformateur de courant perd sa précision au-delà d'une certaine charge. Cette charge est définie par le courant primaire mais aussi par l'impédance raccordée au secondaire. Contrairement aux transformateurs de tension, une charge élevée au secondaire d'un TC correspond à une impédance élevée raccordée. N'oublions pas que si plusieurs appareils doivent être raccordés au secondaire d'un TC, ceux-ci doivent être branchés en série. Leurs impédances s'ajoutent donc.

On appelle puissance de précision, la charge pour laquelle un TI assure sa classe de précision. Au-delà, la saturation du circuit magnétique se faisant sentir, la linéarité du rapport de transformation n'est plus assurée avec la même précision.

Ainsi un même transformateur d'intensité peut assurer une classe de précision 1 jusqu'à 5 VA et une classe 3 jusqu'à 15 VA. Les fabricants notent alors dans leurs catalogues : 5 VA/cl1 ; 15 VA/cl3.

5.5.4 Transformateurs de courant à saturation

Le défaut de saturation constaté sur les TI de mesure est mis à profit pour les TC destinés à alimenter des relais thermiques de protection moteurs. Nous expliquons dans le chapitre suivant, au § 6.1.1, que les bilames d'un relais thermique risquent de brûler pour intensité supérieure au point de protection.

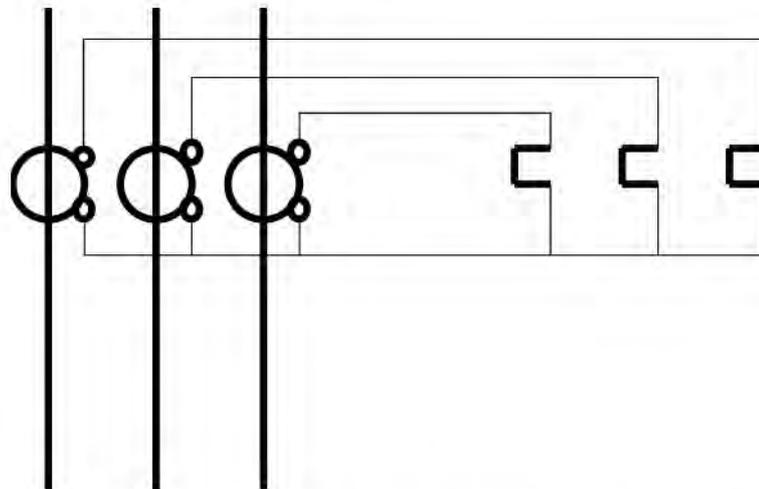


Figure 5.2 – Câblage d'un relais thermique sur TC saturable.

Si un relais thermique est alimenté par un TC dont la saturation ne permet pas de délivrer une intensité secondaire supérieure à cette limite, l'ensemble TC + relais peut être utilisé sans limite de courant.

Le couple TC + relais doit être défini et garanti par le fabricant. L'effet secondaire d'une telle association est d'augmenter le temps de fonctionnement du relais thermique dans la zone de courant de démarrage des moteurs (**figure 5.3**). Ce principe est très utile pour assurer la protection et le démarrage des moteurs entraînant une charge à forte inertie, tels les grands ventilateurs. Le relais est par exemple porté d'une classe de déclenchement 10 à une classe 30 (*voir chapitre 3, § 3.4.4*).

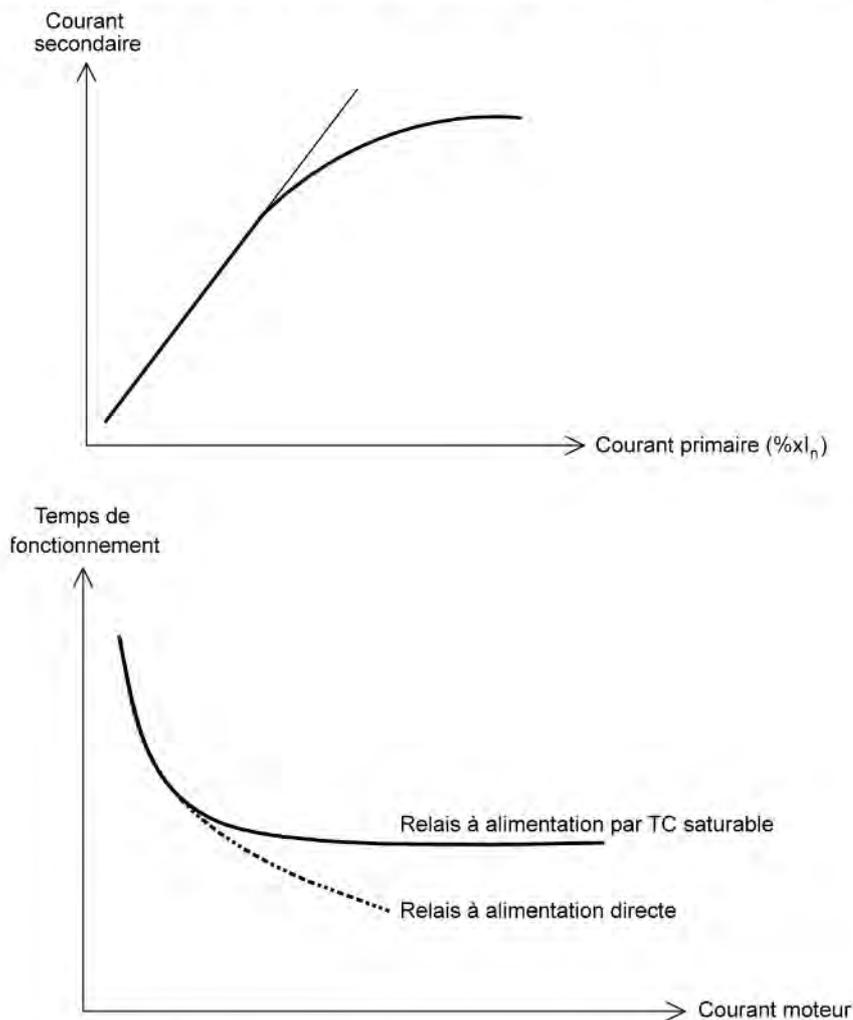


Figure 5.3 – Effet de la saturation d'un transformateur de courant.

CUMUL DES IMPRÉCISIONS

Prenons le cas d'un circuit de mesure 50 A où un ampèremètre (0-50 A) de classe 5 est raccordé à un TI (rapport 50/5) de classe 3. Quelle est l'imprécision pour une mesure 25 A ?

Pour une charge de 50 %, le TI a une imprécision de 3 % (**tableau 5.3**) soit de $25 \times 3/100 = 0,75$ A. L'ampèremètre a de son côté une imprécision de $50 \times 5/100 = 2,5$ A. L'imprécision totale est alors de $0,75 + 2,5 = 3,25$ A soit de 13 %.

Il existe des situations où on est obligé d'utiliser des dispositifs sommateurs d'intensité. Ce sont des TI ayant plusieurs primaires, câblés au secondaire d'autres TI. Dans ce cas les imprécisions des TI s'ajoutent.

5.5.5 Transformateurs de mesure de tension

Appelés quelquefois transformateurs de potentiels (TP), ces transformateurs sont surtout utilisés en haute tension, mais ils existent également en basse tension afin d'utiliser certains relais ou boîtiers de mesure spécifiques. À l'opposé des transformateurs d'intensité, les TP sont prévus pour fonctionner avec une charge la plus réduite possible afin de minimiser l'influence des pertes fer et des pertes Joule. Le principe de puissance de précision s'applique au plus haut point. Un TP d'une puissance de précision de 40 VA classe 1 a un poids de cuivre et de fer comparable à ceux d'un transformateur de contrôle de 400 VA.

5.5.6 Mesures combinées tension-courant

Dans le cadre de cet ouvrage, nous ne détaillerons pas tous les cas de figures des mesures électriques. Il est malgré tout nécessaire d'insister sur le respect du sens de raccordement des transformateurs de mesure. Inverser le sens de l'un ou de l'autre revient à donner une information de déphasage de π . Or on sait que la puissance est le résultat de l'équation :

$$P = U \times I \times \cos\Phi$$

On sait aussi que :

$$\cos(\Phi + \pi) = -\cos\Phi$$

Le résultat serait donc de transformer une puissance consommée en puissance génératrice. Dans un circuit triphasé, l'inversion d'un seul des transformateurs donnerait un résultat inexploitable voire troublant pour l'exploitant, qui serait amené à envisager un dysfonctionnement de l'appareil de mesure.

5.6 Contrôleurs permanents d'isolement

Nous savons (*voir partie C*) que, dans le cas du schéma IT, un premier défaut d'isolement ne crée pas de situation immédiatement dangereuse. À condition que les masses soient correctement interconnectées à un conducteur de protection mis à la terre, un premier défaut n'engendre pas de tension de contact. Le fait que la boucle de défaut soit ouverte ou fortement impédante, le courant de défaut reste faible. Toutefois nous avons vu précédemment que dans cette situation, les appareils utilisateurs de l'énergie peuvent être soumis à une surtension permanente risquant de compromettre leur longévité. En cas de coup de foudre, l'installation ne peut pas être protégée efficacement. De plus, il n'est pas sûr qu'un deuxième défaut engendre un niveau de court-circuit suffisamment élevé pour provoquer le fonctionnement des dispositifs de protection. La boucle de défaut serait peu contrôlable et génératrice de situations perturbantes voire dangereuses.

Pour cette raison la réglementation (décret du 14-11-88) impose l'installation d'un contrôleur permanent d'isolement (CPI). Celui-ci doit être conforme à la norme EN 61557-8.

Les CPI de première génération n'avaient pour finalité que d'indiquer par une signalisation optique et sonore la présence d'un premier défaut. La recherche de l'origine de celui-ci était « facilitée » par des dispositifs de recherche de défauts,

d'installation coûteuse et de câblage peu fiables. De sorte que le schéma IT fut progressivement abandonné au profit du schéma TN.

Les CPI et dispositifs de recherche de défaut ont considérablement évolué ces dernières années. Leur coût et leur encombrement permettent l'installation de détecteur de défaut sur une majorité de circuits. Ceux-ci sont maintenant reliés en réseau de communication à un poste de surveillance. Ce type d'installation permet de surveiller en permanence un réseau d'exploitation, d'identifier et d'enregistrer les événements afin d'intervenir rapidement et efficacement sur les circuits défaillants.

5.6.1 Domaines d'application

Les contrôleurs permanents d'isolement (CPI) sont principalement utilisés dans trois domaines :

- réseaux de puissance en schéma IT dans des exploitations industrielles ;
- salles d'opérations en milieu hospitalier ;
- contrôle des circuits de commande.

Dans ces trois domaines les objectifs justifiant l'installation de CPI sont assez différents. Ils ont toutefois deux points communs : le réseau contrôlé est isolé de la terre ; un défaut d'isolement permet de continuer le travail commencé, et provoque une signalisation avertissant de la nécessité d'engager une intervention de réparation.

Dans le cas d'une utilisation dans une salle d'opération, l'objectif est d'éviter des courants de circulation risquant d'électrocuter le patient et ensuite de perturber les appareils électro-médicaux. Un deuxième défaut serait plus que gênant. Il est certain qu'il est indispensable pour un chirurgien de continuer son opération commencée, mais aussi de l'avertir qu'une anomalie a fragilisé la fiabilité de son réseau. Il prendra en général la responsabilité de ne pas engager d'autre opération sans élimination du défaut.

Dans un circuit de commande, un double défaut risque de shunter un contact voire toute une séquence. Cela pourrait entraîner soit un arrêt inattendu, soit une commande complètement erratique entraînant des situations extrêmement dangereuses. La solution habituellement pratiquée est de relier la polarité « commun bobines » à la terre. La configuration s'identifie à un schéma TN-S. Un défaut d'isolement provoque le fonctionnement du dispositif de protection contre les courts-circuits, mettant hors tension le circuit de commande et entraînant l'arrêt. Mais dans certaines machines dangereuses ou processus critique, l'arrêt par mise hors tension peut provoquer une situation extrêmement dangereuse.

Une autre solution est de configurer le circuit de commande en schéma IT. Un CPI détectera un défaut d'isolement. Il devra empêcher le départ d'une nouvelle séquence. En effet un autre défaut sur la polarité de commande ne constituerait qu'un « deuxième premier défaut » et le risque grave de shuntage de contact reste total. Ce principe d'utiliser le schéma IT pour les circuits de commande ne doit être réservé qu'à certaines machines dangereuses à production répétitive. Il ne doit pas être utilisé dans les processus continus.

Toutefois des dispositifs de surveillance d'isolement peuvent être installés afin de guider les contrôles préventifs. Enfin, les entrées et sorties d'automates programmables peuvent disposer d'une auto-surveillance sous réserve de conditions de câblage définies par le constructeur.

5.6.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un contrôleur permanent d'isolement consiste à créer entre le neutre du transformateur (ou le réseau) et la terre une source génératrice de tension continue ou de basse fréquence qui ne soit pas sous-multiple de la fréquence du réseau (**figure 5.4**). En cas de défaut d'isolement, une boucle de courant est fermée. Le courant peut être détecté par le CPI. Le seuil peut être ajusté pour tenir compte du niveau d'isolement de référence de l'installation.

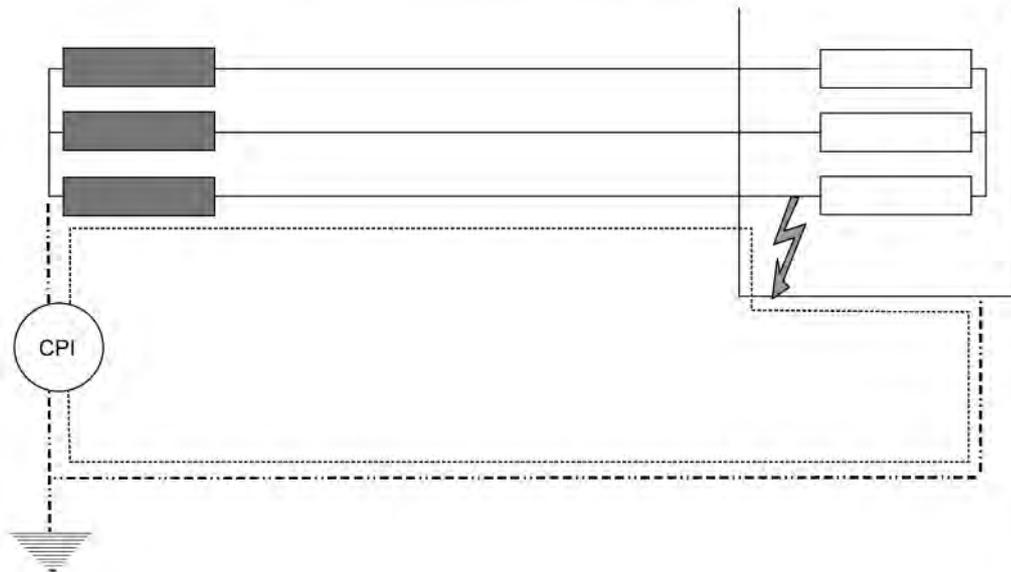


Figure 5.4 – Principe de fonctionnement d'un CPI.

Un contrôleur permanent d'isolement peut être conçu en véritable mesure d'isolement. Le principe de fonctionnement est le même, mais les composants et la chaîne de traitement est conçue et étalonnée à cette fin. Un affichage analogique ou numérique peut indiquer la valeur de l'isolation.

Selon la norme NF C15-100 (tableau 61A), un réseau 230/400 V doit avoir une résistance d'isolement supérieure à 0,5 MΩ.

Lorsqu'il est impossible économiquement d'arrêter une production en vue d'éliminer les défauts, des dispositifs de recherche de défauts sont proposés par les fabricants. Le principe général est de disposer au niveau de la source d'un injecteur de courant alternatif, et de tores de détection de courant sur les départs. Le courant injecté doit être faible (< 30 mA). Tel que le principe de fonctionnement est décrit, il vient vite à l'évidence plusieurs difficultés.

La détection de faibles courants sur des départs de forte intensité pose de sérieux problèmes de réalisation pratique :

- les tores de grande taille difficiles à installer ;
- la transmission de mesure des courants secondaires des tores sur de longues distances est fortement perturbée par des influences externes ;
- le coût de l'installation sur un grand nombre de départs devient vite rédhibitoire.

Cette situation devenue insoutenable pour les appareils de première génération a fait progressivement abandonner le schéma IT dans la grande industrie de fabrication (automobile par exemple), au profit du schéma TN.

La génération actuelle des détecteurs de défauts a apporté de vraies solutions aux contraintes passées. La source de courant de détection produit un courant assimilable à un signal digital de formes carrées. La détection du signal est toujours réalisée à l'aide de tores, mais la « centrale de détection » devient décentralisée. Ces centrales sont localisées dans chaque tableau et gèrent un nombre limité de voies (en général 10 à 12 voies). En revanche elles sont dotées d'une liaison par bus leur conférant la possibilité de transmettre à une gestion technique de surveillance. Certaines peuvent mémoriser un défaut fugitif. Cette nouvelle technologie permet de s'affranchir des anciennes contraintes de recherche de défauts et d'avoir une véritable gestion du réseau.

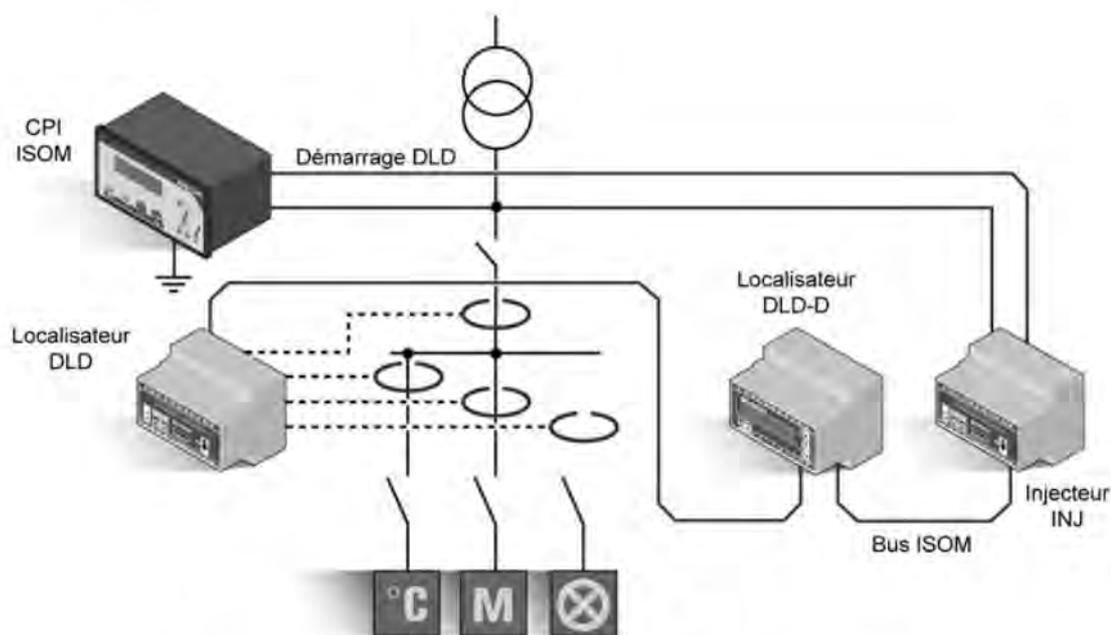


Figure 5.5 – Principe de détection de défauts (d'après Socomec).

Il persiste malgré tout les situations « inconfortables » en situation de premier défaut, décrites au chapitre 3, § 3.6 à propos des surtensions, et en partie C à propos de la description du schéma IT.

Il faut ajouter une situation pouvant perturber sérieusement la fiabilité des détecteurs de défauts. En effet, le générateur est prévu pour délivrer un courant de faible intensité (10 à 30 mA). Le courant de détection des tores a inévitablement un seuil minimal. On peut imaginer que plusieurs « premiers défauts » soient présents, faute d'intervention rapide. Le courant générateur de mesure se répartit alors sur

les tores associés aux défauts multiples, réduisant les courants traversant à une valeur inférieure au seuil de mesure. L'origine des défauts est alors mal signalée, entraînant souvent l'exploitant à mettre en cause la fiabilité du système de détection.

Voilà encore un exemple pour expliquer l'indispensable urgence d'intervention à la suite d'un premier défaut d'isolement.

En forme de conclusion, le schéma IT n'est pas une fin en soi. Le principe de surveiller une installation dans le but de mener une action préventive, avant d'attendre que le niveau des défauts prenne une amplitude suffisante pour faire déclencher les protections, est l'objectif central à atteindre. Les appareillages aujourd'hui disponibles sur le marché permettent une surveillance de tous systèmes d'installations (puissance ou contrôle) quel que soit le schéma de mise à la terre.

6 • COORDINATION DES FONCTIONS

B

FONCTIONS DE BASE DES APPAREILLAGES ÉLECTRIQUES

Une coordination entre deux appareils consiste en ce que leur association n'entraîne pas de désordre ni pour leur bon fonctionnement, ni pour la continuité de service de l'installation, suite à une surintensité, en particulier un court-circuit, ou suite à une surtension.

Dans cette optique, nous distinguerons trois types de coordinations :

■ Coordination de protection

Sous ce titre nous regroupons :

- la protection d'un appareil par un dispositif de protection contre les courts-circuits ;
- l'accompagnement d'un DPCC par un dispositif limiteur, ayant pour effet de le protéger au-delà de ses performances individuelles.

■ Coordination d'isolement

Ce principe consiste à ne grouper dans un même ensemble que des appareils de même catégorie d'isolement. Les groupes d'appareils sont éventuellement protégés par un limiteur de surtension adapté à leur catégorie.

■ Coordination de fonctionnement

Les principes de sélectivité entre appareils de protection sont développés sous ce titre.

6.1 Coordination de protection

Nous évoquerons les règles de protection contre les courts-circuits des appareils suivants :

- relais thermiques ;
- contacteurs ;
- interrupteurs ;
- contacts auxiliaires.

6.1.1 Protection des relais thermiques et des contacteurs

Un relais thermique a pour organe de sortie un contact destiné à interrompre l'alimentation de la bobine d'un contacteur. Le principe de son fonctionnement (voir partie A) est de chauffer un bilame par une résistance alimentée par le courant.

Comme tout système conducteur, une telle résistance ne peut pas supporter une température trop élevée qui entraînerait sa fusion ou celle d'un de ses points de soudure. Cette température serait atteinte pour une énergie absorbée qui selon la loi de Joule s'exprime par $E = R \cdot I^2 t$.

La courbe caractéristique de fonctionnement d'un relais thermique s'exprime en échelle log/log. En abscisses est exprimée la valeur relative I/I_r de l'intensité, en ordonnées le temps de fonctionnement. Appelons E_{max} la valeur maximale de l'énergie supportable. La règle $R \cdot i^2 t < E_{max}$ peut s'exprimer par :

$$t < \frac{E_{max}}{RI^2} \text{ ou } t < A \cdot I^{-2} \text{ (avec } A = E_{max}/R)$$

Cette inégalité se représente sur notre diagramme par une droite de pente égale à -2 .

Dans la **figure 6.1**, toute la partie supérieure à cette droite correspond à une destruction des bilames. L'intersection de cette droite avec la courbe de fonctionnement définit le point limite de protection des bilames.

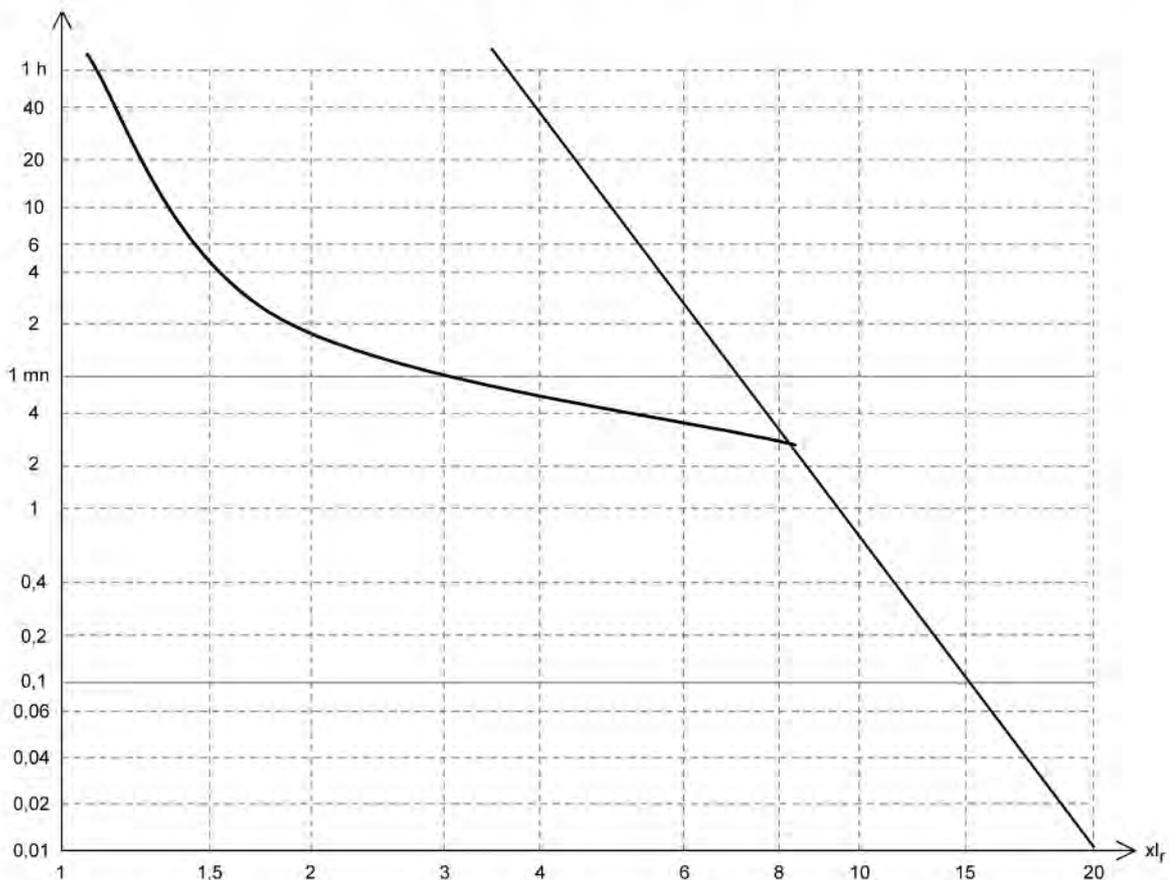


Figure 6.1 – Limite de protection d'un relais thermique.

Protéger un relais thermique consiste donc à installer un dispositif de protection contre les courts-circuits dont la caractéristique de fonctionnement se situe entièrement en dessous de cette droite. La **figure 6.2** montre le principe de protection

d'un relais thermique par un fusible. À cet effet, les fusibles type « accompagnement moteur », notés « aM », ont été inventés. Ils doivent laisser passer les pointes de démarrage des moteurs en restant en dessous de la droite de limite de protection. Ces fusibles ne sont définis que dans leur plage de protection contre les courts-circuits (< 10 s). Ils sont uniquement destinés à protéger les relais thermiques. Pour les meilleures dispositions pratiques, ils sont identifiés par l'intensité maximale d'emploi du relais. Ainsi un relais 4 A est protégé par un fusible aM 4 A ; un autre de 25 A, par un fusible de 25 A.

Il faut savoir toutefois que les fusibles aM ont été inventés en France, probablement vers les années 1950. Ils sont encore assez peu connus et utilisés dans les autres pays.

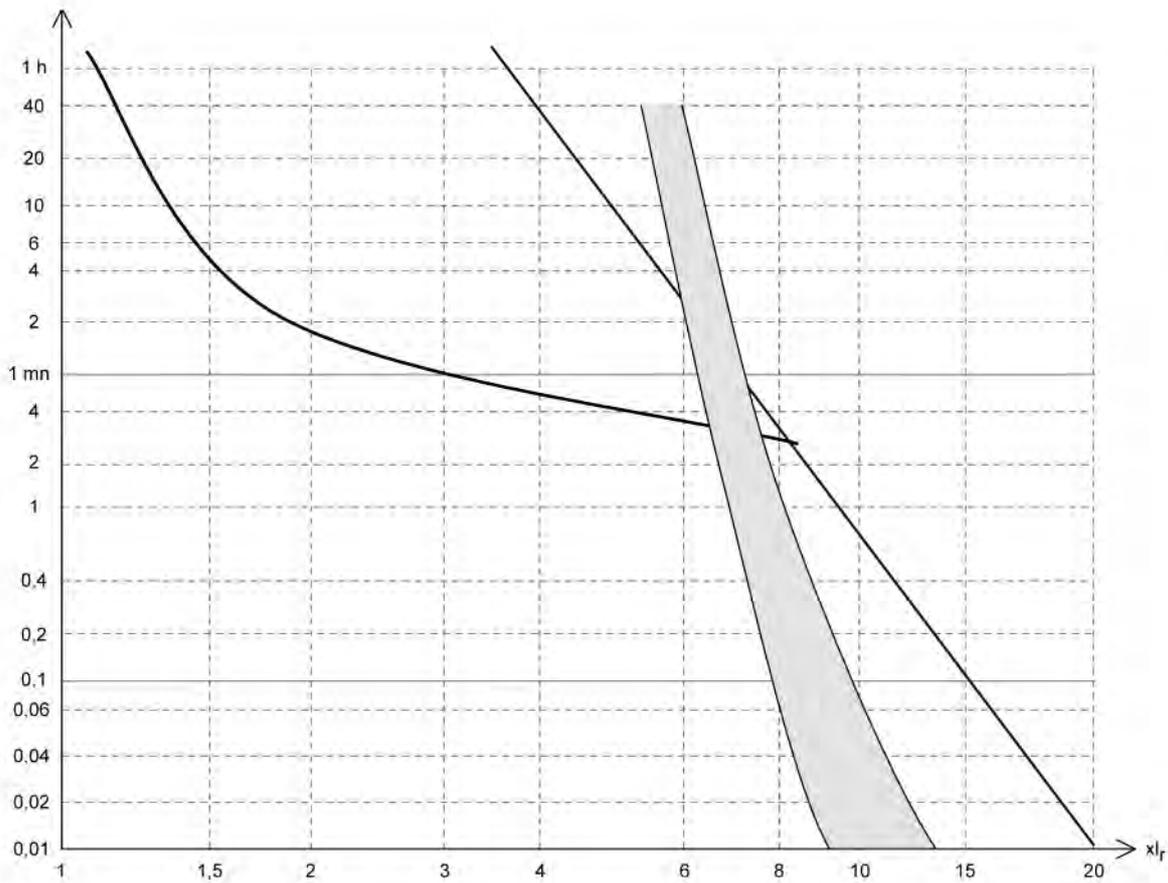


Figure 6.2 – Protection d'un relais thermique par fusible.

Protéger un relais thermique par disjoncteur consiste à régler le déclencheur magnétique de celui-ci à une valeur inférieure au point de destruction. Toutefois cette condition n'est pas suffisante, en effet le temps de fonctionnement du déclencheur « à court retard » comme il est nommé officiellement, est de l'ordre de 5 à 15 ms. Pour ce temps, la caractéristique du disjoncteur coupe la droite I^2t en un point au-delà duquel les bilames ne sont plus protégés.

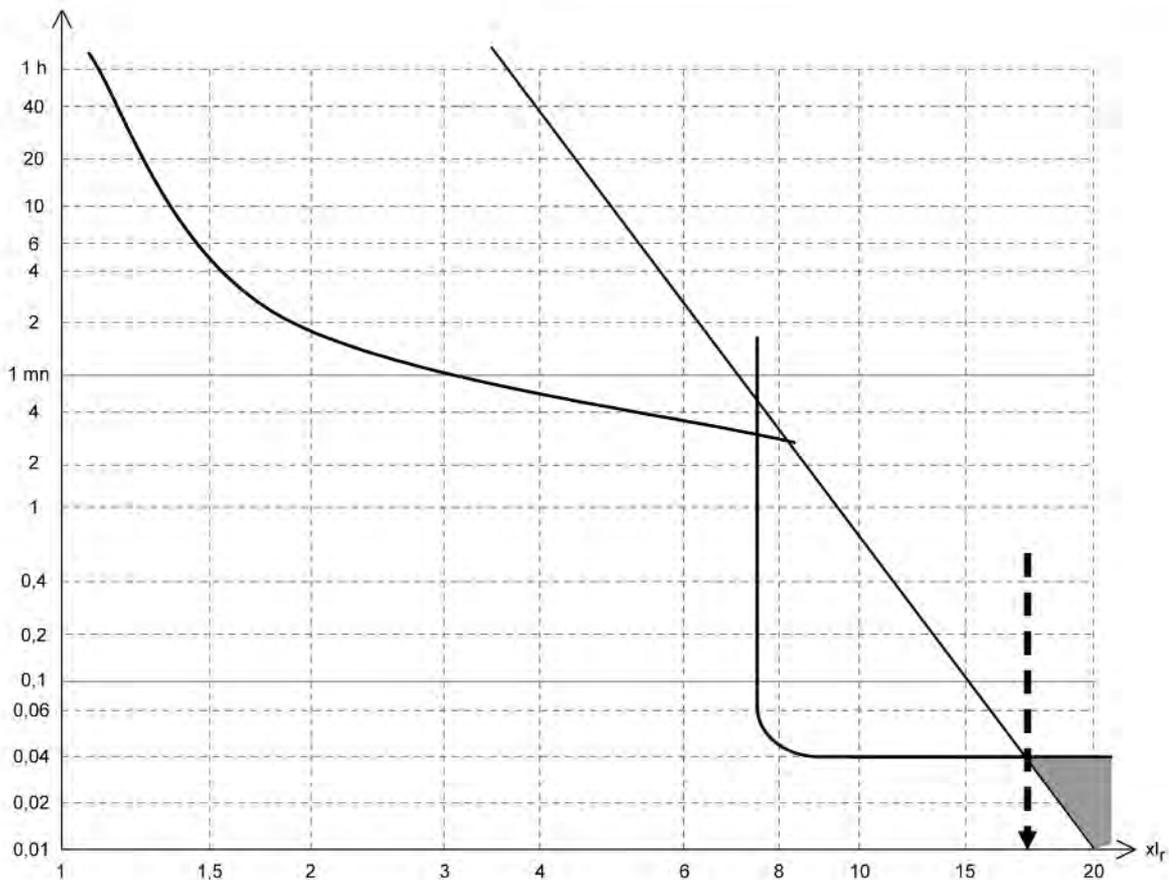


Figure 6.3 – Protection d'un relais thermique par disjoncteur.

Prenons pour exemple une limite de protection de $8 \times I_n$ pour un temps de 2 s. Appliquons cette donnée à un relais de $I_n = 6$ A. La valeur I^2t est de $(8 \times 6)^2 \times 2 = 4\,608$ A²s. Pour un temps de fonctionnement du disjoncteur de 5 ms, le courant maximal est de :

$$I = \sqrt{\frac{4\,608}{0,005}} = 960 \text{ A}$$

Le relais thermique serait protégé jusqu'à 960 A. En conséquence, il est illusoire de penser qu'un relais thermique est protégé jusqu'au pouvoir de coupure du disjoncteur d'accompagnement.

En cas d'utilisation d'un disjoncteur limiteur, il est nécessaire de comparer la valeur I^2t supportable par les bilames, avec la valeur limitée par le disjoncteur. Dans notre exemple la valeur I^2t est de 4 608 A²s. Cette valeur doit être reportée sur la courbe caractéristique du disjoncteur telle qu'elle est représentée en **figure 3.13**.

Dans certains catalogues, les disjoncteurs sans déclencheur thermique prévus pour accompagner un démarreur direct, sont appelés « disjoncteurs moteur ». Le constructeur de l'ensemble démarreur ainsi constitué (contacteur + relais thermique + disjoncteur) doit indiquer clairement, selon la norme EN 60947-4-1, la limite d'utilisation en situation de court-circuit. Cette limite s'exprime en termes de

coordination type « 1 » ou type « 2 ». N'oublions pas la recommandation exprimée au § 3.4.4 et illustrée par la **figure 3.29**, que le réglage du déclencheur magnétique ne devrait pas être inférieur à $14 \times I_n$ moteur.

■ Coordination type « 1 »

Ce type de coordination de protection, proposé par la norme EN 60947-4-1, a pour but de décrire un essai de type selon lequel aucun effet dangereux n'est constaté pour l'utilisateur ou destructeur pour les appareils et circuits voisins. Toutefois, le relais thermique du démarreur essayé peut être détruit ou endommagé, et les pôles du contacteur peuvent être soudés. En revanche le disjoncteur doit encore assurer une qualité de séparation, en position ouverte, suffisante qui doit être justifiée par un essai diélectrique à au moins 900 V, ou 2 fois la tension d'emploi.

■ Coordination type « 2 »

Ce type de coordination de protection a pour but de décrire un essai de type selon lequel le démarreur reste utilisable. Un contrôle est malgré tout indispensable :

- le relais thermique n'est pas détruit et conserve ses propriétés initiales ;
- les pôles du contacteur peuvent être légèrement collés, mais de façon réversible ;
- un contrôle diélectrique est également nécessaire à 2 fois la tension d'emploi et au moins à 900 V.

La valeur du courant de tenue aux courts-circuits d'un démarreur est définie en termes de « **courant assigné de court-circuit conditionnel** » de symbole I_q . Le type de coordination doit être associé à cette valeur.

Le détail des essais n'est pas donné dans cet ouvrage, il est cependant utile d'évoquer le fait que les essais sont menés, contacteur fermé au moment de l'essai, et également contacteur fermant sur court-circuit. C'est cet essai qui est le plus déterminant, car les pôles rebondissent inmanquablement pendant leur fermeture, provoquant des arcs qui favorisent leur soudure.

6.1.2 Autoprotection des disjoncteurs-moteurs

Les disjoncteurs-moteurs sont à la fois des disjoncteurs et des démarreurs manuels. Un pouvoir de coupure sous court-circuit leur est assigné. Jusqu'à cette valeur de pouvoir de coupure, l'appareil, en particulier les bilames, n'est pas détérioré.

Pour l'expliquer l'autoprotection, nous partons d'un exemple.

L'impédance interne d'un disjoncteur-moteur est essentiellement constituée par la résistance de son déclencheur thermique à bilames. Pour assurer le fonctionnement de ce déclencheur et ce, quelle que soit l'intensité nominale, les bilames doivent fournir le même travail de déplacement. L'énergie nécessaire doit donc être la même. Elle dépend de $R \times I^2$. Plus l'intensité du relais est faible plus la résistance de chauffage sera élevée.

Il est facile de connaître la valeur de résistance à partir de l'information généralement donnée par le constructeur : « pertes par effet Joule ». Nous relevons chez un constructeur une valeur de 6 W, soit 2 W par phase. Calculons la résistance pour un calibre de réglage de 6 A. $R = 2/6^2 = 0,055 \Omega$. En cas de court-circuit triphasé, la tension simple 230 V est appliquée à chaque bilame. L'intensité en résultant est de $230/0,055 = 4\ 182$ A.

Imaginons que ce disjoncteur-moteur ait un pouvoir de coupure de 6 000 A. Pour le calibre 6 A, un courant de court-circuit ne pourra jamais atteindre une valeur supérieure à son pouvoir de coupure. Tel est le principe d'autoprotection. Le disjoncteur peut être utilisé en tout endroit d'un réseau jusqu'à un courant de court-circuit présumé illimité. On dit de façon simplificatrice que l'appareil a un pouvoir de coupure infini.

6.1.3 Protection des interrupteurs

La tenue aux courts-circuits des interrupteurs est définie par le courant assigné de court-circuit conditionnel I_q . C'est la valeur maximale supportée par un interrupteur protégé par un dispositif de protection contre les courts-circuits décrit par son constructeur.

Dans ces conditions de protection, l'interrupteur doit conserver ses performances d'intensité thermique et diélectrique. S'il a une fonction de sectionnement, cette propriété doit être maintenue.

À défaut de valeur I_q , ou à défaut de disposer du DPCC décrit par le constructeur, on peut utiliser les deux valeurs de tenue aux courts-circuits :

- I_{cw} : courant de courte durée admissible exprimée en kAeff pendant 1 s. Cette valeur donne la contrainte thermique admissible $I^2t = I_{cw}^2$.
- I_{cm} : pouvoir de fermeture sous court-circuit.

Le dispositif de protection contre les courts-circuits doit avoir des performances de limitation telles que :

- la contrainte thermique passante soit inférieure à la valeur admissible I_{cw}^2 ;
- et le courant de crête limité soit inférieur au pouvoir de fermeture I_{cm} .

6.1.4 Protection des contacts auxiliaires

Cette protection consiste à rendre peu probable qu'un contact auxiliaire se trouve soudé suite à un court-circuit. Cette exigence est indispensable pour les contacts ayant un rôle de sécurité tels que les contacts d'arrêt d'urgence, de fins de course de sécurité, de verrouillage...

Il n'y a pas de caractéristique permettant à un utilisateur de choisir lui-même le dispositif de protection contre les courts-circuits. Seul le catalogue du constructeur peut indiquer le fusible ou disjoncteur à associer au contact auxiliaire.

6.2 Coordination d'isolement

6.2.1 Principe

Le **tableau 3.13** décrit les catégories de surtension des matériels. Un ensemble d'appareillage est composé de matériels et appareillages répondant éventuellement à plusieurs catégories de surtension. Il est nécessaire de remarquer que la catégorie de l'ensemble serait alors imposée par le plus faible des éléments. Le câblage, en particulier la technique de câblage sur circuit imprimé, doit tenir compte des

distances d'isolement et de *lignes de fuite*¹ entre conducteurs de potentiels différents. Les règles sont définies par la norme cadre CEI 60664.

Il est certain que deux conducteurs montés sur une plaque isolante n'auront pas, à distance égale, la même tenue aux surtensions si la surface de la plaque isolante est polluée de liquides ou poussières conductrices. Les isolants ont eux-mêmes des caractéristiques différentes de résistances de surface.

6.2.2 Micro-environnement

Cette notion est utilisée pour définir dans quelles conditions un matériel peut être utilisé. Chacun a sans doute observé que derrière un ventilateur ou toute entrée d'air, une accumulation de poussières se produit. Concernant la température environnante, un matériel en haut d'armoire, ou pire au-dessus d'un élément chauffant (transformateur de commande) peut être soumis à une température très sensiblement supérieure à la température moyenne estimée. Ces micro-environnements doivent être pris en compte dans l'étude de la conception et du choix des matériels.

6.2.3 Degrés de pollution

Les distances d'isolement et de ligne de fuites dépendent du degré de pollution pouvant s'observer pour un micro-environnement. Quatre degrés de pollution sont définis par la norme EN 60664-1 :

- **Degré de pollution 1** : il n'existe aucune pollution, éventuellement une pollution sèche non conductrice.
- **Degré de pollution 2** : pollution non conductrice possible. Une conductivité temporaire est envisageable due à la condensation.
- **Degré de pollution 3** : présence de pollution conductrice possible.
- **Degré de pollution 4** : pollution de conductivité persistante causée par de la poussière conductrice, la pluie ou la neige.

6.2.4 Groupe de matériaux

Cette notion tient compte du fait qu'une plaque isolante n'a pas la même résistance aux courants de cheminement d'un matériau à l'autre. Les matériaux sont classés selon leur indice de résistance au cheminement IRC. Le principe de l'essai est de placer deux électrodes en contact avec la surface d'un échantillon du matériau, à faire tomber quelques gouttes de liquide aqueux pour provoquer une contamination électrolytique. Les résultats sont établis de façon comparative. Il a été défini quatre groupes de matériaux en fonction de l'IRC :

- Groupe I $600 \leq \text{IRC}$
- Groupe II $400 \leq \text{IRC} < 600$
- Groupe III $175 \leq \text{IRC} < 400$
- Groupe IV $100 \leq \text{IRC} < 175$

Il n'est pas question de développer l'ensemble des instructions et essais développés par la norme qui comprend 5 parties. Nous expliquons simplement que les classifications de groupes de matériaux, de degrés de pollution et de catégories de surtension

1. Voir définitions en annexe.

définissent les valeurs minimales de distance d'isolement et de lignes de fuite. Ces notions déterminent le niveau d'isolation fonctionnelle. Les constructeurs, dans leurs catalogues indiquent par exemple : qu'un matériel répond à une catégorie de surtension III pour un degré de pollution 3. Cela signifie qu'en fonction du type de matériau utilisé (que le constructeur n'a pas à publier), des lignes de fuites minimales données par le tableau 4 de la norme EN 60664-1 (non reproduite dans cet ouvrage) ont été respectées. Lorsqu'une isolation renforcée est prescrite, les distances doivent se référer à une tension d'utilisation 1,6 fois celle de la tension assignée d'utilisation.

Concernant les distances de sectionnement, le sujet est abordé au chapitre 3, § 3.1.

6.3 Coordination entre disjoncteurs

6.3.1 Sélectivité

La sélectivité semble être devenue la première préoccupation pour les concepteurs de réseaux à basse tension. Poussés par la publicité des constructeurs mettant en avant leurs dernières inventions, et beaucoup d'ambiguïtés et de contradictions dans les normes, certains prescripteurs sont menés à poser des exigences déraisonnables. Nous développerons les principes de sélectivité, mais surtout nous nous efforcerons de développer les éléments faisant appel à la raison.

La **figure 6.4** représente symboliquement un TGBT dont un départ alimente un tableau de distribution. La **figure 6.5** représente un scénario de courbes de déclenchement des disjoncteurs.

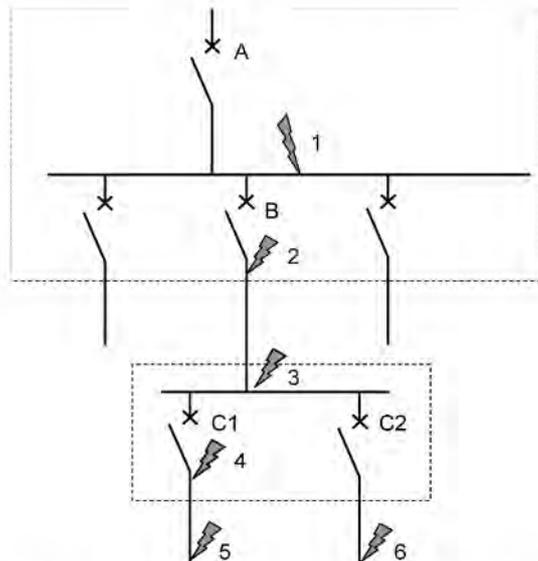


Figure 6.4 – Sélectivité : exemple de réseau distribution.

Un court-circuit au niveau [1], n'engage que le disjoncteur A. Un court-circuit au niveau [2], c'est-à-dire aux bornes de raccordement du départ B, à l'intérieur du TGBT, engage le disjoncteur B, mais aussi le disjoncteur A. Tous deux « voient passer » le courant de défaut. La distance étant courte entre le point [1] et le point [2],

les valeurs des courts-circuits à ces deux niveaux sont quasiment les identiques. Regardant la **figure 6.5**, nous observons que le disjoncteur A dispose d'un déclencheur sur court-circuit temporisé. Toutefois la temporisation est annulée par un déclencheur instantané à une valeur inférieure au courant de court-circuit au point [2]. Dans cette situation les deux disjoncteurs déclencheront si le défaut est franc. Il n'y a pas de sélectivité de fonctionnement. La solution normale serait d'augmenter l'intensité de réglage du déclencheur instantané afin de disposer de la temporisation jusqu'au courant de court-circuit maximum. Dans cette nouvelle situation, le disjoncteur A ne déclenchera pas pendant un temps suffisamment long pour que le disjoncteur B ait tout le temps de couper le courant de défaut. Nous reviendrons plus loin sur cette situation.

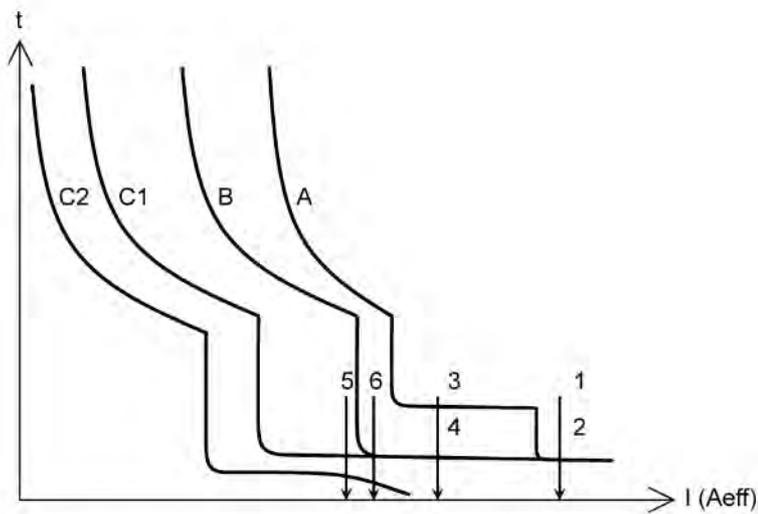


Figure 6.5 – Sélectivité : courbes de déclenchement.

Considérons maintenant un court-circuit en [4] au niveau du raccordement du départ C1, la **figure 6.5** montre que le disjoncteur C1 a, pour ce courant, le même temps de fonctionnement que le disjoncteur B : il n'y a donc pas de sélectivité entre ces deux appareils. En revanche on observe que le disjoncteur C2 a un temps de déclenchement s'accroissant en fonction de l'intensité. C'est le propre des disjoncteurs limiteurs. Pour le même niveau de court-circuit [4] l'appareil déclenche plus vite que le disjoncteur amont B : la sélectivité est assurée.

Différents noms de techniques de sélectivités ont été donnés par les constructeurs : sélectivité ampèremétrique, chronométrique, énergétique... Le meilleur moyen pour apprécier la sélectivité entre deux appareils est bien de superposer leur courbe de fonctionnement. Toutefois les constructeurs sont très réticents à fournir des informations grâce auxquelles un utilisateur serait capable d'évaluer la sélectivité, surtout entre deux appareils d'origines différentes.

Le seul moyen rigoureux de s'assurer une sélectivité entre deux appareils de marques différentes est d'utiliser en amont un disjoncteur de catégorie B (*voir chapitre 3, § 3.3*), en aval un disjoncteur de catégorie B ou A. Le temps de fonctionnement du disjoncteur amont doit être au moins supérieur de 50 ms à celui du disjoncteur aval.

Le problème est qu'un appareil de faible ou moyen calibre ne peut pas supporter une temporisation de 50 voire 100 ms pour un courant de court-circuit élevé. Il est, par exemple irréalisable de concevoir un disjoncteur d'intensité inférieure à 250 A temporisé à 50 ms capable d'un pouvoir de coupure de 50 kAeff. L'appareil ne supporterait pas la valeur I^2t développée, ses connexions non plus. Les constructeurs fabriquent des appareils hybrides, temporisés pour les faibles courts-circuits (10 à $20 \times I_n$) puis instantanés, même limiteurs pour les valeurs élevées.

C'est le moment de développer quelques raisonnements cherchant plus de réalisme. Considérons à nouveau le court-circuit au niveau [4] de la **figure 6.4**. Ce défaut se situe dans l'armoire du tableau de distribution.

- L'origine peut en être un amorçage avec production d'arc électrique, suite à un défaut d'isolement consécutif à un échauffement dû, par exemple, à une borne initialement mal serrée. Dans ce cas, d'une part le courant n'atteint largement pas la valeur théorique calculée, mais d'autre part, l'arc produit peut entraîner la détérioration des circuits voisins. Une sélectivité n'est pas la priorité à rechercher, mais la plus grande rapidité afin de « sauver » le tableau.
- L'autre éventualité est une erreur de câblage provoquant un court-circuit franc. Là encore, cette situation ne pouvant intervenir qu'à la première mise sous tension, un problème de non-sélectivité n'est pas critique.
- Une autre éventualité serait une erreur de manipulation de la part d'un opérateur de maintenance. Là encore, la rapidité de coupure primera largement sur la recherche de sélectivité.

En revanche un défaut en bout de ligne en niveau [5] ne met pas en danger le tableau duquel le départ est origine. Une sélectivité est nécessaire. Celle-ci est plus facilement réalisable étant donné la longueur de la ligne. Il est donc nécessaire et réaliste de considérer qu'une sélectivité entre deux disjoncteurs peut n'être analysée que pour un court-circuit situé en extrémité de la canalisation protégé par le dispositif aval.

On pourrait continuer le raisonnement en imaginant que la sélectivité reste incertaine pour un courant triphasé aval, mais assurée pour un courant de défaut phase-PE. Ce résultat peut être jugé suffisant pour un exploitant. Après tout c'est ce qui est accepté en schéma TT, pour lequel il est d'usage de ne réaliser la sélectivité qu'avec des dispositifs différentiels résiduels, ne fonctionnant qu'en cas de défaut d'isolement.

Les qualificatifs utilisés de « sélectivités totales » ou « partielles » ont pour origine la norme EN 60947-2 concernant les disjoncteurs. Il est normal que ce document introduise le concept de limite de sélectivité (I_s) entre deux appareils de protection. Il n'est pas du rôle de cette norme de prendre position sur l'usage à donner de ces définitions.

La norme NF C15-100 quant à elle reprend ces termes un peu confusément. Mais surtout, il n'est pas logique que les protections des câbles contre la contrainte thermique I^2t , ainsi que la protection des personnes, soient basées sur le défaut aval, tandis que la sélectivité est analysée pour un défaut en amont de la canalisation.

6.3.2 Protection d'accompagnement

■ Accompagnement par fusibles

L'idée est ancienne car les premières générations de disjoncteurs avaient un pouvoir de coupure tout à fait limité. Des valeurs de 6 ou 10 kA_{eff} étaient fièrement annoncées, mais bien insuffisantes pour assurer la coupure des courants de court-circuit estimés. Pendant une assez longue période il a fallu trouver un palliatif : utiliser des fusibles en accompagnement des disjoncteurs.

Le principe de leur mise en œuvre est le suivant :

- Le fusible doit avoir une courbe la plus « verticale possible », du type accompagnement moteur.
- Le fusible doit avoir une courbe limite de fonctionnement passant en dessous du point A (voir **figure 6.6**) correspondant à l'intersection du pouvoir de coupure et du temps de non-fonctionnement du disjoncteur. Cela signifie que le fusible doit fonctionner avant que le disjoncteur ne commence son processus d'ouverture pour un courant de court-circuit supérieur à son pouvoir de coupure.
- Le point S correspond à la limite de sélectivité entre le disjoncteur et le fusible.
 - Pour une valeur de courant inférieure au point S, seul le disjoncteur déclenche.
 - Pour une valeur entre S et A, les deux dispositifs fonctionnent.
 - Pour une valeur supérieure à A, seul le fusible fond.

Il est probable que pour cette dernière occurrence, une coupure omnipolaire ne soit pas assurée. Une meilleure connaissance des caractéristiques des cartouches fusibles permet aux constructeurs de garantir que ces dernières laissent passer suffisamment d'énergie pour provoquer l'ouverture du disjoncteur, tout en limitant son intensité coupée. Auparavant, des dispositifs à percuteurs dont on connaît la fiabilité avaient ce rôle.

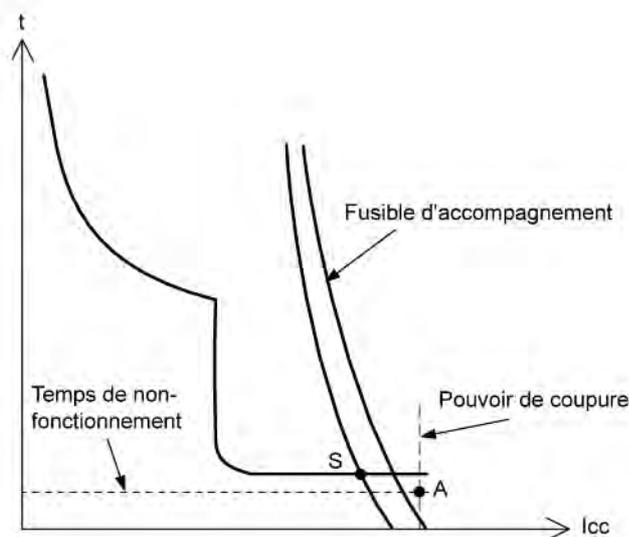


Figure 6.6 – Accompagnement d'un disjoncteur par fusibles.

■ Accompagnement par disjoncteur limiteur

L'accompagnement d'un disjoncteur non limiteur par un disjoncteur limiteur procède du même principe. Mais dans l'état actuel de la normalisation, seul un essai peut garantir ce type d'accompagnement.

■ Association de deux dispositifs limiteurs

Parmi les multiples paramètres déterminant le pouvoir de coupure, le nombre de coupures divisant l'arc est l'un des plus significatifs. Certains constructeurs ont imaginé, avec succès, de disposer de blocs limiteurs associés à un disjoncteur lui-même limiteur. Ces blocs ont une caractéristique de fonctionnement en limitation (temps/courant) identique à celle du disjoncteur. Ce qui garantit un fonctionnement simultané. Le principe peut doubler ou tripler le pouvoir de coupure de l'appareil de base.

6.4 Influence de la température environnante

6.4.1 Cas général

Nous savons que tout conducteur parcouru par un courant subit un échauffement. Les appareillages électriques n'échappent pas à cette loi. C'est d'ailleurs ce qui limite leur intensité d'emploi en service ininterrompu. L'annexe A réunit les différentes définitions afférentes à l'intensité thermique maximale. Toutes se réfèrent à une température environnante « conventionnelle » qui est de 35 °C¹.

Il semble évident que pour une température environnante différente, l'intensité maximale soit différente. Les fabricants indiquent souvent une température maximale admissible de 40 °C voire 50 °C, au lieu de 35 °C. Au-delà il est nécessaire de « déclasser l'appareil » c'est-à-dire de réduire son intensité maximale admissible. À ce stade d'explication, il est utile de s'arrêter sur deux points :

- La température environnante est la température de l'air environnant immédiatement l'appareil. Il ne faut pas la confondre avec la température ambiante qui est celle de la salle où le tableau est installé. Pour un appareil nu, installé dans une armoire électrique, la température environnante est celle qui peut être relevée à l'intérieur, à l'endroit où il est monté. Il est donc indispensable d'évaluer cette température. En partie C, une méthode d'évaluation de la température à l'intérieur des enveloppes est présentée. Elle se réfère à un document de la CEI. La température peut être déduite de l'expérience, après essais ou mesures dans des configurations comparables.
- Il ne faut pas confondre le courant thermique maximal admissible avec le courant d'emploi. Par exemple, un contacteur peut avoir un « courant thermique conventionnel à l'air libre » I_{th} de 80 A et un « courant d'emploi en service AC3 » de 50 A. Imaginons que pour une utilisation à 55 °C, le fabricant annonce un déclassement de 20 %. Il ne s'agit pas d'appliquer le facteur 0,8 au courant d'emploi – celui-ci n'est déterminé que par les capacités de coupure –

1. Nous ne commenterons pas les raisons pour lesquelles la norme NF C15-100 a pris pour température conventionnelle 30 °C pour la détermination des intensités admissibles dans les câbles...

mais au courant I_{th} qui serait alors de 64 A. En revanche, imaginons que pour une utilisation à 60 °C le déclassement nécessaire devienne 50 %, le courant I_{th} serait abaissé à 40 A. L'intensité d'emploi en AC3 ne peut pas être supérieure à cette valeur. Par prudence l'utilisateur de ce contacteur ne prendra pas cette valeur de 40 A pour base de son choix, sauf si le contacteur est utilisé avec un facteur de marche faible (voir définition en annexe).

6.4.2 Relais thermiques à bilames

En partie A, il est donné une description du fonctionnement des relais thermiques à bilames. Ceux-ci fonctionnent sur le principe de dilatation qui dépend de leur température. Cette température est atteinte par la somme de l'échauffement produit par les éléments chauffants et de la température environnante. Si cette température est différente de la température de référence, une dérive des seuils de déclenchement se fera sentir. Cela est intolérable pour les relais destinés à la protection des moteurs. Pour cela les relais thermiques de protection des moteurs sont dotés d'un bilame de compensation de température. Les disjoncteurs, en revanche, ne sont pas tous dotés de compensation de température, en particulier les petits disjoncteurs modulaires. Une température environnante supérieure à la température de référence tendra à faire déclencher le disjoncteur pour une intensité inférieure à l'intensité de réglage, ce qui n'est pas grave pour la protection des câbles, mais dans certains cas, peut perturber l'exploitation.

Les constructeurs donnent dans leurs catalogues la dérive des relais ou déclencheurs thermiques. Celle-ci est exprimée en % par Kelvin.

Exemple pour un relais de protection moteur : l'erreur résiduelle de compensation en température est en général voisine de 0,25 %/K. Elle doit être inférieure à 0,3 %/K. Pour des disjoncteurs de protection ligne, l'erreur peut être de 0,4 % à 0,8 %/K

Pour simplifier l'interprétation de cette caractéristique, les constructeurs présentent plutôt sous forme de tableau de déclassement les valeurs de réglage en fonction de la température.

C

Ouvrages électriques Étude, conception et maintenance

Dans la partie précédente nous nous sommes attachés à expliquer les fonctions des appareillages électriques. Cette présente partie a pour objectif de décrire les installations électriques, leurs distinctions, leurs règles de conception, leur calcul, leurs contraintes de montage et câblage. Elle décrit les tableaux électriques en donnant des indications relatives à leur spécification ainsi qu'à leur maintenance.

7 • INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES INDUSTRIELLES

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus
aux termes de l'article L.122-5, 2^o et 3^o a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7.1 Domaines de tensions

Cet ouvrage se limite à n'exposer que les installations à basse tension et les ensembles d'appareillages qui y sont liés.

Selon la norme NF C15-100 et le décret du 14-11-88, la basse tension couvre la plage de tension allant jusqu'à 1 000 V en courant alternatif ou 1 500 V courant continu. La norme distingue dans cette plage deux « domaines » :

Domaine I : les installations utilisant des tensions ≤ 50 V alternatif ou 120 V continu, qu'elles soient entre conducteurs actifs, ou entre conducteurs actifs et la terre.

Domaine II : les installations utilisant des tensions :

- en courant alternatif : > 50 V et $\leq 1\,000$ V entre phases ;
- en courant continu : > 120 V et $\leq 1\,500$ V entre polarités.

7.1.1 Domaine I

Le domaine I est communément appelé « très basse tension ». Celui-ci présentant trois variantes qui régissent des champs d'applications différents :

- TBTS : la très basse tension de sécurité s'applique aux installations de distribution d'énergie de ce domaine, utilisant une source de sécurité.
- TBTP : la très basse tension de protection s'applique particulièrement aux circuits de commande alimentés par un transformateur de séparation.
- TBTF : la très basse tension de fonctionnement s'applique aux installations utilisant ce domaine, sans avoir un objectif de protection des personnes. Ce domaine est rencontré dans les circuits de commande et d'alimentation d'ensembles électroniques.

La TBTS permet de se dispenser de protection physique contre les contacts directs (IPxxB) jusqu'à 25 Vca ou 60 Vcc.

La TBTP permet de se dispenser de protection physique contre les contacts directs (IPxxB) jusqu'à 12 Vca ou 30 Vcc.

Pour les autres tensions de TBTS ou TBTP, une protection contre les contacts directs doit être installée.

La TBTF n'a aucun rôle de protection, les règles du domaine II doivent lui être appliquées.

Le chapitre 14 (§ 14.1.1) précise les principales dispositions de câblage applicables à ces domaines.

7.1.2 Domaine II

Le domaine II est communément appelé « domaine basse tension ». Le décret du 14-11-88 sépare ce domaine en deux « sous-domaines » :

- en courant alternatif :
 - BTA pour les tensions supérieures à 50 V et inférieures ou égales à 500 V ;
 - BTB pour les tensions supérieures à 500 V et inférieures ou égales à 1 000 V ;
- en courant continu :
 - BTA pour les tensions supérieures à 120 V et inférieures ou égales à 750 V ;
 - BTB pour les tensions supérieures à 750 V et inférieures ou égales à 1 500 V.

Les réseaux 230/400 V appartiennent au sous-domaine BTA, les réseaux 380/690 V, au sous-domaine BTB.

Pour simplifier, nous retiendrons que tous les matériels doivent avoir une tension assignée d'utilisation appropriée au domaine auquel il appartient. Concernant la BTB, le décret du 14-11-88 demande quelques dispositions complémentaires en vue d'assurer la meilleure sécurité après avoir ouvert un dispositif de sectionnement. En cas de travaux, le circuit séparé de sa source doit être mis à la terre avant d'effectuer des interventions. Cette disposition se justifie probablement par le fait que pour cette tension, le courant de fuite n'est pas négligeable. Il peut suffire à élever le potentiel des circuits censés être isolés. Il est aussi question d'utiliser des dispositifs de sectionnement qui soient « à coupure pleinement apparente ». Cette spécification est devenue obsolète depuis une définition, devenue très rigoureuse, de la fonction de sectionnement (voir partie B). À ce sujet, la fonction de sectionnement peut être restreinte à une tension limite. Il y a lieu de vérifier auprès du constructeur si la fonction de sectionnement d'un appareil s'applique au sous-domaine BTB, si celui-ci est utilisé pour une telle tension.

7.1.3 Règle de coexistence de plusieurs domaines

Lorsque dans un ouvrage, installation ou tableau, deux domaines de tensions sont utilisés en voisinage, une séparation électrique et physique doit les isoler entre eux. L'isolation électrique doit avoir un niveau U_{imp} correspondant au niveau requis entre phase et terre pour le domaine de tension la plus élevée.

La séparation physique n'est pas régie par une règle précise. Le principe, laissé à la responsabilité du constructeur ou de l'installateur, est qu'en cas d'intervention ou d'incident sur l'un des circuits, les circuits séparés ne soient pas atteints.

7.2 Quelques configurations typiques de distribution électrique

Chaque branche d'activité a ses propres configurations d'installation ainsi que ses contraintes d'exploitation et de continuité de service. De ces points communs en

découlent naturellement des configurations typiques de schémas de distribution. Quelques-unes d'entre elles vous sont proposées dans ce qui suit.

7.2.1 Industrie manufacturière (ex : automobile)

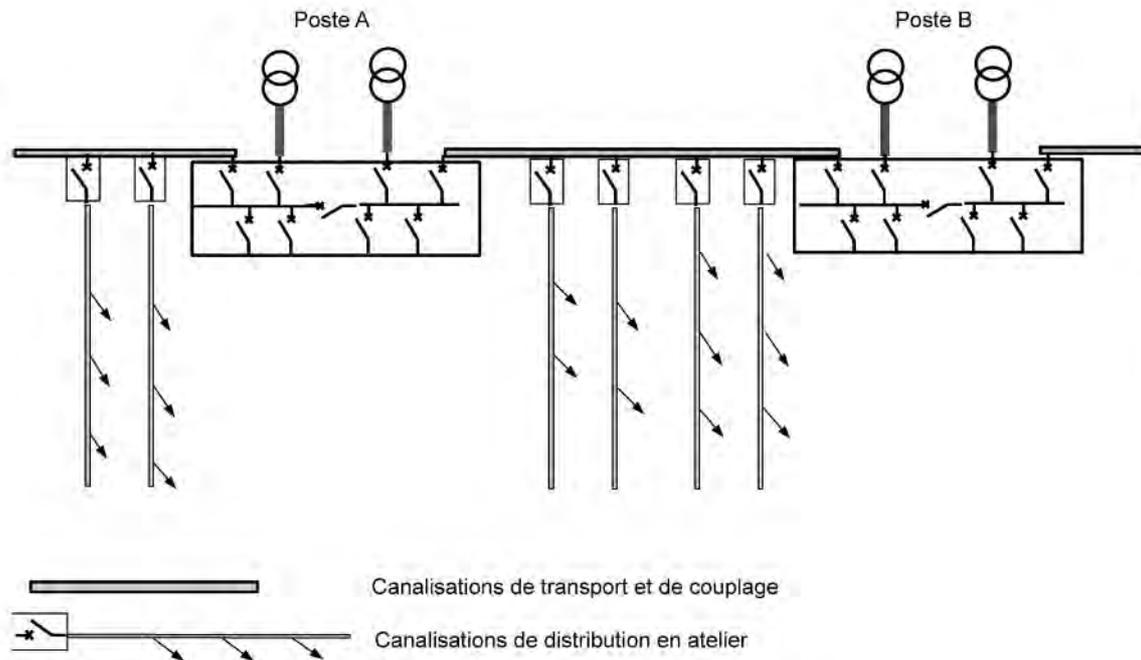


Figure 7.1 – Schéma type de la distribution électrique dans un atelier d'une industrie automobile.

L'industrie manufacturière telle que l'industrie automobile se caractérise par les points suivants :

- Mises à part les fonderies de pièces en fonte et les lignes de peintures, les ateliers sont équipés d'ensembles de machines et de moyens de manutention qui sont dédiés à la fabrication d'une gamme de produits, voire même d'un modèle. La durée de vie du processus de fabrication et des équipements nécessaires à sa mise en œuvre est directement liée à la durée de vie commerciale des produits fabriqués. L'infrastructure des ateliers doit admettre ces changements complets de configuration d'implantation des machines.
- Les dimensions des ateliers sont très grandes, alors que les intensités distribuées sont très importantes. Les chutes de tension pourraient vite atteindre des valeurs inadmissibles.
- Beaucoup de machines consistent à usiner des pièces métalliques. Les huiles de coupes et autres liquides de refroidissement sont utilisés en abondance. Les fuites inévitables interdisent l'utilisation de caniveaux¹. De toute façon ceux-ci

1. Il faut reconnaître que cet aspect ne s'applique plus aux ateliers récents et aux machines qui les équipent. Mais il semble que la « tradition » subsiste.

délimitent trop les espaces d'équipement et nuisent aux changements complets de configuration.

Ces données ont conduit les architectes de ces constructions industrielles à opter pour les dispositions suivantes :

- Des postes de transformations doivent être multipliés pour être implantés le plus proche possible des aires de consommation. Ils sont alimentés en amont par un réseau de distribution en haute tension.
- La charge de chaque poste étant très variable, plutôt que les surdimensionner, un couplage entre deux postes voisins est rendu possible *via* un réseau de canalisations préfabriquées « primaires » de calibre assez typiquement de 2 500 A ou 3 200 A. Ces canalisations sont également utilisées pour alimenter des canalisations « secondaires » de distribution sur lesquelles les machines sont connectées.
- Afin de laisser libre toute la surface au sol, les postes comprenant l'arrivée HT, le transformateur et le tableau BT, sont installés en passerelles. Certaines usines les ont même installés en toiture.
- Les canalisations primaires sont installées dans les fermes. Des passerelles sont parfois aménagées pour en assurer l'accès, mais la fréquence des interventions étant assez faible, un accès par élévateurs est maintenant largement admis.
- Les canalisations préfabriquées secondaires sont le plus souvent considérées faire partie de l'installation de fabrication. Elles sont, à ce titre, démontables pour être installées de façons accessibles à partir des allées nouvellement reconfigurées.
- L'ensemble du complexe industriel est alimenté par plusieurs points de réception en 64 kV, qui assure une continuité acceptable de l'alimentation en énergie. Toutefois des groupes électrogènes sont prévus sur le réseau HT. Ils sont susceptibles de fournir une alimentation de sauvegarde de l'outil de travail.
- Deux réseaux complètement indépendants sont dédiés à la distribution de la « force » et de l'éclairage. Aucun couplage n'est possible entre les deux réseaux.
- Le schéma de mise à la terre est maintenant du type TN-S. Le neutre n'est en principe pas utilisé dans le réseau force.

7.2.2 Industrie chimique lourde

À l'opposé des industries manufacturières, telles que l'industrie automobile, les unités de production de chimie de base ou pétrochimiques sont installées « à vie ». Les principes d'évolution complète de structure des machines n'existent pas. Toutefois des extensions ou modifications partielles sont admises, sans que la production doive être arrêtée.

Les installations sont relativement concentrées sur une surface. En revanche le processus ne peut pas être arrêté. Il convient alors de doter l'installation de moyens de surveillance. Les travaux d'exploitation, de maintenance et d'évolution doivent pouvoir s'opérer sans perturber la production.

Ces installations comprennent plusieurs tableaux type *Motor Control Center* (MCC), dédiés à chacune des branches de production. Ceux-ci sont presque toujours à unités fonctionnelles débrochables. Ils sont alimentés à partir d'un poste central de très forte intensité (4 000 à 6 300 A). Le tableau est nommé PCC (*Power Control Center*). Un complexe chimique peut comporter plusieurs ensembles PCC-MCC.

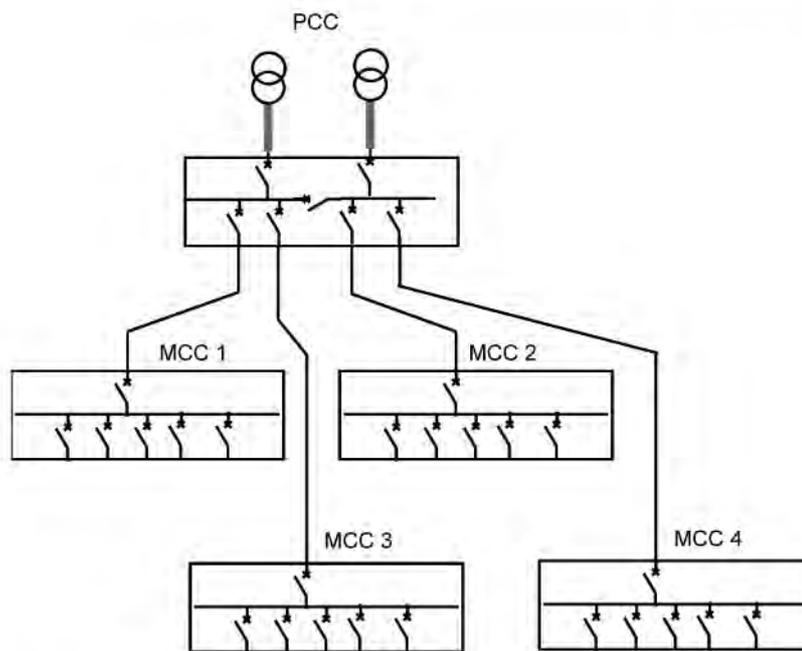


Figure 7.2 – Configuration de principe d'une unité pétrochimique.

Le schéma de mise à la terre utilisé en France du type IT. Le neutre n'est pas utilisé. Le réseau éclairage est traité séparément.

7.2.3 Centre commercial type « hypermarché »

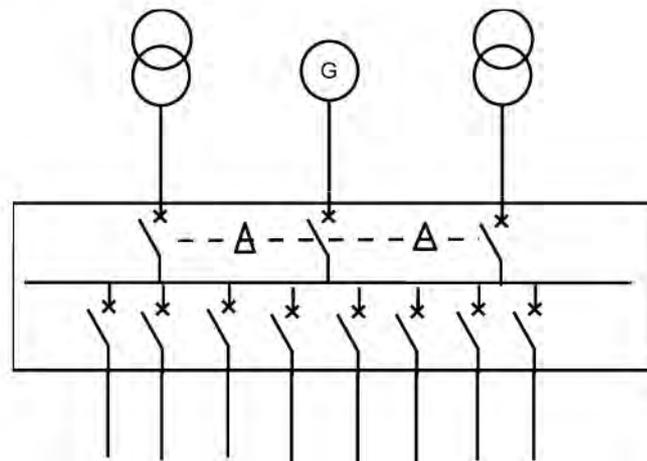


Figure 7.3 – Schéma de principe d'un hypermarché.

Ce type d'établissements comporte des groupes de récepteurs bien définis :

- le plus gros consommateur est constitué par les installations de « froid » : chambres froides de réserves, vitrines de froid « positif » (au-dessus de 0 °C) et de froid « négatif » (surgelés) ;
- le second groupe est l'éclairage ;

- les autres groupes : caisses, bureaux, sanitaires, etc. ;
- quelquefois une cafétéria est annexée.

Le tableau comporte deux transformateurs souvent de 1250 kVA. La puissance d'alimentation est calibrée de telle façon qu'un seul transformateur peut suffire à exploiter correctement le magasin. La puissance maximale consommée correspond à 1,5 fois la puissance d'un transformateur.

Un groupe électrogène est installé de puissance égale à celle d'un transformateur. Les disjoncteurs d'alimentation sont gérés de telle façon qu'ils puissent alimenter le tableau avec 1 ou 2 transformateurs, ou bien avec le groupe. Le groupe n'est pas mis en parallèle avec les transformateurs.

La présence du groupe n'est pas justifiée uniquement pour assurer un remplacement en cas de perte de réseau, mais aussi pour des raisons tarifaires proposées par EDF, de type EJP (effacement en jours de pointe). Des moyens de délestages sont prévus. Les tableaux sont de conception la plus économique possible. Le plus souvent aucun personnel d'exploitation n'a pour mission la surveillance et la maintenance de l'installation électrique. La surveillance est confiée au personnel de sécurité. La maintenance est assurée au moyen de contrats passés auprès d'entreprises spécialisées.

7.2.4 Hôpital

Les installations pour hôpitaux doivent répondre à une somme de règlements, qui rend sa structure un peu complexe. Du point de vue des contraintes d'exploitation, quatre catégories de récepteurs peuvent être distinguées,

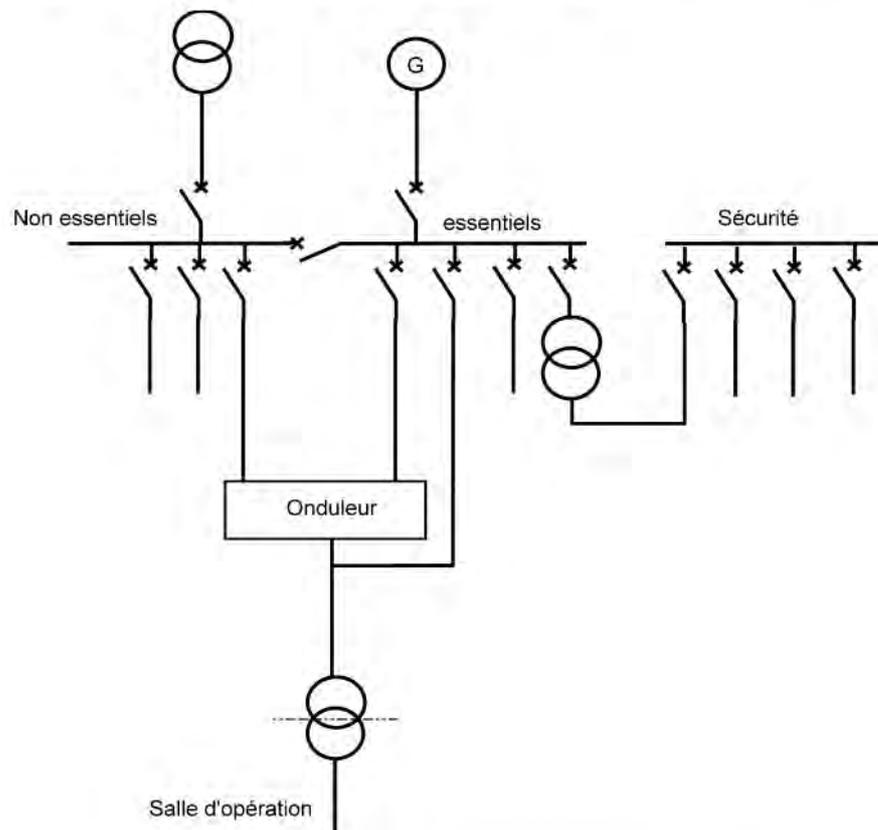


Figure 7.4 – Schéma de principe du réseau d'un hôpital.

Les **salles de soins**, ainsi que les chambres qui peuvent à tout moment être transformées en salles de soins, sont ou peuvent être équipées d'appareils électroniques de surveillance et de soins. Ceux-ci sont particulièrement sensibles aux perturbations électromagnétiques. Le schéma de liaison à la terre permettant la meilleure garantie contre de telles influences de la part du réseau est incontestablement le schéma **TN-S**. Le schéma **TT** est inexploitable pour de telles puissances distribuées.

Les **salles d'opération** doivent être alimentées de façon redondante par plusieurs sources et plusieurs voies venant de ces sources. La conception du réseau de chacune des salles doit être telle qu'aucune défaillance ou perturbation pouvant subvenir à une quelconque autre partie de l'installation ne puisse diminuer en quoi que ce soit sa qualité. Dans cet objectif, chaque salle possède son propre onduleur, lequel est alimenté par une quelconque des sources du réseau. Les chemins d'installation des câbles d'alimentation doivent être différents. Ces alimentations fournissent l'énergie à la salle *via* un transformateur de séparation de conception spécifique (haute isolation ; écran de blindage...). Le réseau ainsi constitué est isolé à la fois du reste du réseau, mais aussi de la terre commune. Le PE est remplacé par une liaison équipotentielle non mise à la terre. Le détail de ce réseau est donné plus loin au chapitre 8, § 8.7.

Un hôpital est un établissement recevant du public (ERP). À ce titre, sa conception et ses équipements doivent répondre aux règlements qui concernent ce type d'établissement. En particulier les circuits d'alimentation des matériels destinés à assurer la sécurité du public en cas d'incendie doivent être conçus et exploités de telle façon qu'ils ne soient pas affectés par la défaillance d'autres circuits et qu'eux-mêmes, en cas de défaillance, n'aient pas d'influence sur le fonctionnement d'autres circuits. L'usage veut que, pour satisfaire ces exigences, ces circuits soient alimentés à partir d'un sous-réseau en IT, isolé par un transformateur de séparation. Des détails et observations sont donnés au chapitre 8, § 8.8.

Enfin un tel établissement comporte des parties d'installations qui ne sont pas soumises à des règlements spécifiques, si ce n'est à la norme NF C15-100.

La conception générale maintenant admise pour traiter les hôpitaux consiste à alimenter le TGBT en schéma TN-C, certains départs de services généraux peuvent être distribués selon cette méthode. En général, ce sont des départs non prioritaires et non secourus par le groupe de secours. Les salles de soins ou parties de bâtiment assimilées comme telles, sont distribuées depuis le TGBT en schéma TN-S.

7.2.5 Installations de haute sécurité (banques, centraux téléphoniques)

Les établissements tels que les sièges sociaux de banques, les salles de marchés en bourse, les centraux téléphoniques, les serveurs Internet, les relais de télévision... ont la particularité de n'admettre aucun temps d'arrêt. En effet chaque minute d'arrêt peut se chiffrer en plusieurs millions d'euros générés par des pertes financières indirectes énormes. Mis en rapport avec ce risque, le coût de l'installation électrique est considéré comme mineur.

La conception du réseau est basée sur une redondance totale. Chaque ensemble d'utilisation est alimenté par un tableau « à double attache » venant de deux sources entièrement indépendantes l'une de l'autre. Chacune de ces sources est alimentée par un jeu de barres « normal » alimenté par le(s) transformateur(s) ou d'un jeu de

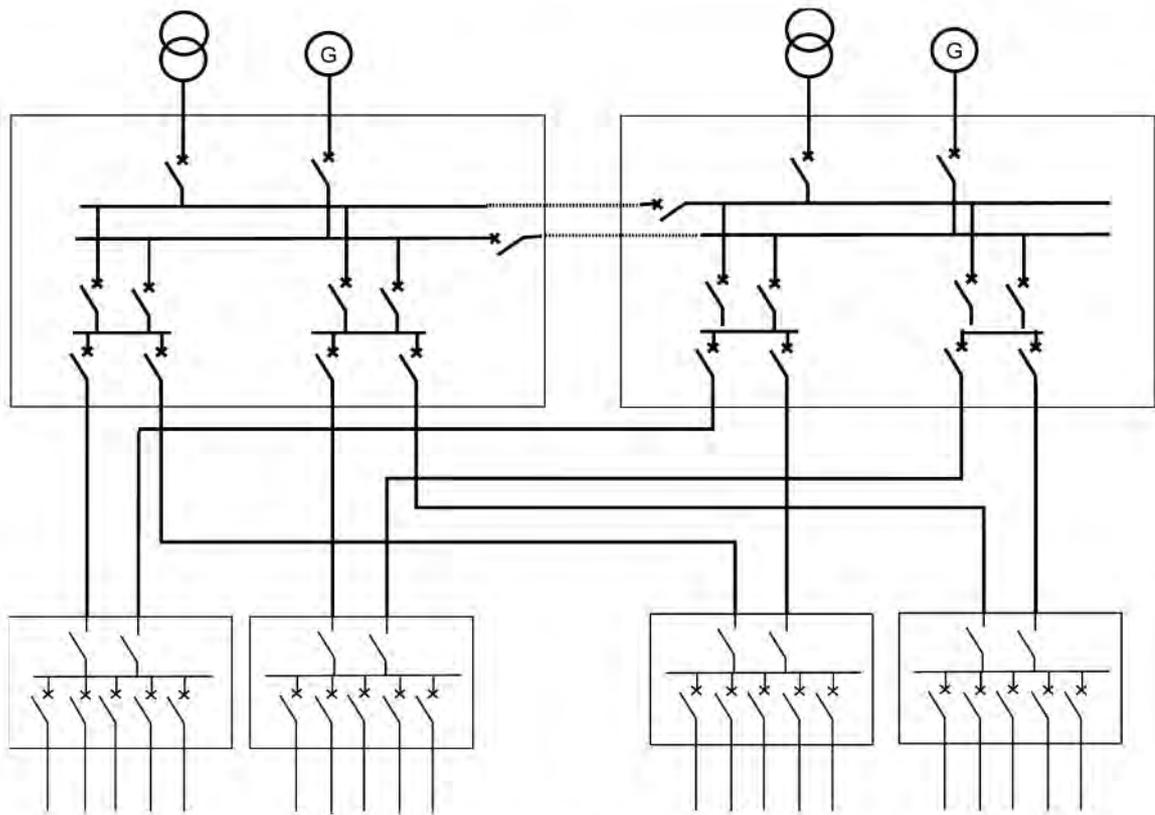


Figure 7.5 – Schéma de principe du réseau de haute sécurité.

barres « secours » alimenté par un ou plusieurs groupes électrogènes. Les passages des deux câbles d'alimentation doivent être séparés pour qu'un cas d'avarie grave sur l'un (incendie) ne perturbe pas le second.

Les postes eux-mêmes sont doublés. Deux postes, couplables entre eux, sont installés dans des parties de bâtiments séparées de tel niveau qu'un incendie ou autre sinistre ou événement de même gravité, ne puisse affecter qu'un seul des postes. Le schéma de principe (**figure 7.5**) montre un principe où chaque tableau d'utilisation est alimenté par l'un ou l'autre poste. Bien sûr, le niveau de redondance est ajusté à l'importance de l'établissement, le principe en restant le même. La haute concentration de matériels électroniques justifie que le réseau pour ce type d'établissement soit en schéma TN-S.

8 • SCHÉMAS DE LIAISON À LA TERRE (SLT)

Les schémas de liaison à la terre ou SLT décrivent la situation d'un réseau de distribution par rapport à la terre. Pendant longtemps et encore aujourd'hui, l'expression « **régime du neutre** » a été utilisée pour désigner cette configuration. La symbolisation des SLT par deux lettres signifiant la situation d'un réseau et des masses par rapport à la terre a été introduite, dans la norme NF C15-100 de 1976.

8.1 Origine des régimes du neutre (schémas de liaison à la terre)

Les premiers pas de la distribution électrique datent des années 1890. À cette époque la distribution restait locale (l'énergie était produite là où elle était consommée), sauf peut-être en éclairage public où on utilisait des lampes à arc sous 100 V continu.

C'est vers les années 1920 que l'électricité avait déjà bien commencé à être distribuée dans les habitations à des distances appréciables des centrales électriques, à partir de réseaux moyenne tension. Souvent les lignes, chez les particuliers, étaient réalisées à l'aide de conducteurs nus montés sur isolateurs !

Les accidents arrivaient. À l'époque les risques sur les humains semblaient être une fatalité admissible. Les risques d'accidents corporels étaient laissés à la responsabilité de l'utilisateur... On considérait d'ailleurs qu'une tension voisine de 100 V n'était pas dangereuse !

Les sociétés de distribution semblaient s'inquiéter surtout de la dégradation de leur matériel en raison des surtensions. Ainsi, en cas de défaut d'isolement entre la moyenne tension et le réseau BT, la tension de l'ensemble du réseau risque de s'élever considérablement, provoquant des « claquages », facilités d'ailleurs par le faible niveau d'isolation des installations de l'époque.

Le réseau était isolé (*ou plutôt, n'était pas relié intentionnellement à la terre*). Les masses ne l'étaient pas non plus, mais, par leur montage elles l'étaient malgré tout. Dans ces conditions on s'était aperçu qu'un défaut d'isolement d'une phase faisait monter le potentiel entre les autres phases et les autres masses (**figure 8.1**).

Un défaut d'isolement sur une autre phase dans un autre circuit pouvait porter les enveloppes à un potentiel par rapport à la terre égal à la tension entre phases (**figure 8.1**).

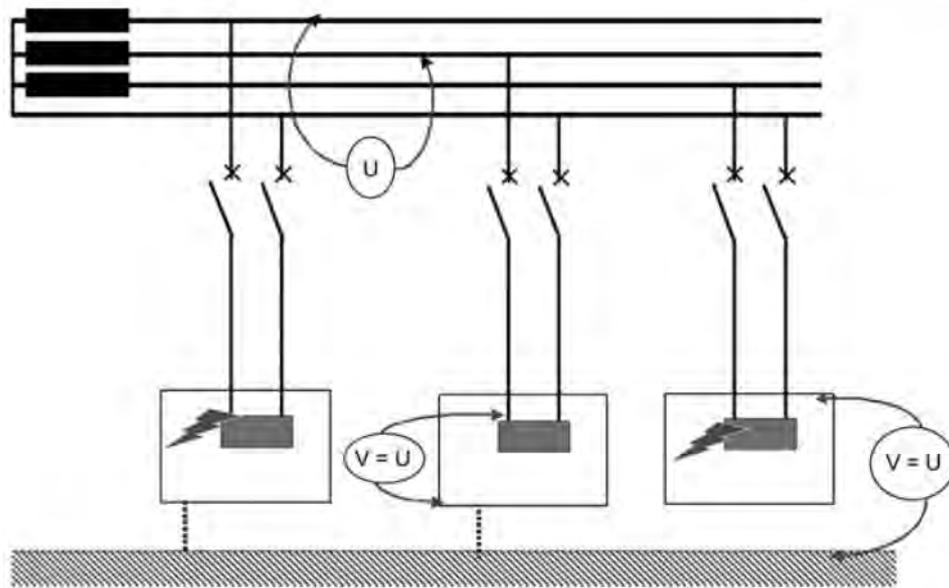


Figure 8.1 – Surtensions générées par un défaut d'isolement dans un système non mis à la terre.

Enfin dans un réseau public, les masses des utilisateurs étant reliés à la terre, en cas de premier défaut chez un abonné, et un deuxième défaut chez un autre, un courant de circulation aurait perturbé gravement le réseau et le gérant du réseau.

Ce sont les raisons pour lesquelles les instances professionnelles et gouvernementales demandaient de raccorder à la terre les enveloppes métalliques des machines ou autres récepteurs de puissance importante, ainsi que les structures métalliques en milieu humide. Les conditions de mise à la terre n'étaient pas définies et il n'était pas encore question d'interconnecter les masses entre elles.

Pour les réseaux de distribution publique, la mise à la terre du neutre du transformateur était imposée. Ainsi, dès la fin des années 1920 deux types de réseaux étaient exploités :

- Les réseaux privés industriels. Ceux-ci étaient exploités avec le neutre isolé, mais les masses des machines étaient reliées à la terre.
- Les réseaux de distribution publique. Le neutre des transformateurs était relié à la terre. Il était conseillé de relier à la terre les masses des appareils les plus puissants.

Avant les années 1960, les effets du courant électrique et les limites de danger pour les personnes n'étaient pas encore quantitativement établis. La définition actuelle du mot de « masses » n'était pas encore acquise. Les réseaux triphasés 127/220 V ou biphasés 110/220 V étaient encore très répandus. La tension monophasée délivrée aux abonnés de 110 ou 127 V était jugée non dangereuse (ou du moins de danger acceptable...).

Les échanges entre professionnels, à l'issue des accidents encore nombreux, ont permis de reconnaître que lorsque deux appareils, chacun relié individuellement à la terre, sont victimes d'un défaut d'isolement concernant deux phases différentes, un courant de circulation traverse les deux prises de terres. Il apparaîtra entre les deux appareils une différence de potentiel égale à la tension entre phases.

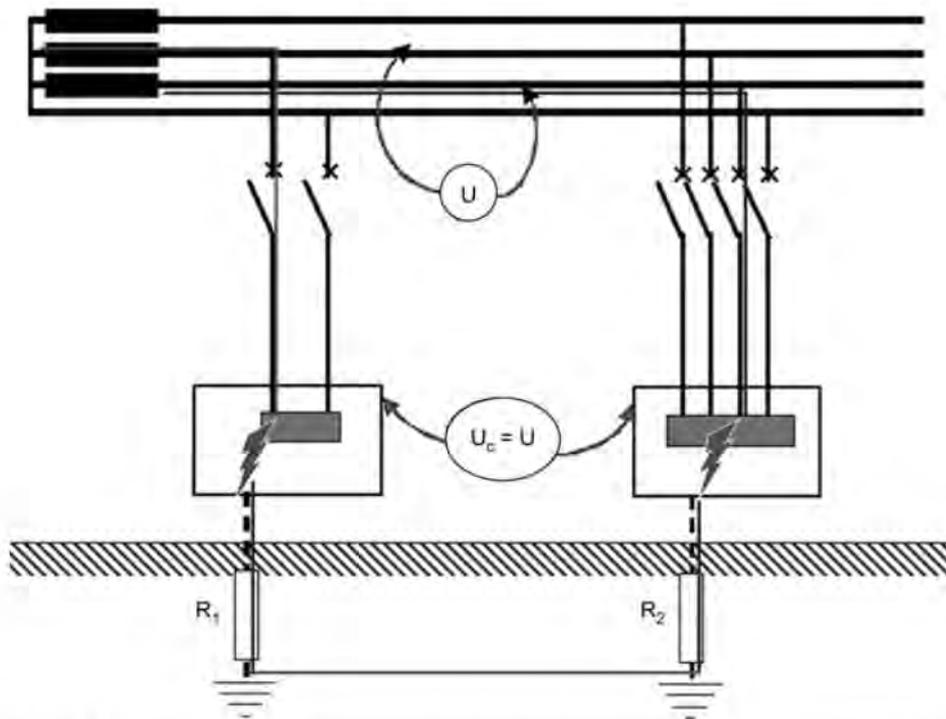


Figure 8.2 – Apparition d’une tension de contact entre masses non interconnectées.

Ont été alors découvertes les notions de « tension de contact » (U_c) et de « courant de défaut » (figure 8.2).

Pour remédier à cette situation hautement dangereuse on peut envisager de relier les masses entre elles. Alors le courant de défaut parcourra des conducteurs de faible résistance, donc les tensions de contacts seront réduites. Le problème évident est qu’un court-circuit est alors créé. Il faut l’éliminer rapidement (figure 8.3).

À partir de ce stade de réflexion, on comprend bien qu’une simple mise à la terre ne peut en aucun cas résoudre le problème de la protection des personnes et des installations.

Deux directions de solutions sont alors mises en chantier :

- les solutions tendant à rendre les défauts d’isollements impossibles ; ce sont les solutions dites de classe II à double isolation ou isolation totale, ou celles rendant l’accès aux masses impossible ; ce sont les mesures d’éloignement ou d’obstacles, ou encore l’utilisation d’une très basse tension de sécurité : solutions de classe III ;
- les solutions acceptant la probabilité de génération de tensions de contact, mais consistant à en limiter la valeur par des règles de liaisons équipotentielles des masses, ainsi que la durée en utilisant des dispositifs automatiques de coupure. C’est le but de la conception des schémas de liaison à la terre (SLT).

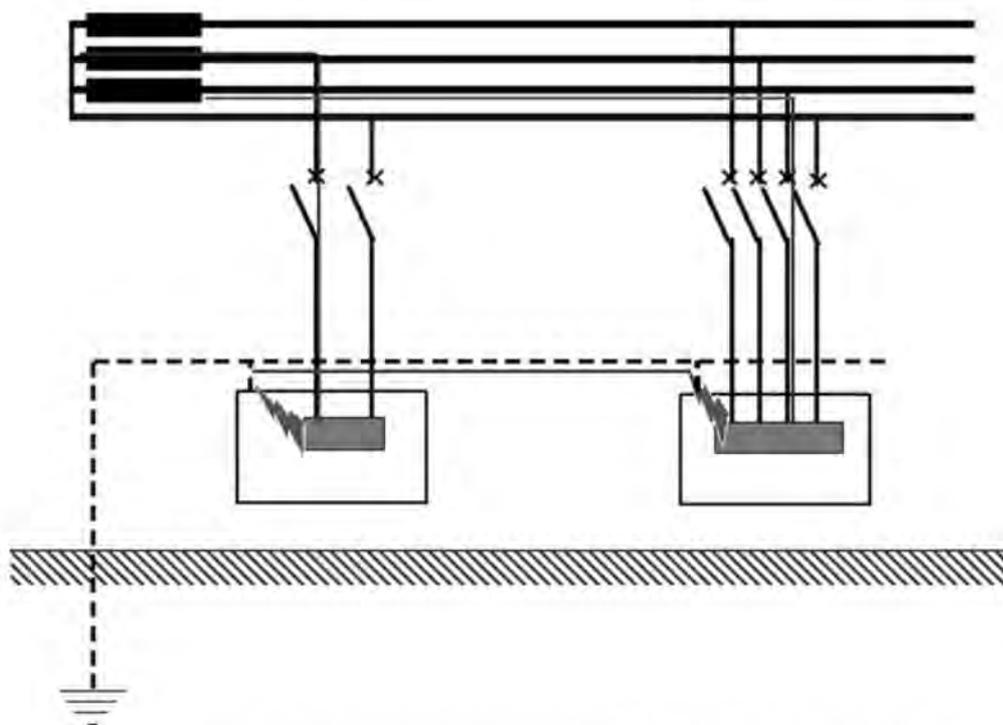


Figure 8.3 – Court-circuit provoqué par un double défaut en « neutre isolé ».

8.2 Principe des schémas de liaison à la terre (SLT)

Le but des schémas de liaison à la terre est de permettre la prévision du parcours des courants de défaut et d'évaluer, avec une précision suffisante, leur grandeur.

Cela permet de définir :

- le type de dispositifs de protection approprié ;
- l'emplacement du montage de ces dispositifs ;
- leur réglage ;
- éventuellement les procédures de surveillance à mettre en œuvre.

■ Règle commune à tous les SLT

Toutes les masses et éléments conducteurs simultanément accessibles doivent être reliés à la terre par l'intermédiaire d'un **conducteur de protection** nommé **PE**.

■ Codification des SLT

Trois configurations de SLT ont été retenues par la normalisation internationale. Elles décrivent la manière selon laquelle le réseau d'une part et le PE d'autre part sont reliés à la terre. La description est réunie dans le **tableau 8.1**.

Tableau 8.1 – Syntaxe des SLT.

Code du SLT	Première lettre	Situation du neutre de la source par rapport à la terre	Deuxième lettre	Méthode de raccordement à la terre du PE
TT	T	Mis à la terre au poste de transformation	T	Relié à une autre terre
TN	T	Mis à la terre au poste de transformation	N	Relié au neutre du poste, lequel est mis à la terre
IT	I	Isolé de la terre	T	Relié à la terre

8.3 Schéma TN dit « mise au neutre »

8.3.1 Fonctionnement du schéma TN

Il faut d'abord se souvenir que le but des SLT est de provoquer le fonctionnement des dispositifs de protection lorsqu'un défaut d'isolement entre un conducteur actif et une masse peut entraîner l'apparition d'une tension de contact dangereuse. Dans le cas du schéma TN, dit « mise au neutre », toutes les masses sont reliées ensemble par l'intermédiaire d'un conducteur de protection nommé PE. Ce conducteur est relié au neutre de la source (transformateur ou groupe), lequel est relié à la terre.

En cas de défaut d'isolement entre une phase et une masse, une situation équivalente à un court-circuit phase-neutre est créée. En principe le courant de défaut ainsi produit provoque le fonctionnement du dispositif de protection contre les courts-circuits (DPCC).

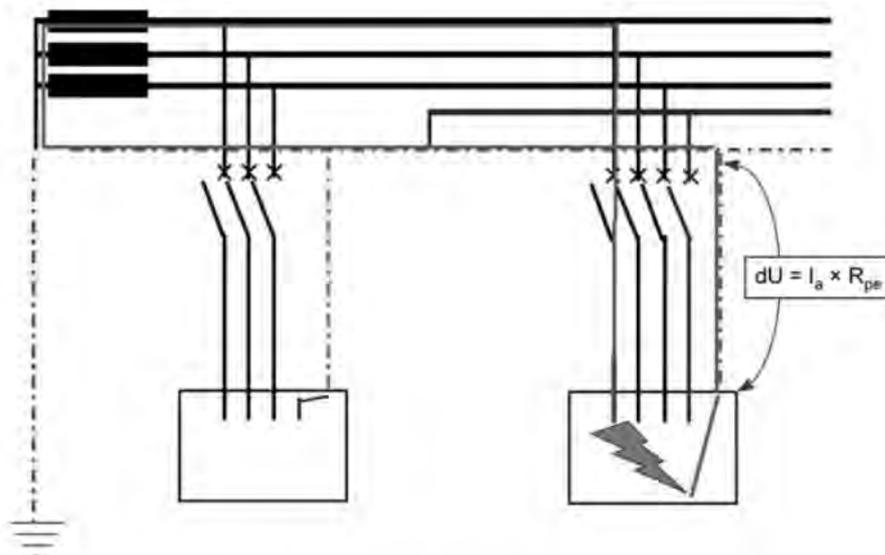


Figure 8.4 – Tension de défaut en schéma TN.

On appelle *impédance de boucle* Z_b , l'impédance totale, incluant celle du transformateur (ou groupe électrogène), du circuit parcouru par un courant de défaut.

La valeur du courant de défaut I_a est égale à (pour un réseau 230/400 V) :

$$I_a = 230/Z_b \quad (8.1)$$

Considérons que le circuit en défaut a pour origine un tableau de distribution dont la barre PE est reliée à la terre – ce qui est la règle – par une liaison équipotentielle supplémentaire. La tension de contact¹ est égale à la chute de tension dans le conducteur de protection pour le courant de défaut I_a :

$$U_c = I_a \times R_{pe} \quad (8.2)$$

- U_c est la tension de contact ;
- I_a , le courant de défaut ;
- R_{pe} , la résistance du conducteur de protection.

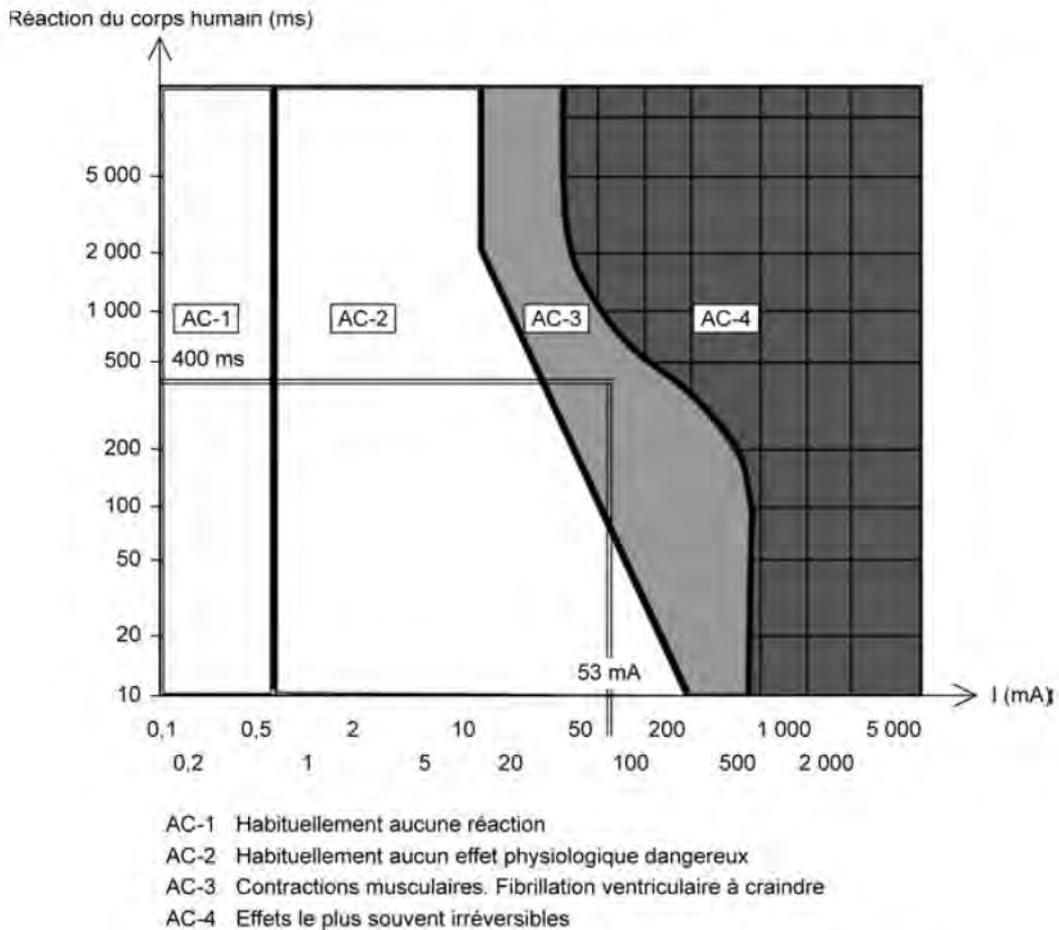


Figure 8.5 – Protection contre les chocs électriques en schéma TN.

Pour un réseau 230/400 V, la tension simple U_0 est de 230 V. Si on considère que le PE a une section moitié de celle des phases, sa résistance sera le double de celle

1. Voir définition en annexe.

des phases. La tension se répartira pour 1/3 sur les phases et 2/3 sur le PE. On aura donc au maximum une tension U_c de $230 \times 2/3$ soit 160 V.

Pour cette tension (voir chapitre 3, figure 3.33) la résistance du corps humain dans un environnement sec est de 3 k Ω . L'intensité pouvant traverser une personne peut donc être de 160/3000 soit 53 mA.

Pour les circuits terminaux, la norme NF C15-100 demande que le dispositif de protection fonctionne en moins de 400 ms (NF C15-100, tableau 41). Selon la **figure 8.5**, on observe que pour ces valeurs de courant et de temps de coupure, le danger se situe dans la zone AC3 qui reste très dangereuse mais non fatale. Si on veut garantir une protection restant dans la zone AC2, un temps de 50 ms est à prendre comme une limite. Cela est facilement assuré par les disjoncteurs en particulier les disjoncteurs terminaux dont le temps de fonctionnement est largement inférieur à cette valeur. Avec des fusibles il serait plus difficile de garantir un fonctionnement en 50 ms, sauf à déclasser celui-ci.

Il est à noter que pour les circuits de distribution (ceux qui, par exemple, alimentent des tableaux de distribution à partir d'un tableau général), seul le temps maximum de protection contre les courts-circuits est requis, c'est-à-dire 5 s (NF C15-100 § 411.3.2.3).

Depuis 1976, date à laquelle la version moderne de la norme NF C15-100 a été éditée, la question du temps de fonctionnement a considérablement évolué, heureusement vers la simplicité.

Dans cette première version, la norme demandait que la tension de contact restât en dessous d'une limite définie par une « **courbe de sécurité** ». Pour satisfaire cette prescription, beaucoup restaient perturbés. Nombre d'organismes de contrôle et d'éditeurs de logiciels s'efforçaient à calculer la tension de contact depuis l'origine de la source. Ce qui bien évidemment devenait absurde, étant donné que chaque tableau doit être relié à la liaison équipotentielle du bâtiment, ce qui porte la barre de terre des tableaux à la référence « zéro ».

8.3.2 Règle du courant minimum

Nous avons vu qu'un défaut d'isolement crée un court-circuit entre phase et le PE. Si ΣZ_b est la somme des impédances entre phase et PE, depuis la source (y compris l'impédance de la source elle-même – transformateur ou groupe) jusqu'à l'extrémité d'un circuit dont on veut analyser la protection, le courant de défaut sera :

$$I_a = 230/Z_b \quad (8.3)$$

Il est imaginable que pour un câble ayant une longueur importante, la valeur Z_b prenne une valeur telle que le courant I_a ne soit plus véritablement un court-circuit, mais un simple courant de surcharge, de 2 à 5 fois le courant d'emploi.

Dans ce cas, si la protection est assurée par un disjoncteur dont le magnétique est réglable, il faudra prévoir un modèle dont le déclencheur magnétique soit ajusté à une valeur inférieure au courant I_a calculé.

L'interprétation usuelle, notamment celle exprimée dans le guide UTE C15-500, tient compte de la plage d'imprécision des magnétiques qui selon la norme est de $\pm 30\%$. Cela conduit à régler les magnétiques à 0,7 fois le courant I_a calculé. On pourrait penser que cette interprétation est abusive surtout si on considère que le temps maximum de fonctionnement est de 5 s pour les circuits de distribution,

temps pris en charge par le déclencheur thermique. Elle conduit parfois à des situations difficiles qui entraînent l'augmentation de la section des câbles de façon déraisonnable.

Il peut apparaître un conflit entre le réglage bas d'un magnétique et une exigence de réglage minimum. C'est le cas d'un circuit devant démarrer un moteur dont le courant de démarrage est de $6 \times I_n$. Dans le cas du schéma TN, cette situation coïncide assez bien avec une chute de tension trop forte au démarrage. Il n'y a d'autre solution que d'augmenter les sections ou d'installer les tableaux d'une autre façon, en rapprochant les tableaux de distribution des moteurs.

8.3.3 Variantes du schéma TN

Dans le schéma TN, le PE est relié au neutre, si le neutre est distribué, on peut imaginer de le confondre avec le PE.

C'est effectivement une première possibilité de configuration : le PE confondu avec le neutre est désigné par **PEN**.

Lorsque le neutre et PE sont confondus, le schéma est désigné par **TN-C**.

Lorsque le neutre et le PE sont séparés, le schéma est désigné par **TN-S**.

Lorsque les deux systèmes de distribution sont utilisés, le schéma est désigné par **TN-C-S**.

■ Notez la notation avec le tiret « - ». En effet, la notation TNS a une autre signification (voir chapitre 9, Mise à la terre des postes de transformation).

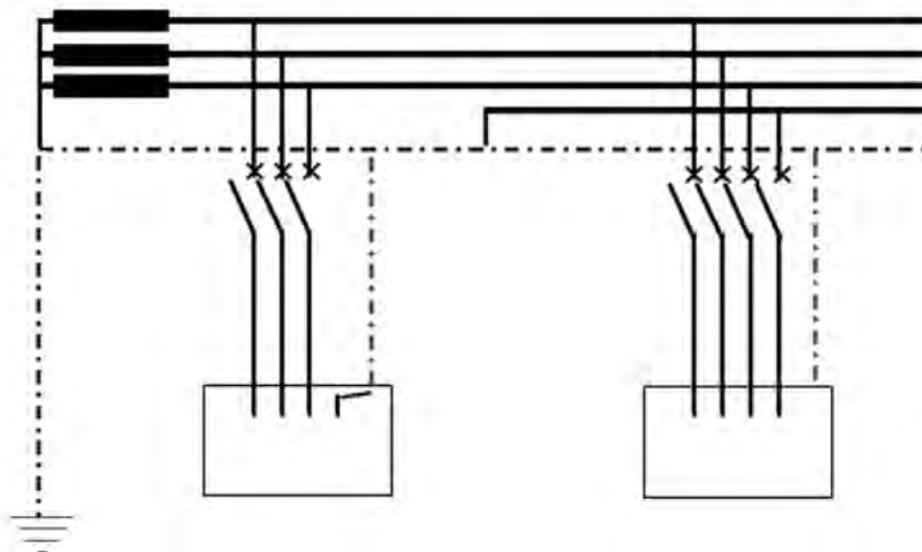


Figure 8.6 – Schéma TN-C – Schéma TN-S.

8.3.4 Variante TN-C du schéma TN

Dans cette variante les conducteurs PE et neutre sont confondus en un seul conducteur désigné par **PEN**.

Le PEN cumule à la fois les règles du conducteur de protection et celles du neutre. En tant que conducteur de protection :

- il doit porter sur toute sa longueur la double coloration jaune et verte ;
- il ne doit jamais être coupé ni par un dispositif de coupure automatique (fusible ou disjoncteur) ou manuel (sectionneur ou interrupteur), ni à la suite de la dépose d'un élément intermédiaire du système de distribution.

En tant que conducteur neutre :

- il doit avoir une section au moins conforme à celles imposées au § 524 de la norme NF C15-100¹ ;
- il ne doit jamais être coupé seul ;
- il doit respecter en outre les règles communes aux PE et neutres : avoir la même origine et conserver le même parcours que les circuits phases.

8.3.5 Protection contre la rupture du PEN

En cas de coupure du PEN, une tension de 230 V peut apparaître si les impédances de charge pour chaque phase sont très différentes !

La coupure du neutre entraîne un grave déséquilibre provoquant une surtension sur les circuits monophasés pouvant porter la tension, normalement de 230, à 400 V. Dans le cas du PEN, les masses étant reliées au PEN seraient instantanément portées à un potentiel pouvant atteindre 230 V.

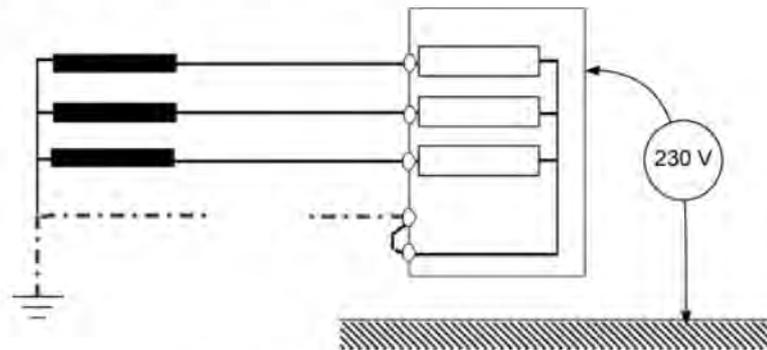


Figure 8.7 – Coupure du PEN.

■ Pour bien comprendre la situation

- La coupure du neutre entraîne une surtension permanente qui va endommager certainement les matériels, mais ne crée pas directement de danger pour les personnes.
- La coupure du PE empêche le fonctionnement correct des dispositifs de protection et de ce fait entraîne l'apparition de tension de contact dangereuse en cas de défaut d'isolement.
- La coupure du PEN, entraîne immédiatement l'apparition d'une surtension permanente sur les masses.

Pour cette raison, le PEN doit être un conducteur traité avec le même soin que les conducteurs de phases.

1. Voir chapitre 11, § 11.2, *Calcul des sections de câbles*.

La norme NF C15-100 impose que la section minimale du PEN soit de 10 mm^2 cuivre ou 16 mm^2 aluminium. De plus, le schéma TN-C n'est pas utilisable pour des connexions amovibles sur prises de courant par exemple.

8.3.6 Variante TN-S du schéma TN

Dans cette variante les conducteurs PE et neutre sont distribués séparément. Le neutre a conventionnellement la couleur bleue, le PE a obligatoirement la double coloration jaune et verte.

Quitte à choquer nombre de lecteurs, de même que les autres SLT, le schéma TN-S peut très bien exister sans que le neutre soit distribué. Dans ce cas le PE n'obéit qu'aux règles du PE et non à celles du neutre. Il est donc important que dans les dossiers techniques et étiquettes d'identification des tableaux, la cohérence soit parfaite entre la description de la tension du réseau : l'indication $U_n = 230/400 \text{ V}$ signifie que le neutre est distribué. Le marquage PEN sur une borne ou un schéma signifie que le neutre est utilisé ou utilisable et qu'il est confondu avec le PE.

En aucun cas, un réseau TN sans conducteur neutre doit être automatiquement assimilé à un schéma TN-C.

8.3.7 Fonctionnement du schéma TN-S

En cas de défaut phase-neutre, le neutre n'est protégé que par les dispositifs de protections des phases. De plus, pour assurer la fonction de sectionnement, certains pays ne demandent pas de coupure du neutre, étant donné que celui-ci est relié à la terre.

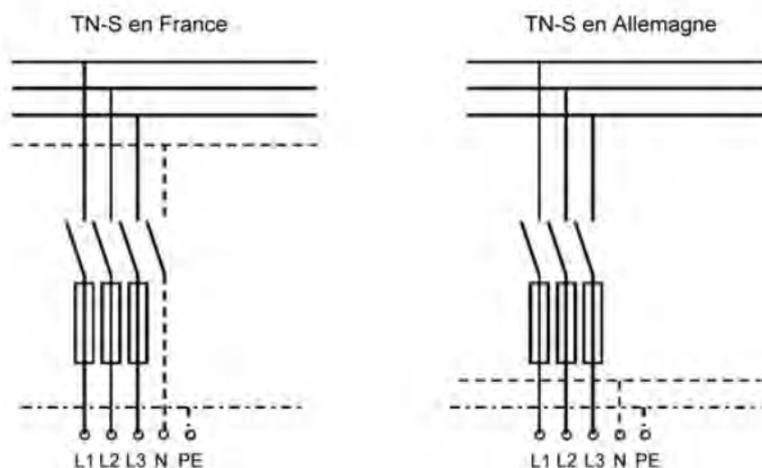


Figure 8.8 – Exemples d'interrupteurs fusibles en schémas TN-S en France et en Allemagne.

En France et également dans quelques autres pays, tels la Belgique ou l'Italie, le neutre doit être séparé simultanément avec les phases par la fonction de sectionnement, tandis que les fonctions de protection contre les surcharges et courts-circuits ne sont requises que pour les phases. On qualifie le plus souvent ces appareils « 3ph+N ».

Cependant, si le neutre a une section inférieure à celle des phases, celui-ci peut être en difficulté thermique, en raison de déséquilibre ou de présence de courants harmoniques importants. Dans ces éventualités, le concepteur du réseau doit décider d'opter pour des dispositifs 4P (quatre pôles protégés). Le pôle neutre peut être protégé pour une valeur de 50 %, 60 % ou 100 % de la valeur de réglage des phases.

8.3.8 Cohabitation schéma TN-C et TN-S

La règle est : « Dans une installation réalisée en schéma TN-C, on peut à tout endroit réaliser une dérivation en schéma TN-S. L'inverse est interdit. »

Lorsqu'une installation comprend ces deux variantes, le SLT est appelé TN-C-S. Il faut retenir que le schéma TN-S est obligatoire pour les sections inférieures à 10 mm^2 Cu ou 16 mm^2 Al, ainsi que pour les dérivations amovibles. D'une manière générale, il convient de retenir que :

- le schéma TN-C est un schéma de distribution de l'énergie vers des ensembles (bâtiments, étages, zones de production, etc.) ;
- le schéma TN-S est un schéma d'utilisation de l'énergie (distribution terminale, équipements de machines, etc.).

8.3.9 Réalisation pratique du schéma TN-C-S

Donnons-nous pour objectif de réaliser un tableau de distribution dont l'arrivée est réalisée en schéma TN-C, et dont certains départs sont en schéma TN-C et d'autres en schéma TN-S. Deux solutions de dispositions de jeux de barres sont pratiquées :

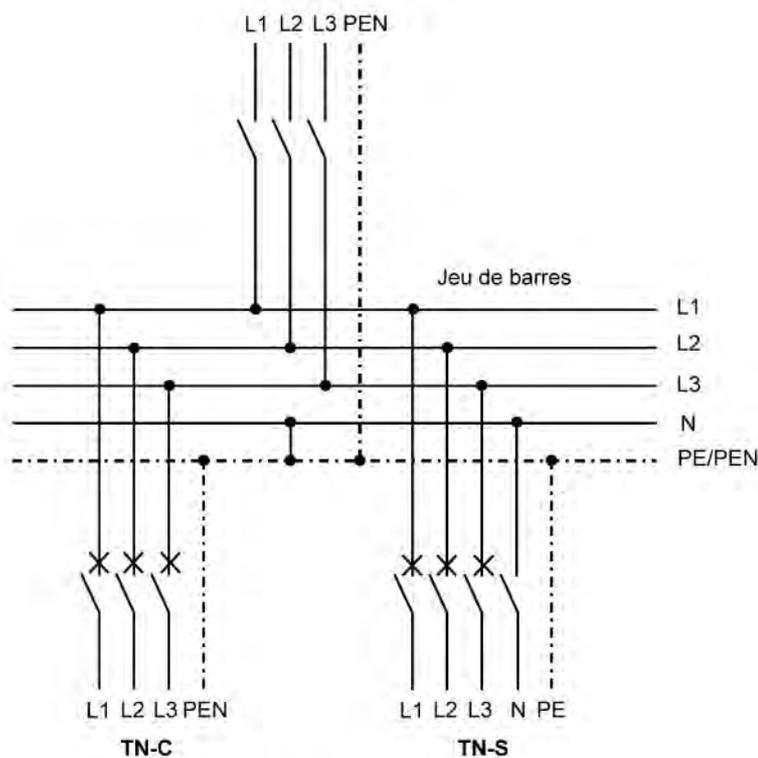


Figure 8.9 – Schéma TN-C-S avec jeu de 5 barres.

- La **première solution** utilise un jeu de 5 barres (**figure 8.9**) : 3 barres de phases, 1 barre de neutre et une barre cumulant le double rôle de PE et de PEN. Le PEN d'arrivée est raccordé à la barre PE/PEN. Une connexion entre cette barre et celle du neutre est établie. En France cette connexion peut se faire directement sur le jeu de barres par un shunt bleu. D'autres pays requièrent d'installer ce shunt à côté de l'interrupteur d'arrivée. Cette disposition à 5 conducteurs est utilisée principalement dans les tableaux ou les canalisations préfabriquées de distribution.
- La **seconde solution** utilise un jeu de 4 barres (**figure 8.10**). La barre PEN est utilisée pour raccorder les trois possibilités de conducteurs : PEN pour les départs TN-C, N et PE pour les départs TN-S avec neutre, ou encore PE pour les départs triphasés sans neutre. Ce type de distribution est utilisé dans les tableaux généraux ou les canalisations préfabriquées de transport.

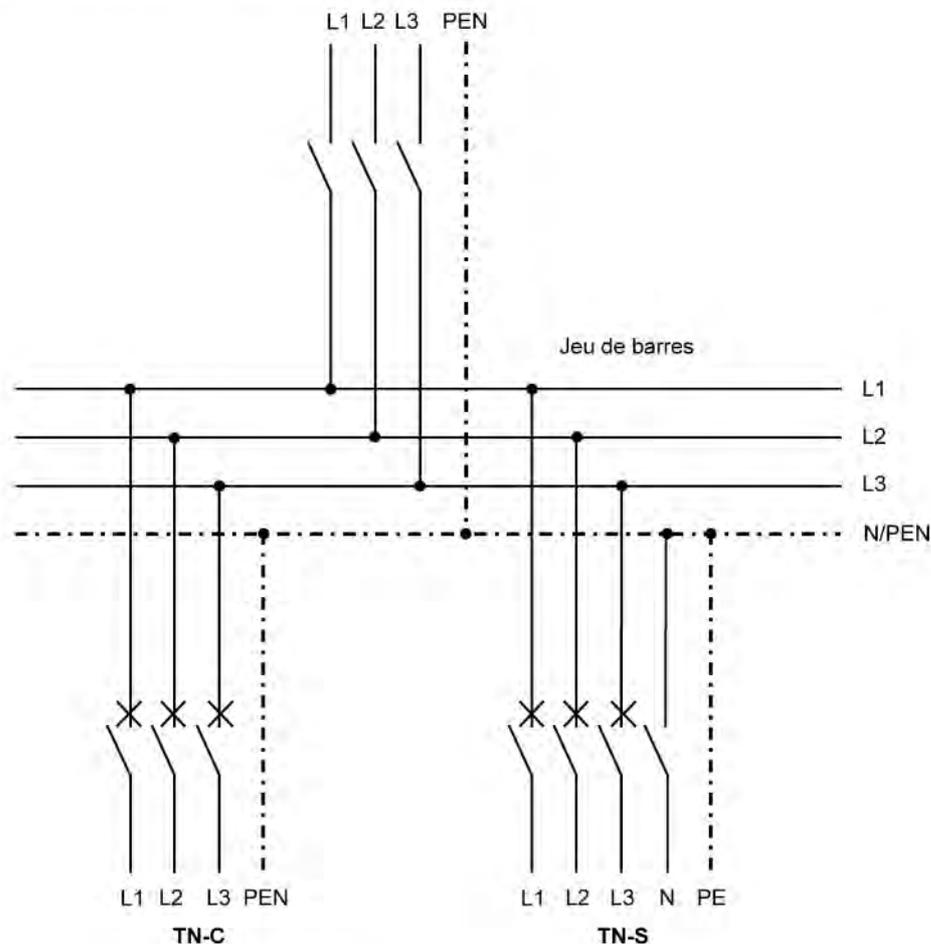


Figure 8.10 – Schéma TN-C-S avec jeu de 4 barres.

Il existe une possibilité intermédiaire, utilisée dans les tableaux type ensembles de série fixes ou débroschables comportant des colonnes de départs. Le jeu de barres principal, en général horizontal, comporte 4 barres (3ph + PEN), les jeux de barres de distribution des colonnes sont en système 5 conducteurs (3ph + N + PE). La barre PE est en général logée dans le caisson de raccordement.

8.4 Schéma TT dit « neutre à la terre »

Comme la syntaxe de son appellation l'explique, dans le schéma TT, le neutre de la source est relié à la terre, tandis que les masses sont reliées à une autre terre par l'intermédiaire du conducteur de protection.

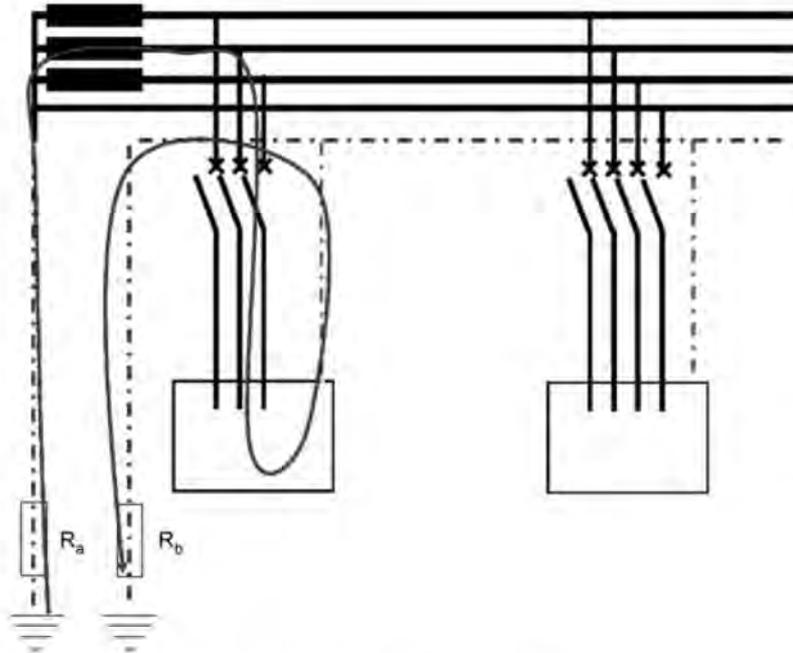


Figure 8.11 – Principe du schéma TT.

En cas de défaut d'isolement, un courant de circulation se produit, passant par les deux prises de terre, dont les résistances sont R_a et R_b . La valeur de celles-ci est au mieux de quelques ohms, plus probablement voisine de quelques dizaines d'ohms. Alors que la résistance des conducteurs s'exprime en $m\Omega$, on peut donc négliger sa valeur devant celle des résistances de terre et écrire que le courant de défaut est égal à :

$$I_a = \frac{U_0}{R_a + R_b} \quad (8.4)$$

Prenons pour hypothèse une excellente valeur de $R_a + R_b$ de 23Ω . La valeur de I_a serait de $230/23$ soit 10 A . On comprend qu'un départ de 60 A , protégé par un disjoncteur ou fusible de 60 A , ne pourra pas éliminer par coupure automatique un courant de défaut. Un dispositif sensible au « courant résiduel » devra être utilisé.

En partie B, une description détaillée est donnée sur le fonctionnement des dispositifs différentiels résiduels¹.

1. Voir partie B, chapitre 3, § 3.5.

Remarquons que lorsqu'un défaut d'isolement de valeur Ia se produit, il apparaît une tension entre la masse et la terre de valeur égale à $Uc = Rb \times Ia$. Supposons que dans le cas de notre exemple, la valeur de Rb soit de 13Ω , celle de Ra , de 10Ω . Le courant de défaut reste de 10 A , la valeur de Uc est alors de 130 V . Cette tension appelée « tension de contact » apparaît entre la masse en défaut et toute masse et élément conducteur simultanément accessible par une personne. Une tension de contact jugée non grave, en milieu sec et faiblement conducteur doit être inférieure ou égale à 50 V en courant alternatif. En conséquence, le seuil maximal de déclenchement du dispositif DR doit être de :

$$I\Delta n \leq \frac{50}{Rb} \quad (8.5)$$

Il convient également de retenir que toutes les masses simultanément accessibles doivent être reliées par un même conducteur de protection. On pourrait, en revanche, imaginer que, puisqu'en schéma TT, les courants de défaut pouvant parcourir le conducteur PE sont faibles, la section de ces conducteurs pourrait être réduite, de même que l'obligation d'avoir le même parcours que les conducteurs actifs pourrait être allégée. La norme NF C15-100 évoque cette possibilité en permettant de limiter la section du PE à 25 mm^2 cuivre ou 35 mm^2 aluminium. Il est permis également que les structures métalliques soient utilisées pour ce conducteur.

En tout état de cause, le schéma TT reste une bonne solution pour réhabiliter et protéger une installation en bon état, mais dont les parcours, sections et longueurs des conducteurs de protection sont mal connus.

■ Le schéma TT est-il imposé pour les abonnés basse tension ?

Oui, en France, pour les contrats d'abonnés de faible puissance. Mais pour certains abonnés de plus forte puissance, le distributeur d'énergie a le devoir, tant qu'il lui est possible, de donner les caractéristiques du réseau (impédance et chute de tension) au point de livraison. Il est donc tout à fait possible de réaliser, grâce à ces informations, une installation en schéma TN-S. Cela dit, il faut noter que la situation n'a pas de fondement technique. Nombre de pays (Allemagne, Suisse...) distribuent l'énergie aux particuliers en mise au neutre TN-S, neutre non coupé.

8.5 Schéma IT dit « neutre isolé »

Dans ce schéma, le neutre de la source est isolé de la terre, éventuellement, pour des raisons de mesure, relié par l'intermédiaire d'une impédance élevée (de l'ordre du $\text{k}\Omega$). Bien entendu, toutes les masses simultanément accessibles sont reliées entre elles par un conducteur de protection lui-même relié à la terre.

■ Premier défaut

Dans ces conditions, lorsqu'un défaut d'isolement met en contact un conducteur actif et une masse, un faible courant de défaut s'établit, en se refermant sur l'impédance Z indiquée dans la **figure 8.12**.

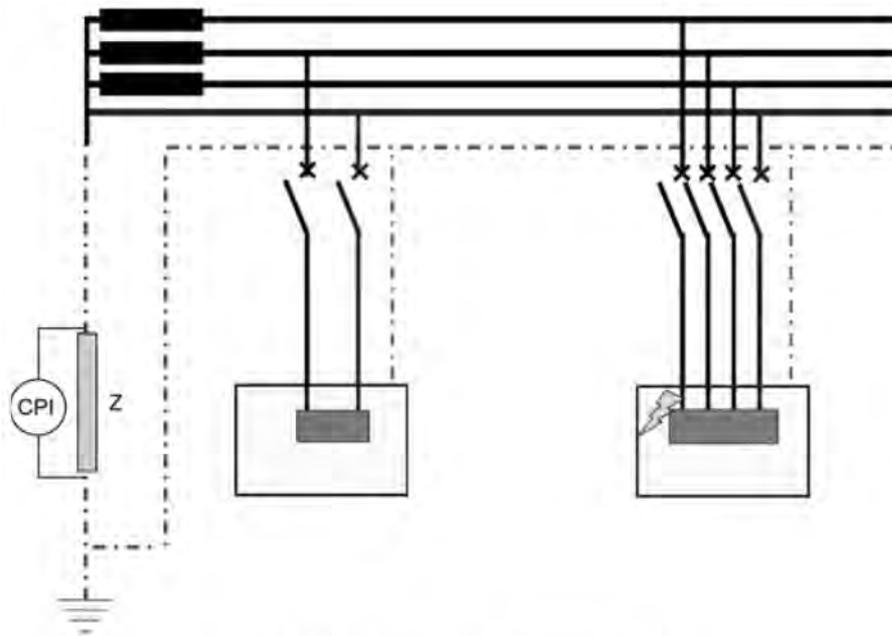


Figure 8.12 – Schéma IT en premier défaut.

Dans cette situation aucune tension de contact dangereuse ne s'établit. Il n'est pas nécessaire de séparer le circuit en défaut de sa source. Malgré cela, des inconvénients assez préoccupants apparaissent :

- Ainsi que nous l'avons développé au chapitre 3, § 3.6, les appareils monophasés de tension d'utilisation 230 V, ont leur phase portée à 400 V par rapport à la terre. Si des filtres sont installés entre phase et terre, ceux-ci sont soumis à cette tension.
- En cas de coup de foudre, le conducteur mis accidentellement à la terre shuntera les parafoudres.
- Enfin la boucle de défaut fortement impédante représente une antenne efficace pour la réception de champs magnétiques.

Pour ces raisons, la réglementation (décret du 14-11-88) impose qu'un service entretien puisse intervenir dans les meilleurs délais pour éliminer le défaut. Pour ce faire, il faut détecter et signaler la présence d'un défaut, c'est le rôle d'un contrôleur permanent d'isolement, puis le localiser, c'est le rôle des dispositifs de recherche de défaut.

Leur principe de fonctionnement est développé au chapitre 3, § 3.6.

■ Deuxième défaut

On appelle « deuxième défaut », un défaut d'isolement impliquant une phase différente de celle du « premier défaut ». Il faut admettre l'idée qu'une même phase peut être le siège de plusieurs « premiers défauts ». Cette situation sera évoquée plus loin.

En condition d'un double défaut, un courant de court-circuit s'établit. Il implique une double boucle de défaut, phase-PE ou neutre-PE, que nous nommerons Zb_1 et Zb_2 .

Le courant de défaut est alors égal à :

$$I_a = \frac{U_0}{(Zb_1 + Zb_2)} \quad (8.6)$$

La **figure 8.13** montre que chaque circuit présente deux impédances de boucle : phase(s) – PE et neutre – PE. La norme NF C15-100 propose de considérer pour chaque circuit un courant de défaut égal à :

$$I_a = 0,5 \cdot \frac{U_0}{Z_s}$$

ou lorsque le neutre est distribué :

$$I_a = 0,5 \cdot \frac{U_0}{Z_s'} \quad (8.7)$$

où :

- Z_s est l'impédance de boucle de défaut phase-PE ;
- Z_s' est l'impédance de boucle de défaut neutre-PE.

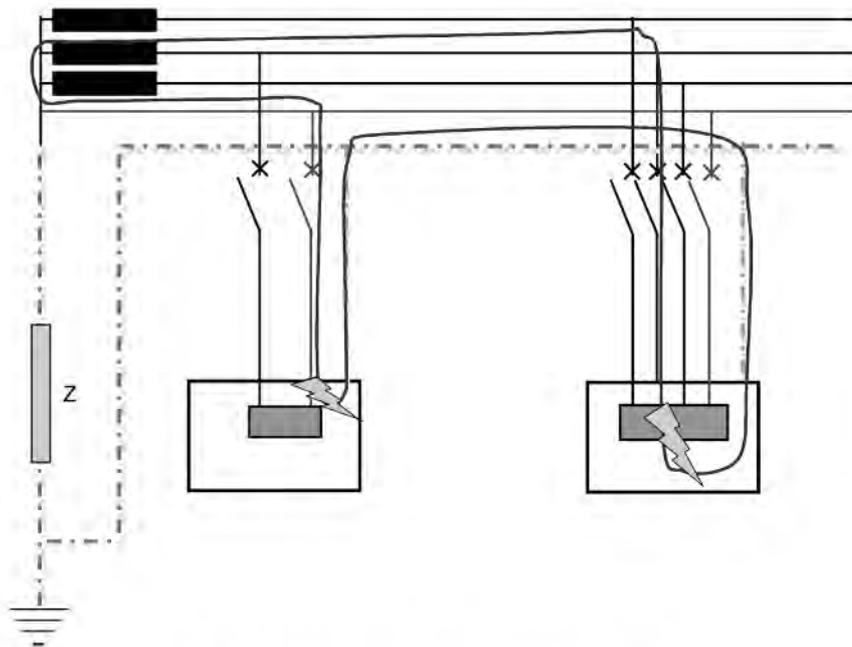


Figure 8.13 – Double défaut en schéma IT.

Les dispositifs de protection doivent fonctionner en un temps inférieur à 400 ms pour le courant I_a ; c'est le cas des déclencheurs magnétiques nommés plus justement « à court retard ». Il convient de rappeler que selon la norme NF C15-100, cette règle est applicable aux circuits terminaux¹. Pour les circuits de distribution le temps admissible est de 5 s.

1. NF C15-100 § 411.3.2.2 et 3.2.3.

■ Observations

Comme l'illustre la **figure 8.13**, lorsque le neutre est impliqué dans un double défaut, il n'est pas protégé par les dispositifs de protection des phases du même circuit. Il convient donc de prévoir une protection sur ce conducteur. Toutefois, le neutre ne doit pas être coupé individuellement, ce qui entraînerait un fort déséquilibre et provoquerait de fortes surtensions¹. **La détection d'un défaut sur le neutre doit donc entraîner la coupure simultanée de tous les conducteurs actifs.** Dans la pratique on utilise des disjoncteurs tétrapolaires pour les circuits utilisant le neutre.

Lorsqu'un circuit comporte un neutre réduit, l'impédance Z_s' est supérieure à Z_s . On peut donc envisager de régler tous les déclencheurs à court retard à la valeur $0,5 \times 230/Z_s'$, ou si le disjoncteur le permet, seulement celui du neutre à cette valeur. Les déclencheurs des phases étant réglés sur la base de Z_s .

Lors d'un double défaut, en principe le circuit de plus faible intensité fonctionnera, bien qu'aucune sélectivité ne soit certaine entre les deux appareils impliqués dans les deux défauts.

On peut imaginer que plusieurs « premiers défauts » existent. Lors de l'apparition du second défaut sur une autre phase, le courant de défaut se répartira sur tous les départs « en premier défaut ». Il n'est pas alors certain que ce soit le disjoncteur de plus faible calibre qui déclenchera. Dans le cas de la **figure 8.14**, il est probable que le disjoncteur 32 A déclenche le premier, bien que cela dépende de la longueur des conducteurs.

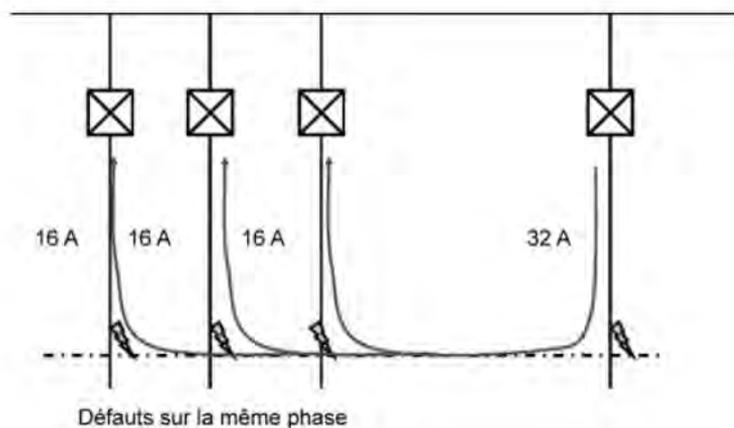


Figure 8.14 – Cas d'un deuxième défaut après plusieurs « premiers défauts ».

Comme en schéma TN, il n'est pas évident que les défauts d'isolement soient « parfaits », sans arc ni résistance. Pourtant ils peuvent survenir, par exemple, à l'intérieur d'un moteur. Dans ce cas les dispositifs de protection contre les courts-circuits peuvent ne pas fonctionner. Imaginons que ce soit le cas pour le départ 32 A de la **figure 8.14**, aucun des disjoncteurs ne risque de fonctionner. Le courant de

1. Voir partie B, chapitre 3, § 3.6, *Protection contre les surtensions*.

circulation sera, sinon permanent, du moins persistant pour une durée inacceptable, créant échauffements et perturbations multiples.

8.6 Choix du SLT

Ce thème a nourri beaucoup de littérature, tendant souvent, de la part des fabricants à l'orienter nettement dans un objectif de promotion de produits.

Les arguments avancés favorisent de façon catégorique le schéma IT lorsque la continuité de service est souhaitée. Sachant que le schéma IT est inconnu en Allemagne, au Royaume-Uni, aux États-Unis..., il ne semble pas que les grands établissements industriels ou tertiaires dans ces pays soient en difficulté de continuité de service.

Le schéma TN a été craint et déconseillé parce qu'il provoque un court-circuit en cas de défaut à la terre. C'était ignorer que les défauts entre conducteurs actifs sont tout autant probables, provoquant le même résultat. L'avantage du schéma TN est qu'il provoque le déclenchement du dispositif de protection contre les courts-circuits directement en amont du défaut. La recherche de ce dernier est donc simple et rapide, sans appareils compliqués et coûteux.

Le schéma TT, en dehors des installations domestiques, est souvent un schéma TN-S dont la maîtrise de l'installation du PE n'est pas assurée. Des dispositifs différentiels résiduels sont alors utiles. Comme les courants de défaut ne mettent pas en jeu les résistances de prise de terre, le seuil de fonctionnement de ces dispositifs peut avoir une valeur élevée, facilitant de ce fait les problèmes de sélectivité.

Lorsque l'installation comporte une cohabitation fréquente des câbles puissance et des réseaux de données, le schéma TN-C n'est pas souhaitable. En effet le PEN ne peut pas, en principe, servir de référence pour les liaisons équipotentielles des blindages des liaisons de données. Le schéma TN-S est certainement le meilleur schéma à appliquer pour des zones d'exploitation où une concentration d'appareils électronique est importante. C'est le cas des salles de soins dans les hôpitaux, des salles de bureaux, également les grands ateliers de fabrication discontinue tels qu'en industrie de l'automobile ou de mécanique. Le schéma TN-C doit être réservé au transport d'énergie vers les systèmes de distribution (tableaux ou canalisations préfabriquées).

En partie B, les domaines d'application du schéma IT et des contrôleurs d'isolement, sont expliqués. En résumé, un premier défaut devrait permettre de terminer un cycle de production discontinue, mais empêcher le démarrage d'un nouveau cycle. En processus continu, l'exploitant doit prévoir l'installation de matériels d'investigation et se doter de personnels ayant les qualifications et les moyens de détecter rapidement les premiers défauts et de les éliminer.

8.7 Schéma IT dans les salles d'opération

Dans les hôpitaux, les salles d'opération sont alimentées par un transformateur de séparation de sécurité muni d'écran de blindage. Ce transformateur est alimenté par

le réseau (transformateur secouru par groupe) ou par un onduleur local constamment en service, éliminant le risque de coupures fugitives.

Le secondaire de ce transformateur est dédié exclusivement à l'alimentation d'une seule salle d'opération. Le réseau constitué est isolé de la terre. Il s'agirait d'un schéma IT. Toutefois il est spécifié que le réseau d'équipotentialité auquel toutes les masses sont raccordées ne doit pas, lui non plus, être relié à la terre. Il s'agirait alors, selon la syntaxe admise, d'un schéma II (isolé/isolé). Un contrôleur d'isolement spécifique est installé, avec un moniteur d'alerte à portée de vue et d'écoute du chirurgien. Celui-ci peut décider de poursuivre son intervention, mais en général, décidera de ne pas en commencer une autre.

Une mauvaise interprétation de cette règle applicable aux seules salles d'opérations a transmis l'idée que les installations pour hôpitaux doivent être traitées en schéma IT.

8.8 Schéma IT pour les circuits de sécurité dans les établissements recevant du public (ERP)

Les règles sont issues du livre *La sécurité incendie dans les établissements recevant du public*. Ce livre est souvent mis à jour.

Les directives de ce règlement, concernant l'alimentation des dispositifs de sécurité se résument dans leur principe de la manière suivante :

- Les dispositifs de sécurité sont essentiellement les dispositifs de désenfumage. L'éclairage de sécurité doit avoir une alimentation autonome par batteries.
- Les circuits d'alimentations de ces dispositifs doivent être conçus de telle façon qu'ils ne soient pas affectés par la défaillance d'autres circuits et qu'eux-mêmes, en cas de défaillance, n'aient pas d'influence sur le fonctionnement d'autres circuits (livre 1, article EL16).

Ce principe a pour conséquences que les canalisations dédiées à ces applications doivent être séparées de toute zone, objets ou parties d'installation qui seraient susceptibles de propager un incendie. Tout défaut d'isolement, court-circuit... à quelque endroit que ce soit ne doit pas diminuer la sûreté de fonctionnement de tels dispositifs.

La réponse habituelle est de traiter ces circuits en schéma IT. C'est une mauvaise réponse car un premier défaut influence la sûreté de fonctionnement des dispositifs de sécurité, ce qui est en contradiction avec le règlement. Un transformateur de séparation alimentant l'ensemble des récepteurs liés à la sécurité, apporte l'avantage de dissocier complètement les « circuits communs » des circuits de sécurité. Concevoir le réseau ainsi, créé en schéma IT est loin d'apporter la réponse certaine à la fiabilité recherchée, en effet le contrôleur d'isolement ne surveille que les appareils en service. Ceux, à l'arrêt ne sont pas surveillés. Un compromis serait de conserver une phase connectée aux moteurs d'extracteurs de désenfumage. Dans ce cas, le CPI détecterait un éventuel défaut d'isolement, moteur à l'arrêt. Une solution plus radicale est de doter ces moteurs d'un CPI individuel, mis en service à l'arrêt, donnant de suite une alerte et identifiant automatiquement son origine.

8.9 Mise à la terre des postes de transformation

Nous avons vu les différentes configurations d'un réseau à basse tension selon leur schéma de liaison à la terre (SLT). Cette description ne prenait en compte que les circuits actifs du réseau et les masses des récepteurs. Ce qui suit tient en ligne de compte la situation des postes de transformation eux-mêmes par rapport à la terre. L'objectif est de connaître quelle influence sur le réseau peut avoir une surtension provenant de la haute tension.

La norme NF C15-100 définit les différentes méthodes de liaison à la terre du neutre du réseau, des masses de l'installation et du poste de transformation. Certaines de ces méthodes de mise à la terre sont de fait imposées par le mode de pose du poste, (exemple postes sur poteaux). En cas de défaut d'isolement entre la HT et la BT, ou en cas de foudre sur le réseau HT, des surtensions vont apparaître, ayant les valeurs indiquées à la **figure 8.15** (voir également partie B, chapitre 3, § 3.6, *Protection contre les surtensions*).

Sept schémas de liaison à la terre des postes de transformation sont proposés par la norme NF C15-100. Ils sont codifiés par trois lettres. Les deux premières reprennent les définitions des SLT expliqués précédemment. La troisième lettre est :

- « S » si le poste est relié à la terre autre que celle du réseau BT ;
- « R » si toutes les masses du réseau et du poste sont reliées à la même terre ;
- « N » si les mises à la terre du poste et du transformateur sont communes, mais indépendantes de la terre des masses des récepteurs BT.

La **figure 8.15** présente le schéma de ces configurations. Elle indique la valeur des surtensions de défaut en présence de défaut d'isolement sur la partie haute tension.

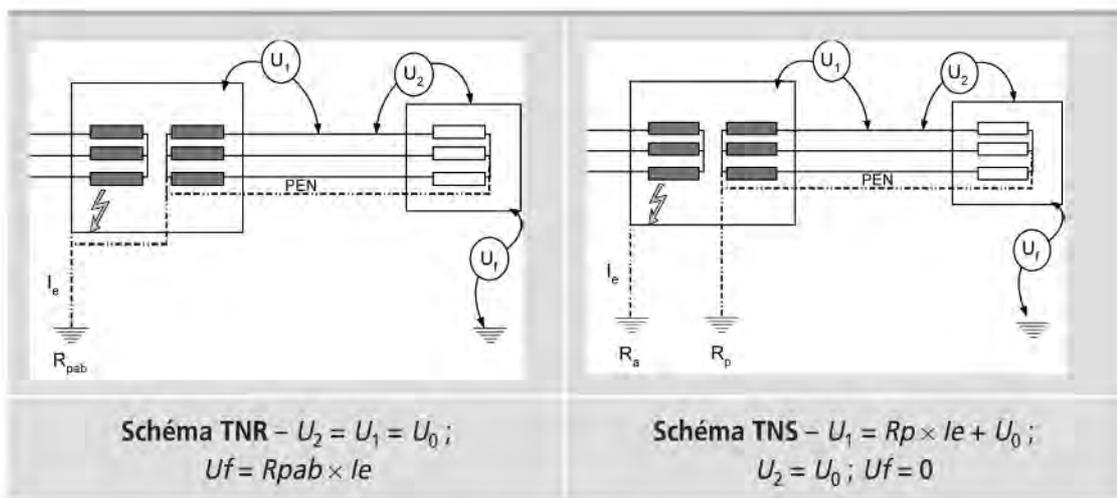


Figure 8.15 – Schémas de mise à la terre des postes de transformation.

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le
 © Dunod - La photocopie non autorisée est un délit de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus
 aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

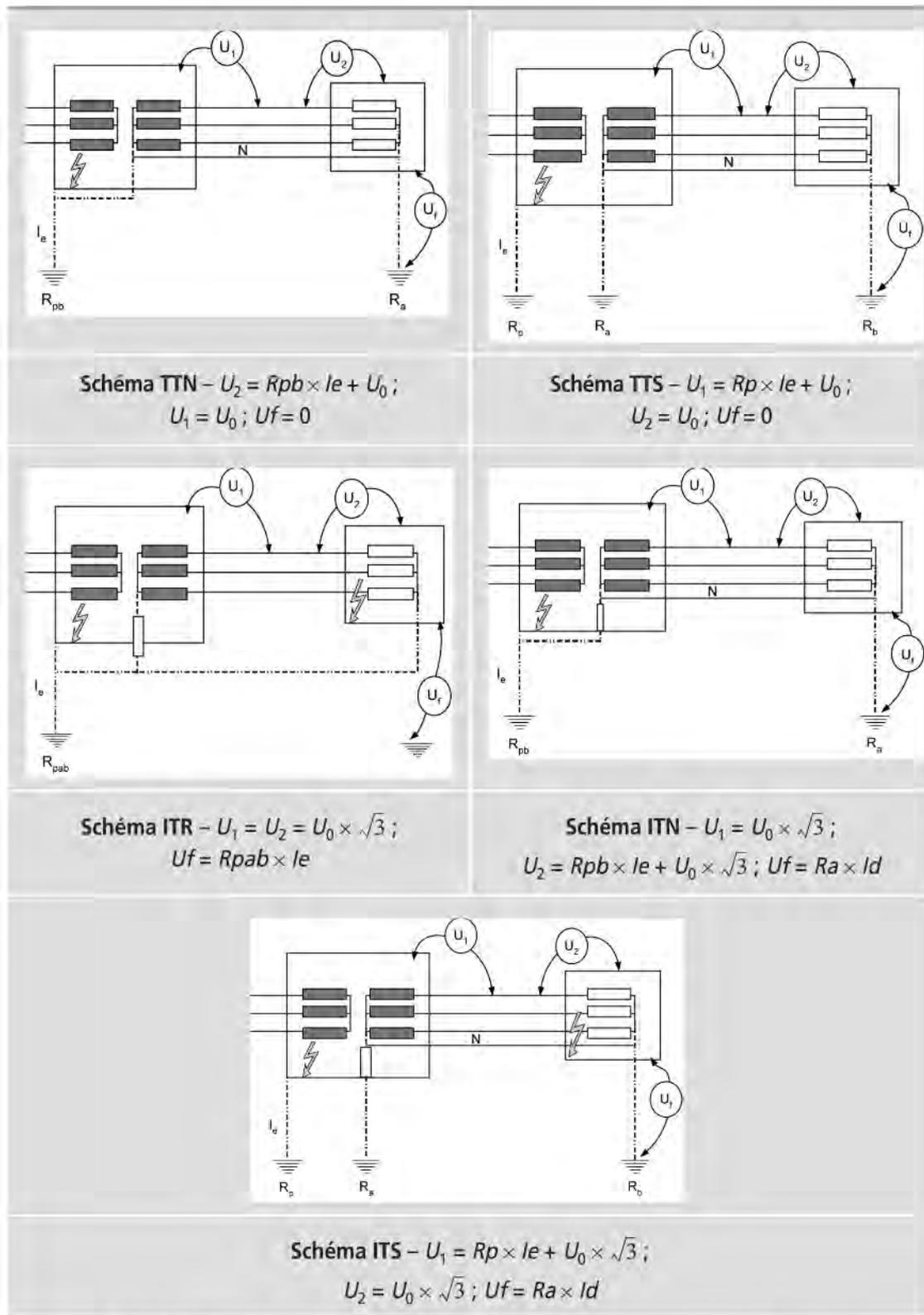


Figure 8.15 – Schémas de mise à la terre des postes de transformation. (Suite)

9 • CONDUCTEURS PE, LE ET TE

9.1 Utilité des mises à la terre

Les mises à la terre sont préconisées dans le but de procurer trois types de protection :

- **Protection des personnes contre un danger d'électrocution** : les masses (c'est-à-dire les parties métalliques accessibles pouvant être mises sous tension par défaut d'isolement) doivent être reliées au potentiel de la terre avec une résistance suffisamment faible pour que la tension résiduelle ne soit pas dangereuse.
- **Protection des personnes et des matériels contre les surtensions d'origine externe** : en cas de forte surtension due à la foudre, à la réaction d'un appareil industriel, à un défaut d'isolement entre la partie haute tension et basse tension, il est indispensable de relier entre elles, toutes les parties métalliques, y compris celles du bâtiment.
- **Protection des matériels électroniques contre les perturbations « électromagnétiques »** : lorsque des matériels comportent des ensembles électroniques, ceux-ci peuvent être perturbés par des « tensions parasites » ou des champs magnétiques ou électriques voisins. Les systèmes électroniques doivent être protégés par des écrans ou « blindages » qui doivent être reliés à la terre.

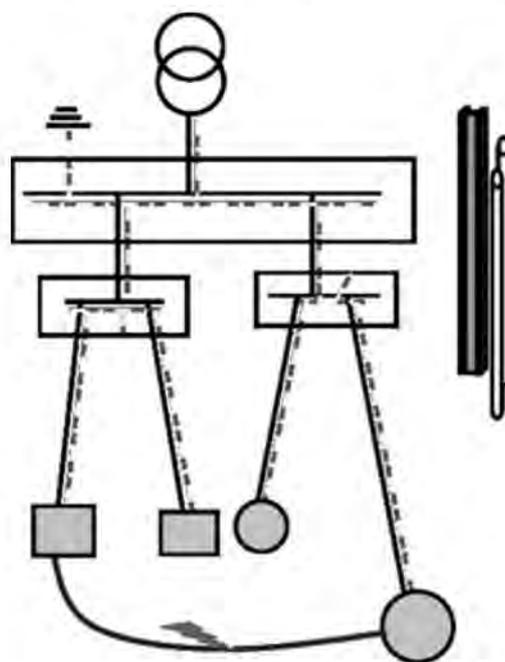


Figure 9.1 – En cas de défaut, il peut apparaître une tension dépassant 100 V.

Ces dispositions ne sont certes pas suffisantes, mais elles sont incontournables. Sans elles les dispositifs de protection seraient inefficaces.

■ Conducteurs de protection « PE »

Les **conducteurs de protection « PE »** (pour *Protection Earthing*) ont pour rôle de relier les masses à un même « conducteur de protection principal ». Leur fonction est d'assurer qu'entre deux masses, ou entre une masse et la terre, une tension non dangereuse n'apparaisse compte tenu du temps de fonctionnement des dispositifs automatiques de protection. Cette tension est nommée **tension de contact**. Dans la pratique (et pour simplifier) cette tension ne peut dépasser environ 120 V pendant le temps de fonctionnement de ces dispositifs.

Toutefois si on admet que le corps humain peut supporter une centaine de volts pendant quelques millisecondes, ce choc électrique peut provoquer des réflexes dont les conséquences peuvent être fâcheuses.

D'autre part imaginons qu'un câble de liaison de bus de données informatiques relie deux machines dont les masses peuvent être portées à 120 V, on admettra facilement qu'il se formera le long du blindage de ce câble un courant élevé qui le portera à la fusion et générera par induction une tension destructrice.

■ Liaison équipotentielle « LE »

Pour pallier ces effets malheureux, on installe une **liaison équipotentielle « LE »** entre les masses et éléments conducteurs simultanément accessibles.

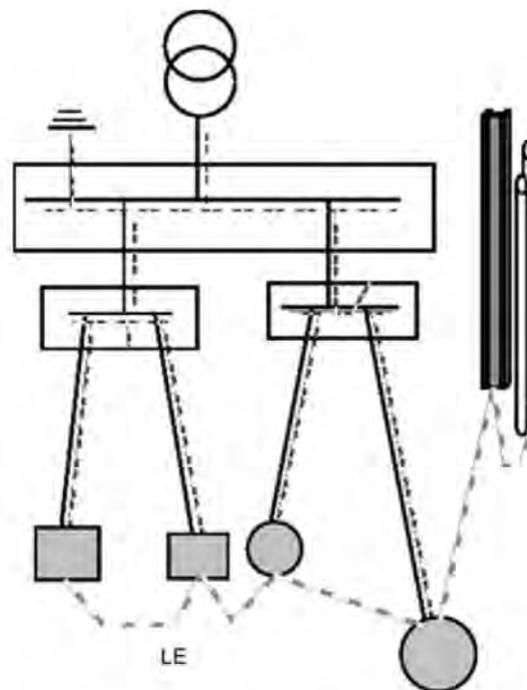


Figure 9.2 – Une liaison équipotentielle réduit considérablement les tensions de contacts entre masses voisines.

■ Terre électronique « TE »

La **terre électronique « TE »** est une prise de terre et son réseau de conducteurs qui ne seraient réservés qu'aux circuits électroniques ; baies d'ordinateurs, par exemple.

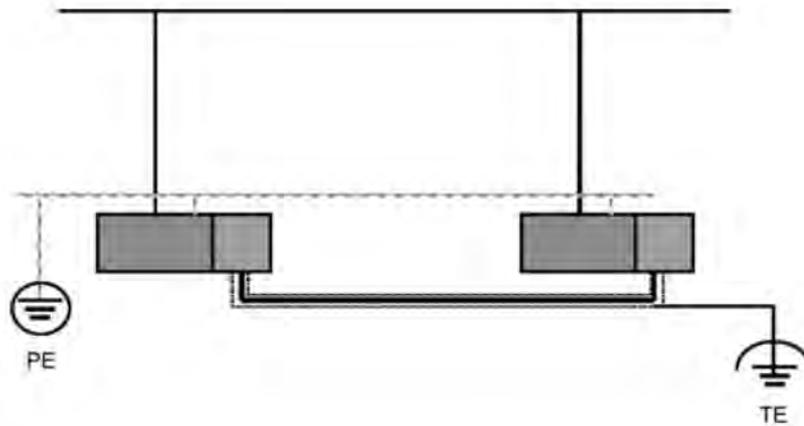


Figure 9.3 – Les blindages sont raccordés à une terre séparée TE.

Cette technique consistant à séparer les terres électroniques (dites « propres ») des conducteurs PE, a été introduite dans les années 1980. Son intention était de ne pas perturber les circuits électroniques par des courants de défaut qui peuvent traverser les conducteurs PE. Cette disposition était efficace tant que les systèmes électroniques ne traitaient que des fréquences basses. Mais elle n'est plus d'actualité, étant donné que maintenant ces systèmes traitent des informations à des fréquences pouvant atteindre plusieurs centaines de MHz.

9.2 Différentes liaisons équipotentielles

Une liaison équipotentielle consiste à relier des masses et éléments conducteurs par une connexion dont l'impédance est la plus faible possible.

Cette liaison peut avoir pour but :

- d'améliorer la sécurité électrique contre les risques de tension de contact trop élevée ;
- de diminuer le risque de propagation des surtensions provoquées par des orages ou des manœuvres ;
- de diminuer les risques de perturbations des lignes de communications ou de mesures ;
- de créer un potentiel de référence pour certaines applications électroniques (mesures et régulations par exemple).

Les deux premières catégories sont nommées « liaisons équipotentielles de protection » ou LEP¹. Les deux autres sont nommées « liaisons équipotentielles fonctionnelles »

1. NF C15-100 § 243.2.

ou LEF¹. Parmi les LEP, il doit être installée une liaison équipotentielle principale à l'entrée de chaque bâtiment. À chaque étage, une liaison équipotentielle locale doit être installée².

Dans certains cas, des liaisons équipotentiellles supplémentaires reliant localement deux ou plusieurs récepteurs doivent être installées.

RÈGLE

Les conducteurs PE et les conducteurs LEP qui ont une fonction de protection électrique doivent être réalisés à l'aide de fils nus ou isolés avec la double coloration jaune et verte.

Les conducteurs LEF qui n'ont pas de fonction de protection électrique doivent être réalisés à l'aide de tresses plates de très faible impédance.

S'ils sont réalisés en fils isolés, **ils ne doivent pas** porter la double coloration jaune et verte³.

9.2.1 Mise en œuvre des liaisons équipotentiellles

La norme NF C15-100 prescrit l'obligation de réaliser, pour tout bâtiment, une installation de mise à la terre.

Cette installation doit comprendre (voir illustration de principe **figure 9.4**) la liaison équipotentielle principale. Dans chaque bâtiment, le conducteur principal de protection, la borne principale de terre et les éléments conducteurs suivants doivent être connectés à la liaison équipotentielle principale :

- les canalisations métalliques, par exemple eau, gaz, canalisations de chauffage central et de conditionnement d'air ;
- les éléments métalliques de la construction et armatures du béton armé ;
- les gaines ou tresses métalliques des câbles de communication.

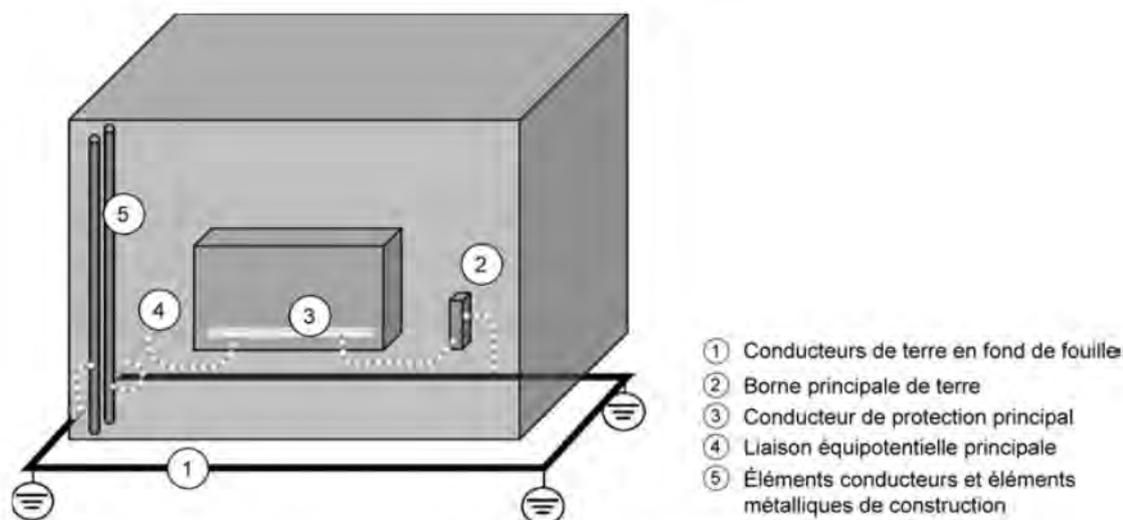


Figure 9.4 – Les différents constituants d'une installation de mise à la terre.

1. NF C15-100 § 243.3.

2. NF C15-100 § 411.3.1.1.

3. NF C15-100 partie 5-51 annexe A.

Lorsque de tels éléments conducteurs proviennent de l'extérieur du bâtiment, ils doivent être reliés à la liaison équipotentielle principale aussi près que possible de leur point d'entrée dans le bâtiment.

La liaison équipotentielle principale permet notamment d'éviter qu'un élément conducteur ne propage un potentiel soit par rapport à la terre résultant d'un défaut d'origine externe au bâtiment, soit le potentiel de la terre lointaine.

9.2.2 Installations à double terre

Reprenons la configuration d'une installation comportant deux « terres ». La terre du réseau basse tension a pour rôle d'écouler les surtensions pouvant provenir de l'effet d'un orage ou d'un défaut transmis de la haute tension. Le courant provoqué se transmettra par la liaison du neutre à la terre ou bien par un parafoudre dans le cas d'un schéma IT.

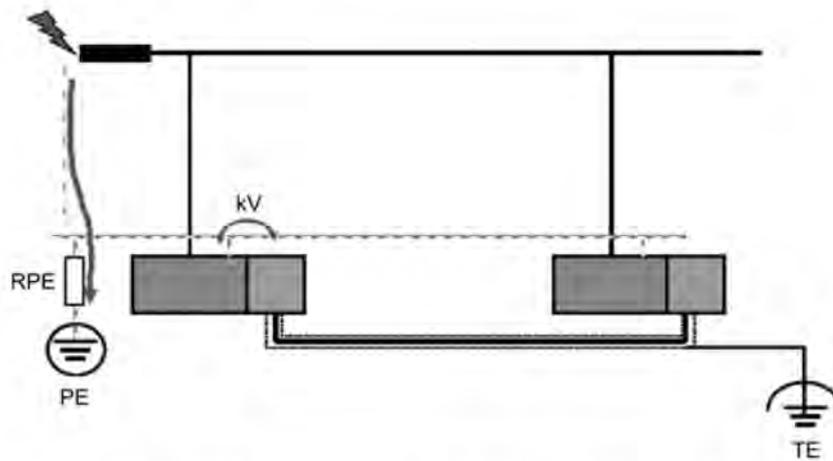


Figure 9.5 – Une tension de plusieurs dizaines de kV peut apparaître entre les deux réseaux de terre !

Le courant I_a peut avoir une valeur de plusieurs kA. S'appliquant à la résistance de terre R_{pe} , le réseau de terre « PE » subira une élévation de potentiel égale à $U = I_a \times R_{pe}$. La résistance de terre est souvent de l'ordre de la dizaine d' Ω , la tension résultante sera de plusieurs dizaines de kV. Appliquée aux masses des systèmes électroniques, ceux-ci ne résisteront pas !

On sait qu'une forte variation de courant crée inévitablement un « pic » élevé de champ magnétique. Si ce champ s'exerce sur une surface réceptrice assez grande, la variation de flux $d\Phi$ sera élevée. Si le front de variation de ce flux est de durée dt très courte, une tension énorme sera générée :

$$E = d\Phi/dt$$

Cette tension générera dans la boucle un courant destructeur ou au moins très perturbateur. La **figure 9.6** montre deux ensembles reliés par une liaison équipotentielle. Mais une ligne de communication les relie également en empruntant un cheminement légèrement différent. Une boucle réceptrice, de surface éventuellement importante, est formée. Un fort courant risque d'être induit.

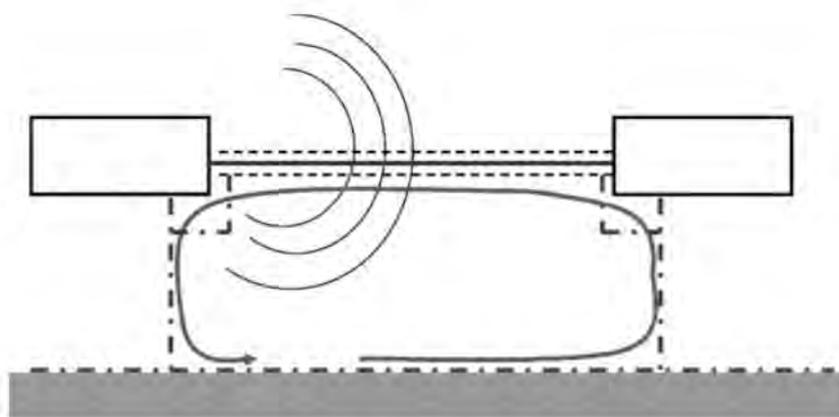


Figure 9.6 – Boucle réceptrice.

9.2.3 Règles d'installation

En dépit de certains textes un peu vieillots, les spécialistes en matière de protection contre les surtensions et autres influences externes s'accordent à prescrire une solution s'appuyant sur trois règles de base. Nous prendrons pour cette synthèse la norme EN 50174-2 en référence.

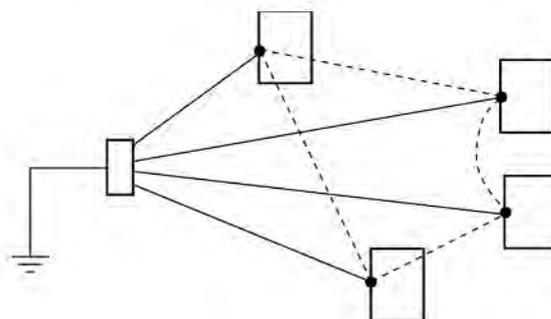


Figure 9.7 – Les prises de terre ne doivent pas seulement être connectées en étoile, mais former un réseau maillé.

■ Règle n° 1 : équipotentialité générale¹

Réseau commun d'équipotentialité (CBN) : le réseau commun d'équipotentialité (CBN) représente le moyen principal pour une liaison équipotentielle et une mise à la terre, efficaces à l'intérieur d'un bâtiment de télécommunication. C'est l'ensemble des éléments métalliques qui sont intentionnellement ou occasionnellement interconnectés pour former le réseau d'équipotentialité (BN) principal dans un bâtiment. Ces éléments incluent : la structure d'acier ou les conducteurs de renforcement, la plomberie métallique, les gaines d'alimentation en courant alternatif, les conducteurs PE, les armoires de câbles et les liaisons équipotentielles.

Lorsque les équipements sont interconnectés et si les conducteurs de terre de protection sont longs ou si les équipements sont éloignés les uns des autres, on obtient

1. EN 50174-2 § 3.1.2.

une impédance commune élevée entre équipements, de grandes boucles de masse et un état équipotentiel médiocre en particulier à haute fréquence, comme indiqué à la **figure 9.7**.

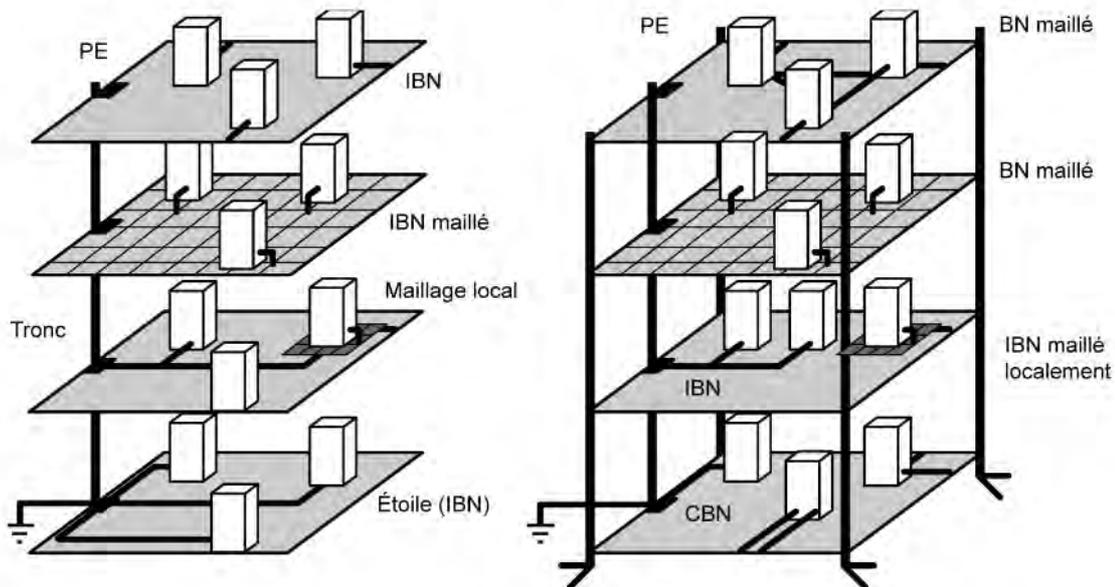


Figure 9.8 – Exemples de réseau d'équipotentialité préconisés par la norme EN 50174-2.

La norme ajoute¹ qu'il convient que toutes les autres liaisons équipotentielles telles que celles énoncées plus loin soient reliées électriquement au réseau principal d'équipotentialité afin de former un réseau maillé :

- les conducteurs de descente des systèmes de protection contre la foudre du bâtiment ;
- les conducteurs de mise à la terre fonctionnelle (voir CEI 60384-5-548) ;
- les conducteurs d'interconnexion des terres (par exemple, d'un bâtiment voisin) ;
- les conducteurs de terre parallèles (voir la série de normes TR 61000-5 de la CEI).

■ Règle n° 2 : séparation des circuits de puissance et des lignes de communication

Directives pour l'installation² : la distance minimale entre les câbles de technologies de l'information et les lampes fluorescentes, néon, à vapeur de mercure (ou autres lampes à décharge haute intensité) doit être de 130 mm. Il convient que les compartiments pour câblage électrique et les compartiments pour câblage de données soient dans des enveloppes séparées. Dans tous les cas, il convient que les bâtis de câblage de données et les équipements électriques soient séparés. Le croisement des câbles doit se faire à angle droit. Il convient que les câbles à usage différent (par exemple câbles d'alimentation électrique et câbles de technologies de l'information) ne soient pas dans le même faisceau. Il convient que les différents faisceaux soient séparés électromagnétiquement les uns des autres...

1. EN 50174-2 § 6.4.2.

2. EN 50174-2 § 6.5.3.

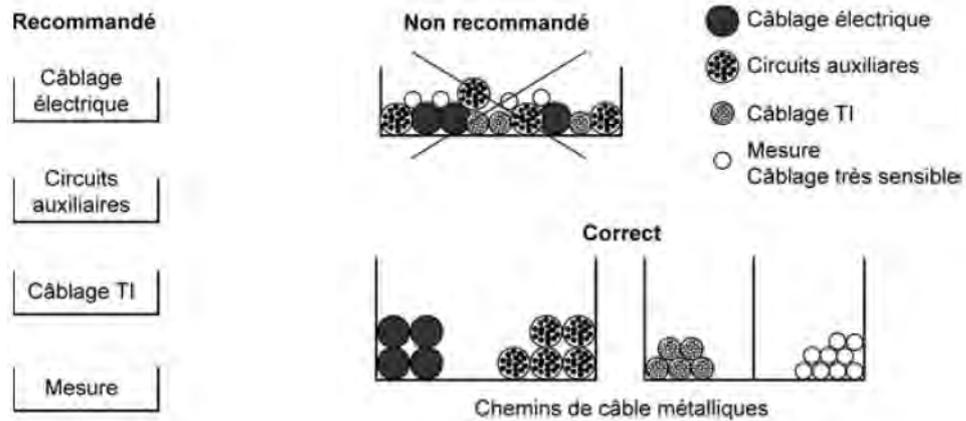


Figure 9.9 – Recommandation de séparation : câbles électriques, circuits auxiliaires, transmission d'informations (TI), mesures.

■ Règle n° 3 : rapprocher les conducteurs des plans de masse¹

Directives pour l'installation : pour éviter les effets de boucle réceptrice entre conducteurs et plans de masse, les câbles de puissance, de transmission ou de mesure doivent être montés à l'intérieur de chemins de câbles pleins ou de gouttières, dont les bords sont suffisamment élevés.

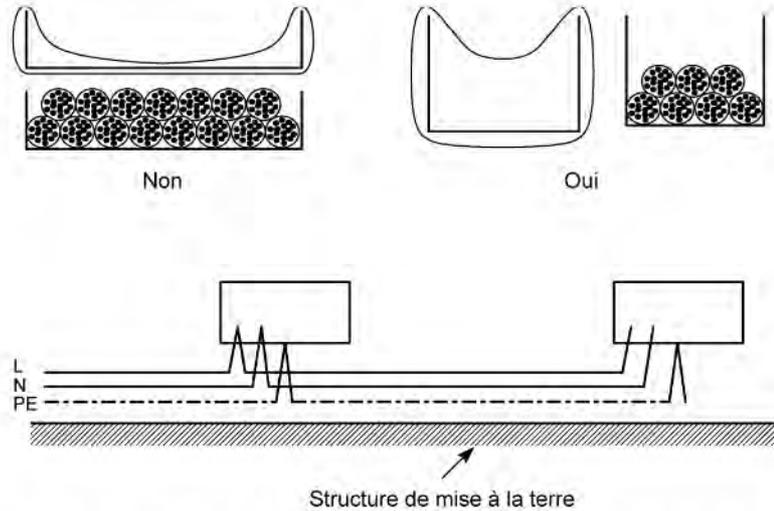


Figure 9.10 – Utiliser des goulottes métalliques à bords élevés. Plaquer les conducteurs blindés et les conducteurs « de terre » contre un « plan de masse » de référence.

10 • CALCULS DES INSTALLATIONS

Cet ouvrage ne constitue en aucun cas un manuel complet de calcul d'installations, tenant compte de toutes les caractéristiques des bâtiments. Ces calculs sont maintenant largement réalisés à l'aide de logiciels spécialisés. Mais justement, l'utilisation de tels logiciels a fait trop vite oublier à leurs utilisateurs les modes et règles de calculs. Ce chapitre a donc cet objectif d'expliquer pourquoi, comment et sur quelle base, les calculs sont menés. Quelques commentaires sont apportés pour « désacraliser » les règles et même les résultats des logiciels, afin de rendre possible l'accès à la raison.

10.1 Objectifs des calculs

Les calculs des installations électriques ont quatre objectifs :

- choisir les sections des conducteurs en fonction de leurs conditions de pose et d'exploitation afin d'éviter des échauffements excessifs pouvant compromettre leur longévité, voire même entraîner des risques d'incendies ;
- évaluer les chutes de tensions dans des conditions normales d'exploitation ;
- calculer les courants de courts-circuits maxima afin de définir les performances des dispositifs de protection contre les courts-circuits (pouvoir de coupure, courants limités) ;
- calculer les courants de courts-circuits minima afin de protéger les personnes et les canalisations, en application des schémas de liaison à la terre (SLT).

10.2 Calcul de la section des conducteurs

Le mot calcul ne convient pas exactement. Il s'agit plutôt d'un processus de sélection de différents paramètres conduisant à déterminer la section d'un conducteur pour une intensité d'emploi donnée, ou à l'inverse, connaître l'intensité maximale admissible dans un conducteur de section et de matière données.

On n'insistera pas sur le fait qu'un conducteur parcouru par un courant est le siège d'un échauffement dû aux pertes Joule RI^2t . L'objectif de ce calcul est de s'assurer que la température des conducteurs ne dépasse pas une valeur limite. Cet objectif nécessite une méthode d'évaluation de la température des conducteurs ainsi que la connaissance de leur **température maximale admissible**.

La **température maximale admissible** des conducteurs dépend essentiellement des caractéristiques des isolants en contact directs avec les conducteurs. Il est utile ici de signaler que tout échauffement de 10 K^1 réduit la longévité d'un isolant de moitié. Un isolant en fin de vie a perdu ses qualités diélectriques et mécaniques. La température limite admissible fixées pas les normes internationales relève donc d'un compromis. Sans que cette durée soit clairement affichée, il est convenu d'admettre une longévité d'environ 30 ans. Cette durée est cohérente avec celle qui est celle admise pour toutes constructions industrielles ou tertiaires.

Les principaux isolants utilisés dans les câbles industriels sont les PVC (polyvinyle chlorid) ou en polyéthylène réticulé (PR) ou éthylène propylène (EPR). La température admissible pour un câble PVC est de 70 °C , tandis que celle qui est attribuée aux câbles PR et EPR est de 90 °C^2 . La température des conducteurs dépend des facteurs suivants :

- quantité de pertes Joule absorbées : $R \cdot I^2 t$ par mètre de longueur de câble. La résistance R dépend de la matière du conducteur et de sa section ($R = \rho \times L/S$) ;
- conditions de pertes de calories par dissipation thermique (rayonnement, ventilation conduction) ;
- température environnante.

La matière et la section des conducteurs, ainsi que la température environnante sont faciles à exprimer. Les conditions de dissipation thermique le sont moins. Elles dépendent des conditions de pose en milieu isolant thermique ou ventilé. Les poses jointives des conducteurs diminuent leurs conditions de ventilation, mais en plus, engendrent un échauffement mutuel.

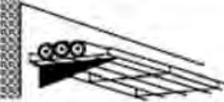
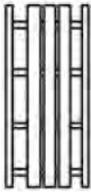
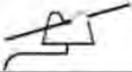
Tous ces paramètres cités font l'objet de tables de sélection qui, au final, conduiront à une « méthode de référence ». Nous donnons ici un exemple pour illustrer la démarche.

Nous choisissons un mode de pose très répandu : le chemin de câbles perforé en parcours horizontal. Le tableau 52C de la norme (**figure 10.1**) indique un numéro de référence de mode de pose : 13.

Il est nécessaire de se porter à un autre tableau de la norme tableau 52G (**figure 10.2**). Le numéro de référence 13 nous amène à une « méthode de référence » E ou F ; aucun facteur de correction n'est à appliquer.

La méthode E s'applique aux câbles multiconducteurs, la méthode F aux câbles monoconducteurs. Optons pour un câble multiconducteur, la méthode E sera retenue. Nous choisissons un câble de type U1000R02V pour un circuit triphasé plus neutre. C'est un câble en cuivre isolé PR.

1. Rappel : le Kelvin de symbole K exprime un échauffement. 10 K représente un échauffement de 10 °C .
2. NF C15-100 tableau 52F.

Exemple	Description	Réf.
	Câbles mono- ou multiconducteurs avec ou sans armure : - fixés sur un mur,	11
	- fixés à un plafond,	11A
	- sur des chemins de câbles ou tablettes non perforés, (*)	12
	- sur des chemins de câbles ou tablettes perforés, en parcours horizontal ou vertical, (*)	13
	- sur des treillis soudés ou sur des corbeaux,	14
	- sur échelles à câbles.	16
	Câbles mono- ou multiconducteurs suspendus à un câble porteur ou autoporteurs.	17
	Conducteurs nus ou isolés sur isolateurs.	18

(*) un chemin de câbles avec couvercle est considéré comme une goulotte (mode de pose 31A).

Figure 10.1 – Extrait du tableau 52C de la norme NF C15-100.

Le neutre n'est pas en principe pris pour conducteur actif, car, en l'absence d'harmonique, la somme des conducteurs chargés est toujours équivalente à 3. Le tableau 52H (**figure 10.3**), pour la méthode E et un câble triphasé PR3, conduit à la colonne 6. Cette colonne indique l'intensité admissible pour des câbles en cuivre, pour chacune des sections normalisées. Prenons comme exemple un câble de 70 mm^2 admettant une intensité de 246 A.

Mode de pose (numéro de référence du tableau 52C)	Méthode de référence	Facteurs de correction	Remarques
1	B	0,77	
2	B	0,70	
3	B	-	
3A	B	0,9	
4	B	-	
4A	B	0,9	
5	B	-	
5A	B	0,9	
11	C	-	
11A	C	0,95	
12	C	-	
13	E, F	-	
14	E, F	-	
16	E, F	-	
17	E, F	-	
18	C	1,21	
21	B	0,95	
22	B	0,95	
22A	B	0,865	
23	B	0,95	
23A	B	0,865	
24	B	0,95	
24A	B	0,865	
25	B	0,95	
31	B	-	
31A	B	0,9	
32	B	-	
32A	B	0,9	
33	B	-	
33A	B	0,9	
34	B	-	
34A	B	0,9	
41	B	0,95	
42	B	-	
43	B	-	
61	D	0,80	
62	D	-	
63	D	-	
71	B	-	(*) Pour la pose de câbles multiconducteurs, appliquer un facteur de correction de 0,9.
73	B	(*)	
74	B	(*)	
81			A l'étude

Figure 10.2 – Tableau 52G.

METHODE DE RÉFÉRENCE	ISOLANT ET NOMBRE DE CONDUCTEURS CHARGÉS								
	B	PVC 3	PVC 2		PR 3		PR 2		
C		PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2		
E			PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2	
F				PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2
S (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CUIVRE									
1,5	15,5	17,5	18,5	19,5	22	23	24	26	
2,5	21	24	25	27	30	31	33	36	
4	28	32	34	36	40	42	45	49	
6	36	41	43	48	51	54	58	63	
10	50	57	60	63	70	75	80	86	
16	68	76	80	85	94	100	107	115	
25	89	96	101	112	119	127	138	149	161
35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
50	134	144	153	168	179	192	207	225	242
70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
95	207	223	238	258	278	298	328	352	377
120	239	259	276	299	322	346	382	410	437
150		299	319	344	371	395	441	473	504
185		341	364	392	424	450	506	542	575
240		403	430	461	500	538	599	641	679
300		464	497	530	576	621	693	741	783
400					656	754	825		940
500					749	868	946		1083
630					855	1005	1088		1254

Figure 10.3 – Tableau 52H.

Température ambiante (°C)	Élastomère (Caoutchouc)	Isolation	
		PVC	PR / EPR
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,06	1,04
35	0,93	0,94	0,96
40	0,82	0,87	0,91
45	0,71	0,79	0,87
50	0,58	0,71	0,82
55	-	0,61	0,76
60	-	0,50	0,71
65	-	-	0,65
70	-	-	0,58
75	-	-	0,50
80	-	-	0,41
85	-	-	-
90	-	-	-
95	-	-	-

Figure 10.4 – Tableau 52K.

Ce n'est pas encore terminé : il faut tenir compte maintenant de la pose jointive des câbles et de la température ambiante. La température ambiante de référence est de 30 °C, nous supposons pour notre application une valeur de 35 °C. Le tableau 52K (**figure 10.4**) donne, pour un câble PR et pour la température de 35 °C, un facteur de réduction de 0,96.

Le tableau 52N (**figure 10.5**) indique enfin le facteur de réduction pour une pose jointive des câbles. Pour 4 câbles jointifs en simple couche (que nous choisissons pour notre exemple) et mode de pose 13, le facteur est de 0,77.

REF	DISPOSITION DE CIRCUITS OU DE CABLES	FACTEURS DE CORRECTION												METHODES DE REFERENCE	MODES DE POSE
		Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20		
1	JOINTIFS Enfermés	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40	B, C,	1, 2, 3, 3A, 4, 4A, 5, 5A, 21, 22, 22A, 23, 23A, 24, 24A, 25, 31, 31A, 32, 32A, 33, 33A, 34, 34A, 41, 42, 43, 71
2	Simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Pas de facteur de réduction supplémentaire pour plus de 9 câbles	C	11, 12		
3	Simple couche au plafond	1,00	0,85	0,76	0,72	0,69	0,67	0,66	0,65	0,64		E, F	11A		
4	Simple couche sur des tablettes perforées	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72		E, F	13		
5	Simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, treillis soudés etc.	1,00	0,88	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78		E, F	14, 16, 17		

Figure 10.5 – Tableau 52N.

En définitive, un câble de 70 mm² posé dans les conditions énumérées ci-dessus admet une intensité de $246 \times 0,96 \times 0,77 = 181,8$ A.

Imaginons la recherche inverse, consistant à connaître la section minimale pour une intensité d'emploi désirée, par exemple 210A, ceci pour les mêmes conditions de pose. Nous devons d'abord calculer l'intensité équivalente pour la température conventionnelle et pour une pose non jointive. Celle-ci a pour valeur : $210 / (0,96 \times 0,77) = 284$ A. Le tableau 52H, colonne 6, comme précédemment indique qu'un câble de 95 mm² est nécessaire. Cette section admet $298 \times 0,96 \times 0,77 = 220$ A, ce qui peut être utilisé comme une réserve de charge admissible.

10.3 Chutes de tension

Les chutes de tension doivent être vérifiées. Souvent elles imposent une augmentation des sections. Elles sont calculées à l'aide de l'équation :

$$\Delta U \% = (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) \cdot L \cdot \frac{100}{U_0} \quad (10.1)$$

où :

$$r = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

- ρ est égal à 1,25 fois la résistivité à 20 °C, soit 0,023 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre ou 0,037 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium ;
- la réactance x est prise égale à 0,080 m Ω/m .

La chute de tension maximale admissible, au niveau de l'utilisation est de 6 % pour les circuits d'éclairage, à compter du poste de transformation. Dans le cas d'un abonné basse tension, raccordé au réseau de distribution public, une chute de tension de 3 % est allouée au réseau public, la valeur de 3 % restante est prise pour base pour la partie privée de l'installation. Pour les autres usages (moteurs par exemple), ces valeurs sont augmentées de 2 % (soit 8 et 5 % respectivement). Il faut remarquer qu'un moteur alimenté avec une tension réduite de 8 % a un rendement déplorable. De plus une telle chute de tension, si elle est majoritaire dans les circuits génère une perte considérable d'énergie, échauffant certains locaux techniques à tel point qu'il faille parfois les climatiser, ce qui représente un bilan de consommation catastrophique pour l'environnement.

Pour diminuer les chutes de tension, la meilleure solution n'est pas toujours d'augmenter la section des conducteurs. Les conceptions visant à disposer les postes et les tableaux de distribution le plus proche des récepteurs, conduisent à diminuer les longueurs des circuits de faibles et moyennes sections. Ce sont elles qui induisent le plus de pertes. Hélas les architectes ont plutôt tendance à prévoir les postes le plus loin possible des zones de production ou de bureaux. Beaucoup de chemin reste à faire pour ne pas trop chauffer inutilement notre planète...

10.4 Section du conducteur neutre

La norme NF C15-100 propose la règle suivante pour déterminer la section du conducteur neutre :

- normalement le conducteur neutre a la même section que les conducteurs de phases ;
- toutefois le conducteur neutre peut avoir une section inférieure à celle des phases dans les conditions suivantes :
 - la section des phases est supérieure à 16 mm² cuivre ou 25 mm² aluminium,
 - la section du neutre doit être au moins égale à la moitié de la section des phases,
 - la charge est équilibrée,
 - le neutre doit être protégé en fonction de l'intensité admissible en rapport avec sa section.

La norme demande en outre que le taux d'harmoniques de rang 3 soit inférieur à 15 %. Le § 524.2.2 de celle-ci va jusqu'à préconiser de calibrer la section du neutre sur la base de 1,45 fois le courant d'emploi de la canalisation !

REMARQUE

Ces directives, qui n'ont pas de correspondance avec la norme CEI 364, sont fondées sur de bonnes intentions, car effectivement un fort taux d'harmoniques peut provoquer une surcharge d'intensité sur le conducteur neutre. Mais il est regrettable que la norme ne donne pas de méthode pour évaluer ces taux d'harmoniques. Celles-ci créent des échauffements et des pertes d'énergies dommageables à l'environnement. La priorité pour le concepteur de l'installation serait de filtrer à la source les générateurs d'harmoniques.

La règle de section du neutre est applicable au PEN, à l'exception que ce dernier ne peut pas recevoir de dispositif de protection ni de mesure de courant, car le PEN étant dédié aux canalisations de transport de tableau à tableau, celui-ci doit être relié à la terre le plus souvent possible, en particulier à chaque extrémité, lorsqu'il s'agit d'un câble. Une détection d'intensité serait ainsi shuntée par ces liaisons à la terre. La seule possibilité serait de disposer un tore autour des trois phases mesurant la somme de leur intensité.

10.5 Section du conducteur de protection

La norme NF C15-100 propose la règle suivante pour déterminer la section du conducteur PE : Le conducteur de protection doit avoir au moins la section définie par le **tableau 10.1**. K_1 est le coefficient de calcul de la contrainte thermique maximale pour les conducteurs de phases (*voir chapitre 3, tableau 3.5*). Par exemple pour un câble cuivre PR, $K_1 = 143$.

K_2 est le coefficient relatif au matériau constituant le PE, par exemple pour un conducteur en cuivre nu éloigné de parties isolantes, $K_2 = 159$. La norme NF C15-100 propose en annexe A54 plusieurs tableaux de définition de la valeur K , en fonction de la nature du conducteur de protection.

Tableau 10.1 – Section du conducteur de protection en fonction de la section des phases.

Section des conducteurs de phases de l'installation	Section minimale des conducteurs de protection	
	Si le conducteur de protection est de même nature que les conducteurs de phases	Si le conducteur de protection n'est pas de même nature que les conducteurs de phases
$S \leq 16 \text{ mm}^2$	$S_{pe} = S$	$S_{pe} = \frac{K_1}{K_2} \cdot S$
$16 \text{ mm}^2 < S \leq 35 \text{ mm}^2$	$S_{pe} = 16$	$S_{pe} = \frac{K_1}{K_2} \cdot 16$
$S > 35 \text{ mm}^2$	$S_{pe} = S/2$	$S_{pe} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{S}{2}$

En schéma TT, le PE peut avoir une section limitée à 25 mm^2 cuivre ou 35 mm^2 aluminium.

10.6 Calculs des courants de courts-circuits

Le principe de calcul des courants de courts-circuits consiste à calculer, en tête et en extrémité de chaque dérivation, les impédances totales. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier tous les éléments de l'installation et pour chacun, sa règle de calcul et ses valeurs utiles.

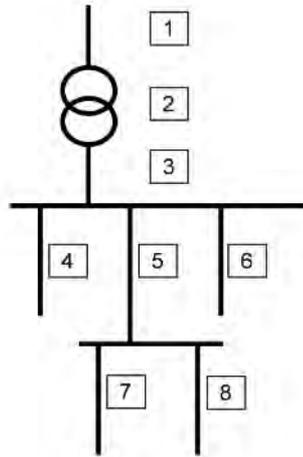


Figure 10.6 – Calcul des courants de courts-circuits : identifier chaque tronçon.

10.6.1 Impédances à prendre en compte

Rappel :

$$Z = U^2/P$$

La tension à vide d'un transformateur est de $1,05 \times U_n$.

■ Haute tension vue de la basse tension

$$Z = (1,05 \times U_n)^2/P_{cc}$$

- U_n = tension nominale entre phases (= 400 V usuellement) ;
- P_{cc} = puissance de court-circuit en kVA.

$$R = 0,1 \times Z$$

$$X = 0,995 \times Z$$

■ Transformateur

$$Z = (1,05 \times U_n)^2/P \times U_{cc}/100$$

- P = puissance nominale du transformateur en kVA ;
- U_{cc} = tension de court-circuit exprimée en %.

$$R = 0,31 \times Z$$

$$X = 0,95 \times Z$$

■ Câbles

□ Résistance

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Pour le calcul des courants de courts-circuits maximaux, ρ_0 est égal à :

- 18,5 mΩmm²/m à 20 °C pour le cuivre ;
- 29,41 mΩmm²/m à 20 °C pour l'aluminium.

Pour le calcul des courants de courts-circuits minimaux, ρ_1 est égal à :

- 1,20 × ρ_0 pour les câbles PVC ;
- 1,28 × ρ_0 pour les câbles PR.

OBSERVATION

Les valeurs de ρ sont données par le guide UTE C15-500. Elles sont en fait plus compliquées en fonction du type de câble, de l'objectif de calcul visé... Nous ne nous étendrons pas plus sur les cas de variations dont l'utilité dépasse la raison. Nous ne nous en tiendrons ici qu'à l'explication du calcul.

□ Réactance

Câbles multiconducteurs ou monoconducteurs « réunis en trèfle » :

$$X = 0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Câbles monoconducteurs jointifs en nappes :

$$X = 0,09 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Câbles monoconducteurs séparés :

$$X = 0,13 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

10.6.2 Méthode de calcul

Pour calculer une impédance totale, il convient de calculer séparément les sommes des résistances et des réactances. Ce calcul peut être facilement mené sur un tableau. Si le calcul porte sur plusieurs tableaux échelonnés à plusieurs niveaux, une solution élégante est de créer une feuille de calcul par tableau. Un lien entre les données d'impédances de l'arrivée d'un tableau divisionnaire à celles du départ qui l'alimente peut être facilement établi, ce qui permet les mises à jour dynamiques des résultats. Dans l'exemple illustré par les **figures 10.7** et **10.8** le départ 1 du TGBT alimente le tableau TD1.

Les feuilles de calcul montrées sont simplifiées. Elles calculent les valeurs de courts-circuits triphasés maximales et minimales. La méthode peut être élargie au calcul des courants de courts-circuits minimaux I_{cc1} et I_{cc2} et aux courants de défauts, en introduisant les impédances correspondantes. La plus faible de ces valeurs définit le réglage des déclencheurs à court retard.

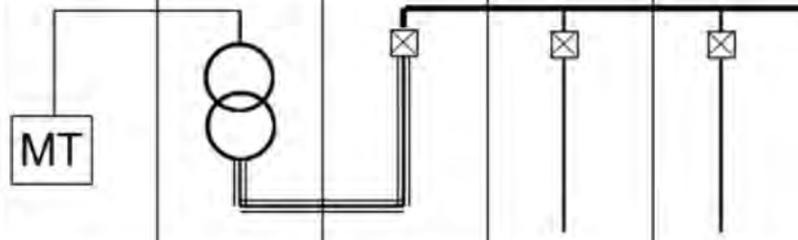
	A	B	C	D	E	F
1	Tension Un (V)	400	TGBT			
2						
3	Désignation	Moyenne tension	Transformateur	Alim, TGBT	Départ 1	Départ 2
4	Unité	Pcc/MVA	kVA	A		
5	Valeur	250	1000	1516	250A	200A
6	Ucc		5%			
7	Câble			U1000R02V	U1000R02V	U1000R02V
8	Matière			Cu	Cu	Al
9	Section			300	150	150
10	Nbre			3	1	1
11	Longueur			15	95	30
12						
13	R	0,000	0,882	0,308	11,717	5,882
14	R1			0,395	14,997	7,529
15	X	0,706	8,776	0,027	0,080	0,080
16						
17	Rtot		0,882	1,190	12,907	7,072
18			0,882	1,277	16,188	8,719
19	Xtot		9,482	9,508	9,588	9,588
20						
21	Z		9,522	9,582	16,079	11,914
22	Z1		9,522	9,593	18,814	12,960
23						
24	Icc3max		24,25	24,10	14,36	19,38
25	Icc3min		24,25	24,07	12,27	17,82
26						
27						

Figure 10.7 – Exemple de calcul sur tableur : TGBT.

La même méthode peut également conduire au calcul des chutes de tension. Des alertes aux dépassements ou aux résultats aberrants peuvent être provoquées par des fonctions conditionnelles.

À PROPOS DE MÉTHODE

Il n'y a pas lieu, dans le cadre de cet ouvrage, de développer plus loin la méthode de calcul. Il est opportun de signaler que ces calculs peuvent être menés sans connaître les dispositifs de protection choisis. Il est évident que les courants de courts-circuits et les réglages calculés définissent le choix de ces appareils. Si une impossibilité se présente, il vaut mieux se référer à la raison qu'aux automatismes des logiciels. Le réflexe d'augmenter inconsidérément les sections des câbles risque d'être trop vite pris. Il est surprenant que les modes de calculs les plus couramment pratiqués prennent d'abord en compte le choix des appareils pour calculer les caractéristiques des installations, y compris la détermination des sections des câbles.

	A	B	C	D	E	F
1	Tension Un (V)	400	TD1			
2						
3	Désignation	Alim. TGBT	Départ 11	Départ 12	Départ 13	Départ 14
4	Unité	A				
5	Valeur	250A	95A	40A	40A	40A
6						
7	Câble	U1000R02V	U1000R02V	U1000R02V	U1000R02V	U1000R02V
8	Matière	Cu	Cu	Al	Al	Al
9	Section		16	6	2,5	4
10	Nbre		1	1	1	1
11	Longueur		55	89	68	124
12						
13	R		63.594	436.248	799.952	911.710
14	R1		81.400	558.398	1023.939	1166.989
15	X		0.080	0.080	0.080	0.080
16						
17	Rtot	12.907	76.501	449.155	812.859	924.617
18		16.188	94.307	571.305	1036.846	1179.896
19	Xtot	9.588	9.668	9.668	9.668	9.668
20		0.000				
21	Z	16.079	77.109	449.259	812.916	924.668
22	Z1	18.814	94.801	571.387	1036.891	1179.935
23		0.000				
24	Icc3max	14.363	2.99	0.51	0.28	0.25
25	Icc3min	12.275	2.44	0.40	0.22	0.20
26						
27						

Figure 10.8 – Exemple de calcul de tableau divisionnaire alimenté par le départ 1 du TGBT.

10.7 Courant de crête

■ Rappel d'éléments d'électrotechnique

Lorsqu'un circuit de faible impédance, de composantes L et R , est fermé sur une source alternative, le courant est produit par deux générateurs de tension : la source elle-même (le réseau) et la self induction L qui, en vertu de la loi de Lenz, qui s'oppose à la variation de courant, selon la loi :

$$U = L \times di/dt + R \cdot i$$

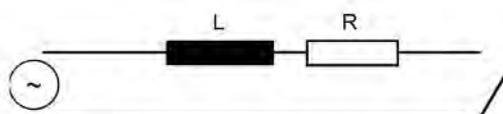


Figure 10.9 – Représentation équivalente d'un circuit mis en court-circuit.

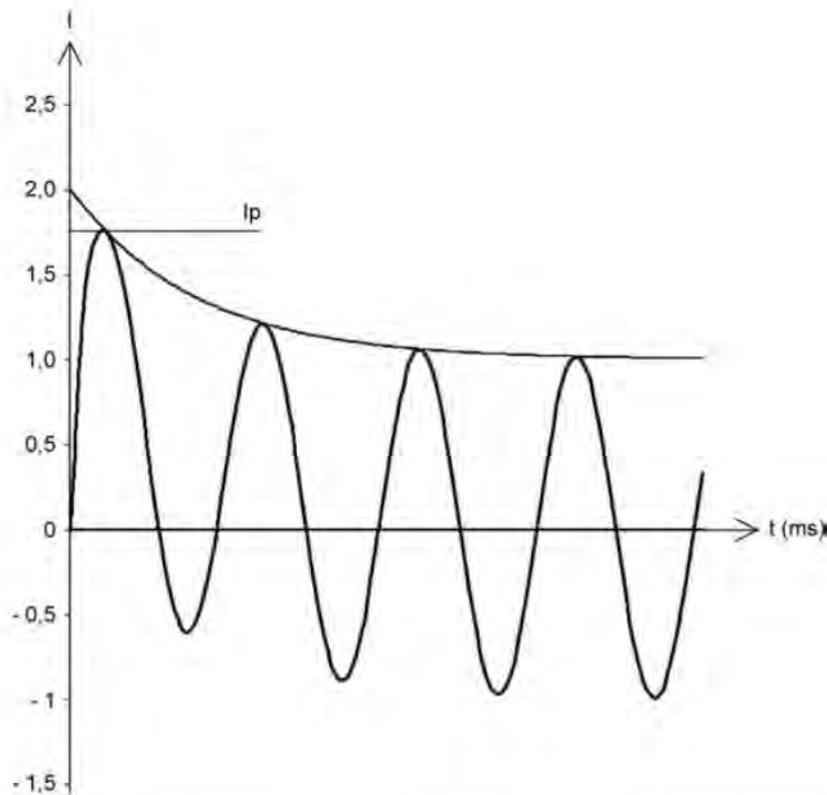


Figure 10.10 – Forme du courant à l'établissement d'un court-circuit.

À la fermeture du circuit, $L \times di/dt = U$, donc I est nulle. Mais après, les deux tensions s'ajoutent pour produire un courant de crête supérieur au courant instantané maximum en régime établi, lequel est $\sqrt{2} \times I_{c,eff}$.

Il est usuel d'affecter le paramètre κ (kappa) pour exprimer la valeur du courant de crête I_p en fonction de l'intensité efficace d'un courant de court-circuit présumé I_c :

$$I_p = \kappa \times \sqrt{2} \times I_{c,eff}$$

La valeur κ dépend de L et R , ainsi que de l'angle de phase à la fermeture du circuit.

Pour simplifier, le document CEI 909-1 donne une formule semi-empirique permettant de calculer la valeur de κ :

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (11.2)^1$$

R et X étant respectivement la résistance et la réactance du circuit.

■ Exemple

La réactance d'un transformateur de puissance est très proche de trois fois la valeur de sa résistance.

1. Référence : formule 39 de CEI 909-1.

Donc à sa sortie la valeur de κ est de :

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{1}{3}} = 1,3805$$

En conséquence la valeur crête d'un courant de court-circuit à la sortie d'un transformateur et de :

$$I_p = 1,3805 \times \sqrt{2} \times I_{c_{\text{eff}}} = 1,952 \times I_{c_{\text{eff}}}$$

OBSERVATION

Curieusement cette formule de calcul de la valeur κ est méconnue de certaines normes UTE, comme la norme NF C15-100 ou le document C15-500 servant de guide au calcul des réseaux basse tension. Ces documents utilisent un tableau de correspondance qui a été adopté pour les essais de composants ou d'appareils en situation de court-circuit. Ce tableau n'a aucune justification mathématique dans un calcul de courant de court-circuit.

10.8 Réglage des déclencheurs sous courts-circuits

L'objectif des calculs de courants de court-circuit est d'évaluer les courants maximaux pour définir le pouvoir de coupure, mais aussi les courants minimaux pour un défaut franc en bout de ligne. La connaissance de ces derniers détermine les réglages des dispositifs de protection contre les courts-circuits. Ces dispositifs doivent fonctionner en 400 ms (en réseau 230/400 V) s'ils assurent la protection des personnes (dans des conditions normales d'utilisation), ou en 5 s dans les autres cas.

La règle de calcul est donnée par le document UTE C15-500, qui est un guide et non une norme. Mais ce document sert de base aux règles appliquées dans les logiciels de calculs d'installations électriques.

Les courants de courts-circuits minimaux se calculent sur la base de la tension d'alimentation minimale ($U_n \times 0,95$) et des valeurs de résistance maximale (câbles chauds).

Ces courants sont :

- I_{k_2} : les courts-circuits entre deux phases ;
- I_{k_1} : les courts-circuits entre phase et neutre ;
- I_f : le courant de défaut entre phase et PE ou entre neutre et PE.

La valeur à prendre en considération est la plus faible de ces trois courants.

Le tableau 4a du guide UTE C15-500 donne des valeurs de résistivité à utiliser dans différentes configurations, tenant compte de l'augmentation de la résistivité en fonction de la température des conducteurs. Le tableau 4b propose les valeurs à utiliser pour les canalisations préfabriquées. La complexité de ces tableaux peut sembler assez délirante étant donné l'hypothèse de départ qu'un court-circuit est considéré franc, c'est-à-dire avec une impédance nulle à l'endroit du défaut.

Notons que lorsqu'un dispositif de protection DDR est utilisé, le courant I_f est pris en charge par ce dispositif. Le réglage du déclencheur de court-circuit doit être la plus faible des valeurs de I_{k_1} et I_{k_2} .

En schéma IT la valeur de I_f est celle d'un double défaut. Elle est égale à la moitié du courant phase-PE. Mais si le neutre est utilisé, il faudrait envisager pour une partie de boucle de défaut l'impédance entre phase et PE et pour l'autre l'impédance

entre neutre et PE. Ces combinaisons étant impossibles à déterminer, la norme NF C15-100 demande de prendre en compte le double de l'impédance neutre-PE (*voir chapitre 8, § 8.5*).

Tous ces éléments justifient l'utilisation de logiciels de calculs d'installation. Ceux-ci doivent obtenir un avis technique de l'UTE qui, après examen, certifie une application du guide UTE C15-500¹.

Nous soulignons encore une fois la grande utilité de ces logiciels, mais aussi leur effet pervers, car étant déjà basé sur des règles « maximalistes » du guide de référence, les logiciels proposent des réglages tenant compte de tolérances théoriques. Les utilisateurs face à un résultat qualifié conforme ou non conforme, auront tendance à augmenter les sections des conducteurs, sans même s'inquiéter de l'absurdité de certains résultats.

1. La liste des logiciels ayant obtenu un avis technique est disponible sur le site www.ute-fr.com.

11 • CALCUL DES ÉCHAUFFEMENTS DANS LES ARMOIRES ÉLECTRIQUES

Ce chapitre explique une méthode proposée par le rapport CEI 890. Cette méthode est très peu connue, pourtant elle a été expérimentée par quelques constructeurs. Des mesures de températures dans des conditions réelles ont révélé que cette méthode donnait des résultats plutôt satisfaisants.

11.1 Principe

L'essentiel de la méthode consiste à évaluer en premier lieu la puissance de refroidissement de l'armoire. Puis, en fonction de la puissance effective dissipée à l'intérieur de l'enveloppe, des abaques permettent d'évaluer la température interne, ainsi que la répartition de celle-ci en fonction de la géométrie externe et interne de l'armoire et de la présence éventuelle d'ouvertures de ventilation.

11.2 Calcul de la surface effective de refroidissement

La surface effective de refroidissement Ae est égale à la somme des surfaces de l'enveloppe. Seulement chacune de celles-ci n'a pas la même influence sur le refroidissement. On comprend que la paroi supérieure, si elle n'est pas couverte, dissipera plus que la paroi arrière plaquée contre un mur, ou bien sûr que le fond s'il est posé sur le sol. À chaque paroi de surface A_0 , est affecté un coefficient b donnant une surface de dissipation équivalente. La valeur totale Ae est donc égale à la somme des surfaces équivalentes : $\Sigma(A_0 \times b)$. Les valeurs de b sont données par le **tableau 11.1**.

Tableau 11.1 – Facteur de surface b .

Type d'installation	Facteur de surface b
Partie supérieure à surface exposée	1,4
Partie supérieure couverte (ex. : enveloppe encastrée)	0,7
Faces latérales exposées	0,9
Faces latérales couvertes (paroi arrière en fixation murale)	0,5
Faces latérales d'enveloppes centrales	0,5
Surfaces au plancher	0

Nous prendrons pour exemple, une armoire de dimension $H \times L \times P = 1800 \times 800 \times 400$, montée au sol et plaquée contre un mur, sans cloisonnement interne. Celle-ci aura pour surface effective de refroidissement Ae :

Toit :	$0,8 \times 0,4 \times 1,4$	$= 0,448 \text{ m}^2$
Parois latérales (2) :	$1,8 \times 0,4 \times 0,9 \times 2$	$= 1,296 \text{ m}^2$
Porte :	$1,8 \times 0,8 \times 0,9$	$= 1,296 \text{ m}^2$
Arrière :	$1,8 \times 0,8 \times 0,5$	$= 0,720 \text{ m}^2$
Fond au sol :		$= 0,000 \text{ m}^2$

Total		$Ae = 3,760 \text{ m}^2$

11.3 Calcul de la température à mi-hauteur

La température à mi-hauteur de l'armoire est évaluée par l'équation suivante :

$$\Delta T_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x \quad (11.1)$$

- P : puissance effective dissipée à l'intérieur de l'enveloppe ;
- k : constante d'enveloppe ;
- d : facteur d'influence de présence de cloisons (= 1 sans cloison) ;
- x : exposant.

Tableau 11.2 – Valeurs des coefficients.

Ae	k	x	c	d
> 1,25 sans orifice	Figure 11.1	0,804	Figure 11.2	n.t.
> 1,25 avec orifice	Figure 11.3	0,715	Figure 11.4	n.t.
≤ 1,25 sans orifice	n.t.	n.t.	n.t.	1

n.t. : non traité dans cet ouvrage.

Dans un premier temps nous continuons sur l'exemple de notre armoire, sans cloison interne ni ventilation. L'exposant x est égal à 0,804 et d à 1.

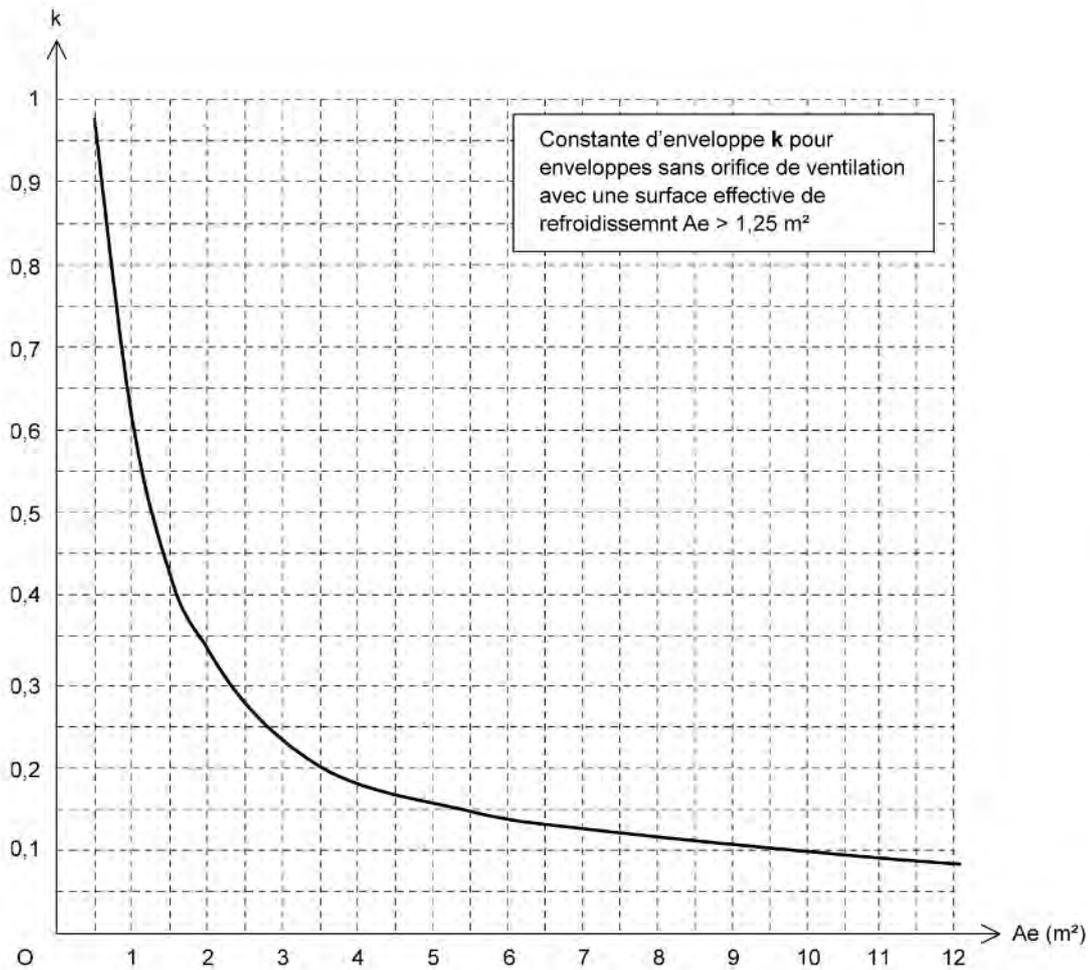
Le coefficient k est donné par l'abaque **figure 11.1**. Cette figure donne, pour une surface Ae de $3,76 \text{ m}^2$, un coefficient k de 0,18.

Supposons que la puissance dissipée soit de 440 W (nous verrons plus loin comment calculer la puissance dissipée), nous pouvons alors calculer l'élévation de température à mi-hauteur $\Delta T_{0,5}$:

$$\Delta T_{0,5} = 0,18 \times 440^{0,804} = 24,02 \text{ K}$$

Si la température externe est de 35 °C , la température interne à mi-hauteur est de :

$$35 + 24,02 = 59,02 \text{ °C}$$

Figure 11.1 – Coefficient k .

11.4 Calcul de la température en haut de l'armoire

L'échauffement en haut de l'armoire est donné par l'équation :

$$\Delta T_{1,0} = c \times \Delta T_{0,5} \quad (11.2)$$

Le coefficient c est donné par la **figure 11.2**. Nous sommes dans la configuration 3. La valeur f est égale à :

$$f = \frac{h^{1,35}}{A_b} \quad (11.3)$$

où :

- h est la hauteur de l'armoire en m ;
- A_b est la surface de la base en m^2 .

Dans le cas de l'exemple :

$$A_b = 0,8 \times 0,4 = 0,32 \text{ m}^2$$

donc :

$$f = 1,8^{1,35} / 0,32 = 6,9$$

La courbe 3 de la **figure 11.2** donne, pour $f = 6,9$, $c = 1,43$.

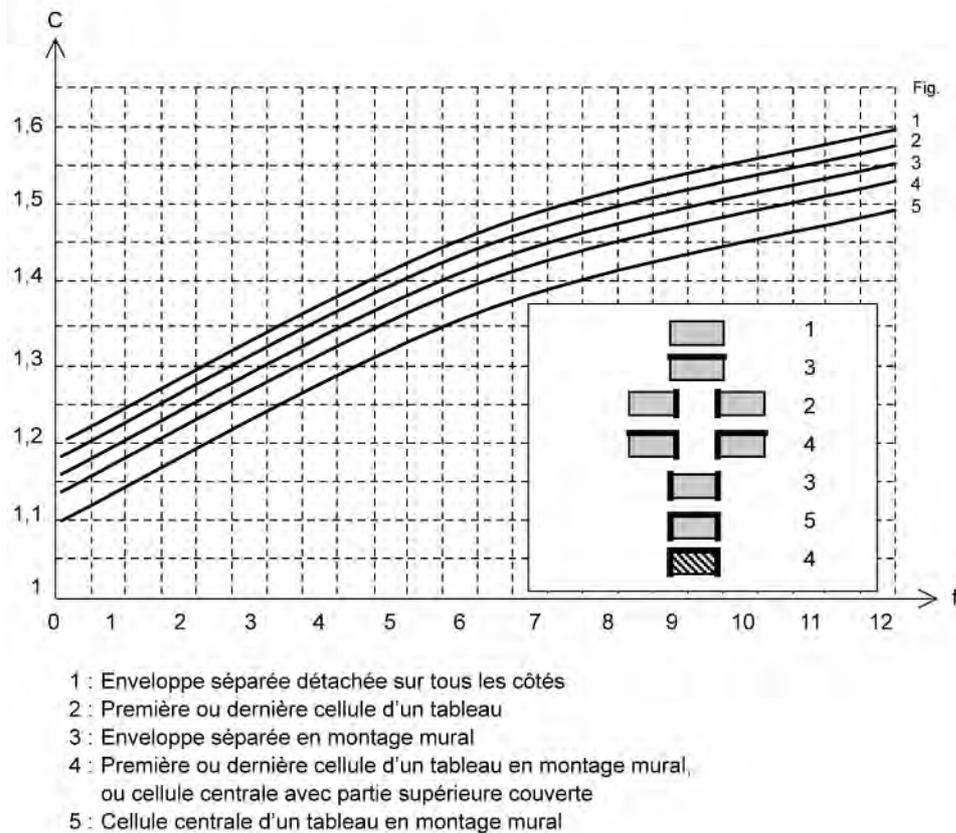


Figure 11.2 – Coefficient c .

L'échauffement en haut de l'armoire est donc de (d'après l'équation 11.2) :

$$\Delta T_{1,0} = 1,43 \times 24,02 = 34,34 \text{ K}$$

La température en haut de l'armoire est de :

$$T_{1,0} = 35 + 34,34 = 69,34 \text{ °C}$$

À une telle température les appareillages doivent être déclassés. Ils restent pour la plupart dans la plage de leur température de fonctionnement, mais leur intensité thermique d'emploi n'est plus assurée.

Nous encourageons le lecteur à reprendre cet exercice pour la même armoire, mais celle-ci étant décalée de 10 cm du mur, espace suffisant pour considérer la paroi arrière libre.

11.5 Influence des ouvertures de ventilation

Le principe est de créer des ouvertures d'entrée d'air frais et d'évacuation d'air chaud. Bien évidemment afin d'assurer les meilleures conditions de renouvellement de l'air, les orifices d'entrée sont situés en partie la plus basse possible, ceux de sortie en partie la plus haute, si possible diagonalement opposés aux premiers. Dans

ce qui suit le calcul utilise la donnée de surface des orifices d'entrée d'air. Il est supposé que les orifices d'évacuation aient une section au moins de 1,1 fois celle des entrées. Nous allons modifier le projet de notre armoire en prévoyant une ouverture d'entrée d'air de 10×70 cm. Cette ouverture dispose toutefois d'une protection contre l'introduction de corps solides d'indice IP20, au moyen d'une grille. On suppose que celle-ci réduit la section d'entrée d'air de 40 %. La section effective est donc de $10 \times 70 \times 0,6 = 420$ cm².

Le calcul s'opère à l'aide de la même équation :

$$\Delta T_{0,5} = k \cdot d \cdot P^x \quad (11.4)$$

- L'exposant x est égal à 0,715 selon le **tableau 11.2** ;
- d est égal à 1, car aucun cloisonnement n'est prévu ;
- Le coefficient k est donné par l'abaque de la **figure 11.3**, en fonction de la surface équivalente de refroidissement A_e et de la section des orifices d'entrée d'air.

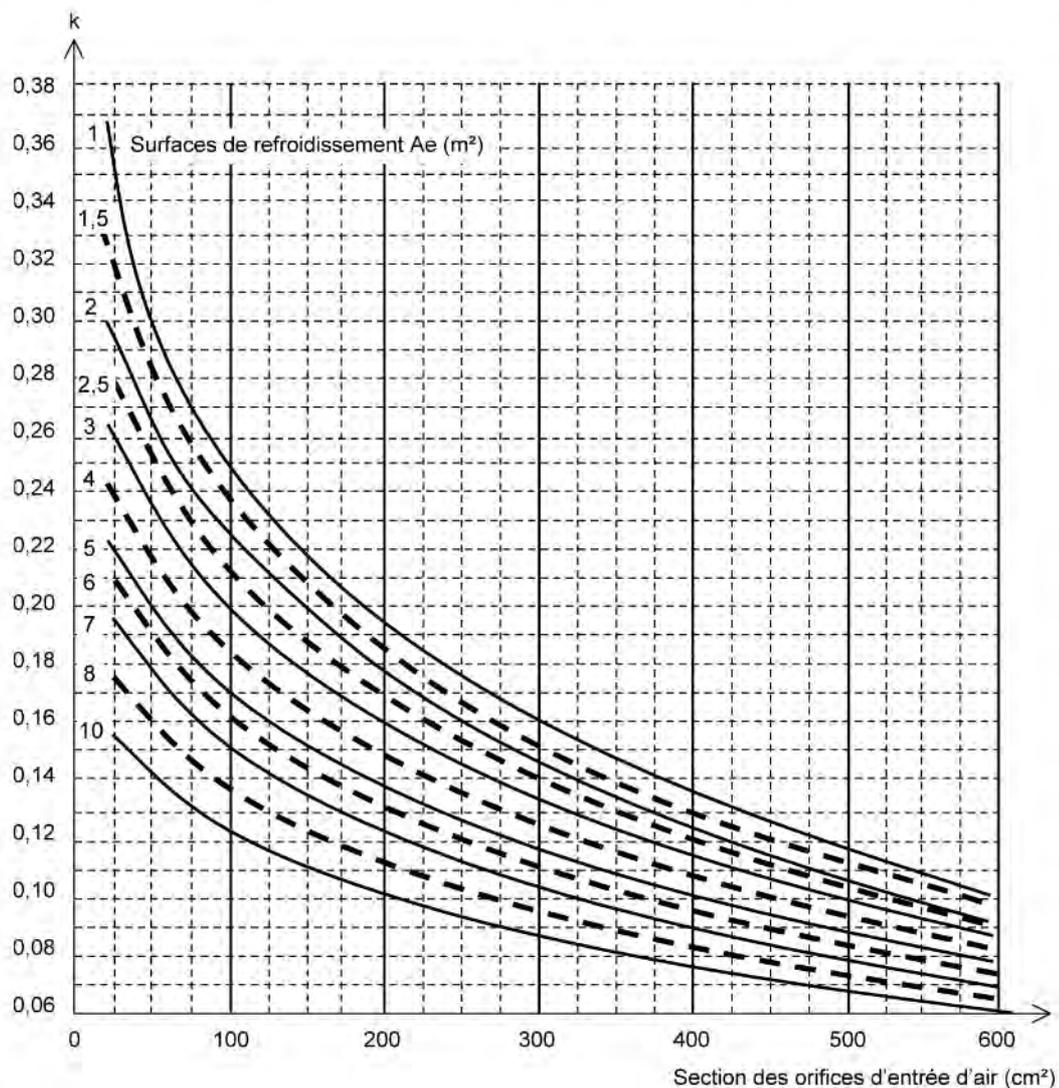


Figure 11.3 – Coefficient k pour armoire avec ventilation et de surface $A_e > 1,25$ m².

Dans notre exemple, en suivant une valeur intermédiaire entre les courbes $Ae = 3$ et 4, la section d'entrée d'air de 420 cm^2 donne une valeur k d'environ 0,11. L'échauffement à mi-hauteur est alors de :

$$\Delta T_{0,5} = 0,11 \times 440^{0,715} = 8,5 \text{ K}$$

La température $T_{0,5}$ est de $35 + 8,5 = 43,5 \text{ °C}$.

La température en haut d'armoire est calculée comme précédemment à l'aide du facteur c . Celui-ci est donné par l'abaque **figure 11.4**.

Le facteur f est toujours de $f = 6,9$, comme précédemment. Pour une section d'entrée d'air de 420 cm^2 , une courbe entre $f = 6$ et 8 donne $c = 2$. L'échauffement en haut d'armoire est donc :

$$\Delta T_{1,0} = 2 \times 8,5 = 17 \text{ K}$$

La température en haut d'armoire est de :

$$T_{1,0} = 35 + 17 = 52 \text{ °C}$$

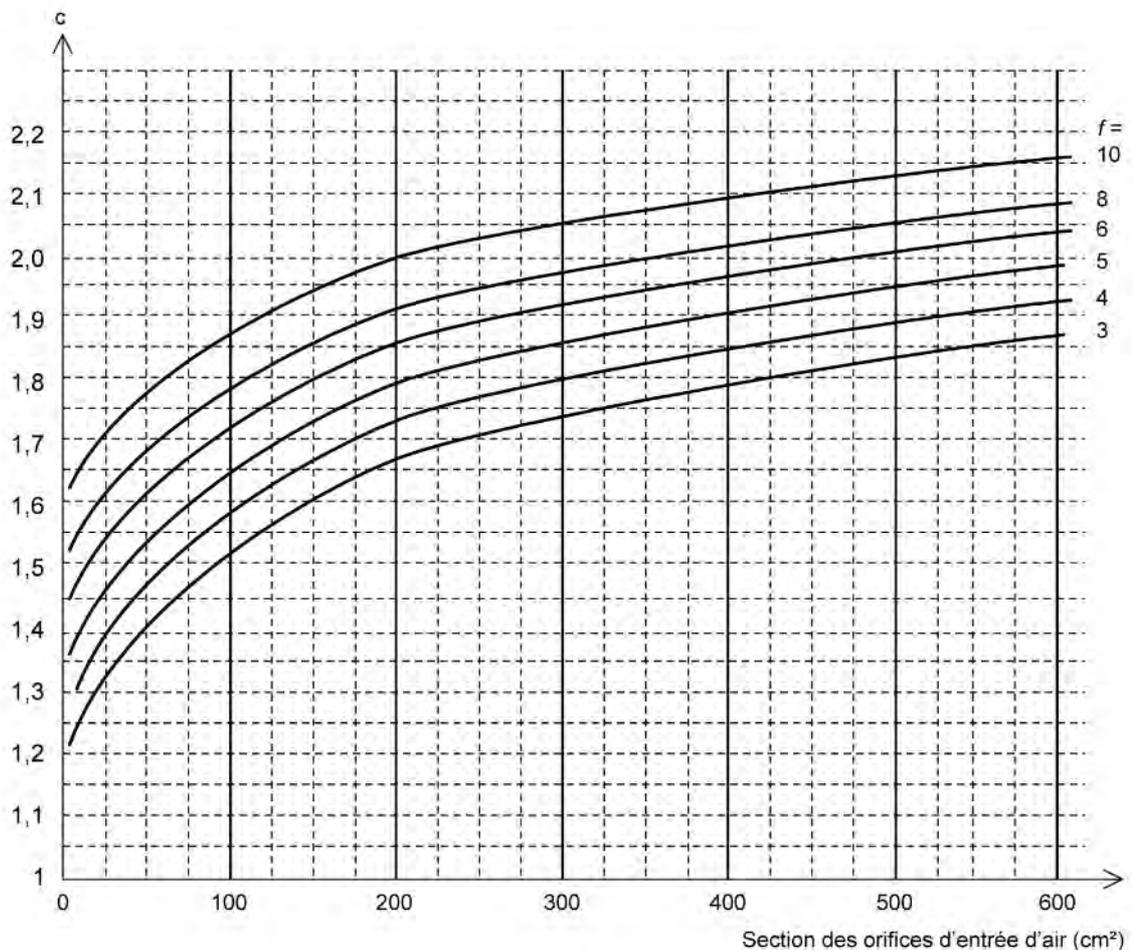


Figure 11.4 – Facteur c pour les armoires ventilées.

On constate donc que la diminution de température est tout à fait significative. Si on réserve le haut d'armoire à un jeu de barres de distribution suffisamment calibré pour ne pas craindre une telle température et si les appareils situés dans la moitié supérieure sont calibrés prudemment, une telle armoire ne suscitera pas d'inquiétude.

OBSERVATION

Il est opportun de remarquer que les organes qui souffrent le plus des températures excessives sont en premier lieu les bornes de raccordement. Cet exercice démontre qu'une disposition des borniers en haut d'armoire nécessite une attention toute particulière.

Le rapport CEI 890 traite également les coffrets de faibles dimensions ($Ae \leq 1,25 \text{ m}^2$). Les abaques et la méthode sont différents. Exposer leur cas n'apporterait rien de nouveau à l'explication, cet ouvrage ne cherchant pas à se substituer à ce document de référence.

De même ce chapitre n'expose pas le cas des armoires cloisonnées. Ce type d'armoire concerne principalement les tableaux de type ensembles de série, conformes à la norme EN 60439-1. Pour ceux-ci, il est prévu un essai d'échauffements dans des conditions réelles significatives définies par leur constructeur.

11.6 Calcul de la dissipation calorifique à l'intérieur d'une armoire

Il n'est pas d'autre moyen pour mener ce calcul que d'établir la liste des pertes élémentaires par constituants. Pour les conducteurs et les jeux de barres, l'amendement n° 1 du document CEI 890, propose un tableau donnant les dissipations en W/m pour leur intensité admissible. Pour une intensité plus faible, la perte est corrigée selon le rapport des carrés de l'intensité :

$$P = P_n \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$$

Le **tableau 11.3** est un extrait du document CEI 890 amendement n° 1. Il indique la puissance dissipée dans les conducteurs pour une intensité donnée. L'intensité proposée dans notre extrait est celle qui est admise en goulotte, pour les faibles sections, ou en conducteurs séparés pour les plus élevées, à l'intérieur d'armoire où la température serait de 55 °C.

Pour l'appareillage, les constructeurs indiquent dans leurs catalogues les pertes Joule pour une intensité donnée. Certains appareils tels que les contacteurs diffusent des pertes par les pôles, en fonction de leur intensité, aussi par leur bobine.

La **figure 11.5** donne un exemple de présentation de catalogue donnant la puissance dissipée par des contacteurs de puissances diverses et de disjoncteurs moteur.

Tableau 11.3 – Exemples de puissance dissipée par des conducteurs.

Section en mm ²	Conducteurs en goulottes à 55 °C		Conducteurs en montages séparés à 55 °C	
	Intensité admissible (A)	Puissance dissipée (W/m)	Intensité admissible (A)	Puissance dissipée (W/m)
1	6,1	0,8		
1,5	8	0,9		
2,5	11	1,1		
4	14	1,1		
6	18	1,2	25	2,3
10	25	1,3	32	2,1
16	34	1,6	50	3,4
25			65	3,7
35			85	5,0
50			115	6,2
70			149	7,2
95			175	7,2

Tableau 11.4 – Exemples de puissances dissipées par des jeux de barres.

Dimension	Intensité admissible (A)	Puissance dissipée (W/m)
20 × 5	266	16
20 × 10	414	19,6
30 × 5	368	20,5
30 × 10	556	23,7
40 × 5	468	25,0
40 × 10	694	28,1
50 × 5	566	29,7
50 × 10	826	32,3

		DILM7	DILM9	DILM12	DILM15	DILM17	DILM2
Consommation de la bobine à l'état froid et sous $1.0 \times U_c$							
50 Hz	Appel	VA	24	24	24	52	52
50 Hz	Maintien	VA	3.4	3.4	3.4	7.1	7.1
50 Hz	Maintien	W	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1
Pertes par effet Joule (3 pôles)							
Pertes par effet Joule sous I_n		W	3	3	3	7.3	9.6
Pertes par effet Joule sous I_c selon AC-3/400 V		W	0.37	0.6	1.1	1.9	3.8
Impédance par phase		mΩ	2.5	2.5	2.5	2	2

		DILEM	DILEM-G	DILEM4	DILEM4-
Consommation					
avec bobine à courant alternatif					
1 tension 50 Hz et 2 tensions 50 Hz, 60 Hz	appel	VA	25	-	25
1 tension 50 Hz et 2 tensions 50 Hz, 60 Hz	appel	W	22	-	22
1 tension 50 Hz et 2 tensions 50 Hz, 60 Hz	maintien	VA	4.6	-	4.6
1 tension 50 Hz et 2 tensions 50 Hz, 60 Hz	maintien	W	1.3	-	1.3
Pertes par effet Joule (3 ou 4 pôles)					
pour I_n		W	2	3.5	2.7
avec I_c en AC-3/400 V		W	0.5	0.7	-

	PKZM01...	PKZM0...
Pertes par effet Joule (pour les 3 pôles à chaud)	W	6

Figure 11.5 – Exemples de présentation de catalogue indiquant la puissance dissipée (d'après Moeller Electric).

11.7 Exemple de tableau de dissipation

Afin de permettre quelques exercices significatifs, nous proposons un tableau de dissipations typiques de matériels pour lesquels nous ne donnons aucune référence (**tableau 11.5**), le but étant de proposer au lecteur une méthode de travail.

Tableau 11.5 – Exemples de puissance dissipée par l'appareillage.

Appareil	Intensité de référence (A)	Dissipation bobine (W)	Dissipation des 3 pôles (W)
Interrupteur	25		3,3
	32		5,4
	63		13,5
	100		32,5
	160		42
	315		50

Tableau 11.5 – Exemples de puissance dissipée par l'appareillage. (Suite)

Appareil	Intensité de référence (A)	Dissipation bobine (W)	Dissipation des 3 pôles (W)
Disjoncteur moteur	16		6
	32		14
Disjoncteur-contacteur	32	4	23
Disjoncteur modulaire	10		9
	25		9
	32		9
	40		9
Fusible	16		7
	25		12
	63		23
Disjoncteurs boîtier moulé	100		28
	200		40
	315		86
	630		200
Disjoncteur à coupure dans l'air - fixe	800		66
	1 000		103
	1 600		170
Disjoncteur à coupure dans l'air - fixe	800		160
	1 000		250
	1 600		390
Contacteur	6	0,6	6
	20	2,5	2,3
	35	3,0	3,7
	55	4,0	12,4
	90	5,8	20
	140	8,5	25
	260	13	75
Relais thermique	6		7,7
Transformateur	100 VA	13	
	250 VA	22	
	400 VA	27	
	630 VA	37	
	1 000 VA	54	

11.8 Exemple d'application

Les unités fonctionnelles similaires sont groupées entre elles. Pour chacune est calculée la puissance dissipée par les appareils et leur câblage.

- W_r est la puissance dissipée pour l'intensité de référence. Elle provient des tableaux précédents. Il faut remarquer que pour les disjoncteurs et fusibles, l'intensité de référence est le réglage maximum du thermique ou le calibre de la cartouche. En effet ces appareils fonctionnent par effet thermique pour la même puissance thermique. Il ne faut pas confondre avec le calibre des pôles.
- W_e est la puissance dissipée pour l'intensité d'emploi.
- W_b est la puissance de dissipation des bobines.
- W_d est la puissance dissipée par l'élément ($W_b + W_e$).

Tableau 11.6 – Exemple d'application de calcul de la puissance totale dissipée.

Fonction	rep	Désignation	Quantité ou longueur	Intensité de référence	Intensité d'emploi	W_b	W_r	W_d
Arrivée	Q0	Interrupteur	1	160	140		42	32,16
		Câblage 70 ²	1,2	147	140		7,2	7,84
		Jeu de barres 20 × 5	0,7	266	140		16	3,10
Transformateur	T0	tr 250 VA	1			22		22,00
	F1/F2	Fusible 10 × 38	4	4	2		7	7,00
		Câblage 1 mm ²	1	6,1	1		0,8	0,02
Départs 4 kW	QxM*	Disjoncteur moteur	22	10	8	6		132,00
	KxM	Contacteur	22	20	8	2,5	2,3	63,10
		Câblage 2,5 ²	33	11	8		1,1	19,20
Départs ligne	QyF	Disj. modulaire	26	10	5		9	58,50
		Câblage 2,5 ²	40	11	5		1,1	9,09
Départs	Q1-2M	Départs 40 A	2	63	40	20	28	62,57
		Câblage 16 ²	3	50	40		3,4	6,53
Voyants	H1X	Lampes 2 W	11			2		22,00
							Total	445,11

Il est évident qu'un tel travail de recherche et d'écriture n'est pas supportable dans le contexte de productivité courante de dossiers de réalisation d'armoire. Les données et le calcul expliqué ci-dessus devraient être incorporés dans tous les logiciels de conception d'armoire électrique. En tout cas, ce devrait être un critère de choix d'un tel logiciel.

À défaut, un tel calcul est abordable avec un tableur, toutefois une telle application nécessiterait pour l'utilisateur une double saisie : schéma et calcul de température.

11.9 Températures maximales admissibles

Il est opportun de rappeler dans ce chapitre les températures admises en plusieurs parties d'un ensemble à basse tension. Les valeurs sont bien sûr des valeurs maximales ; elles sont néanmoins surprenantes. Elles sont résumées dans le **tableau 11.7**.

Tableau 11.7 – Limites d'échauffement.
Valeurs reproduites de la norme EN 60439-1, tableau 3.

Partie de l'ensemble	Échauffement (K)
Borne pour conducteurs extérieurs	70
Jeu de barres, contacts embrochables ou débrochables	Aucune limite. Limité par la résistance mécanique des conducteurs ou des isolateurs ou encore par les matériels qui lui sont raccordés tels que des dispositifs débrochables. Dans la pratique l'échauffement peut atteindre 125 K. Aucune obligation n'est donnée au constructeur d'indiquer la température admissible sur les jeux de barres.
Organes manuels de commande :	
en métal	15
en matériau isolant	25
Enveloppes et panneaux extérieurs accessibles :	
surfaces métalliques	30
surfaces isolantes	40

Il est important de noter que ce tableau indique des échauffements. La température de référence étant de 35 °C, il convient d'ajouter cette valeur pour en déduire les températures maximales.

12 • ENSEMBLES D'APPAREILLAGE À BASSE TENSION

Un ensemble d'appareillage basse tension regroupe toutes les fonctions de répartitions de l'énergie électrique, en assurant les fonctions de protection, commande, régulation, mesure, surveillance... Nous distinguerons plusieurs catégories de ces ensembles :

- Les armoires et coffrets d'installation : ce sont des tableaux ou tableaux réalisés sur site par un installateur. Le câblage de ceux-ci fait partie intégrante de l'installation et doit répondre à la norme NF C15-100.
- Les équipements électriques des machines qui comprennent un ensemble de dispositifs de commandes logés dans un compartiment de machine ou un coffret ou armoire indépendante, également les organes de détection de mouvement, de mesure ou de sécurité ainsi que les pupitres de commande. Ces équipements sont réalisés selon la norme EN 60204-1. Les armoires de commandes peuvent être réalisées selon le troisième type.
- Les ensembles d'appareillage à basse tension qui sont exécutés sous la responsabilité d'un constructeur. Cette catégorie se distingue elle-même en deux versions :
 - les ensembles de série (ES) encore appelés en anglais TTA (*Type Tested Assembly*). La conception, la construction et les essais de ces ensembles sont décrits par la norme EN 60439-1. Leur principe consiste à ce que leur constructeur crée des standards de construction dont les types ont été entièrement essayés. Chaque ensemble doit être conforme à ces standards de construction ;
 - les ensembles dérivés de série (EDS) encore appelés PTTA (*Partially Type Tested Assembly*). Ces ensembles utilisent seulement certaines parties conformes à des types ou concepts qui ont été soumis à des essais. D'autres doivent être vérifiés par calculs ou comparaison à des parties connues.
- Les canalisations préfabriquées ont un rôle soit de simple transport en concurrence avec les câbles, soit de tableaux de répartition dont le jeu de barres se répartirait sur une grande partie des bâtiments. Ces canalisations sont une variante des ensembles de série. Ils doivent être conformes à la norme EN 60439-2.

Dans ce chapitre nous décrivons dans un premier temps les ensembles de série et dérivés de série type tableaux selon la norme EN 60439-1. Pour simplifier la lecture, nous les appellerons par leur nom générique de « tableau » ou encore « ensemble ». Nous décrivons dans un deuxième temps, les canalisations préfabriquées selon les normes EN 60439-2.

12.1 Enveloppes

Les enveloppes enferment les ensembles d'appareillage. Elles ont essentiellement un rôle de protections. Celles-ci sont de trois ordres :

- protection de l'appareillage contre les risques d'agressions de l'environnement ;
- protection des personnes contre l'accès direct aux parties sous tensions ;
- protection des personnes contre l'accès indirect aux parties sous tensions.

Il est nécessaire, pour comprendre les caractéristiques des tableaux, d'expliquer les conditions de ces protections.

12.1.1 Protection des personnes contre les risques d'agression de l'environnement. Code IP

La norme CEI 60529 propose une codification permettant de décrire de façon simple et conventionnelle le degré de protection contre l'introduction de corps solides ou de liquides. Le code se présente sous forme de deux chiffres précédés des lettres « IP », par exemple IP32, IP54... Le premier chiffre caractéristique décrit le degré de protection contre la pénétration de corps solides, le second, contre la pénétration de liquides.

■ Protection contre la pénétration de corps solides étrangers

La signification du premier chiffre caractéristique du code IP est donnée par le **tableau 12.1**.

Tableau 12.1 – Premier chiffre du code IP : protection contre la pénétration de corps solides.

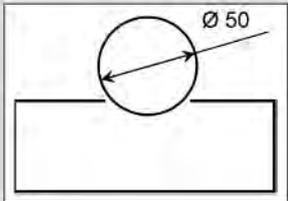
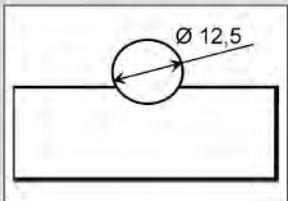
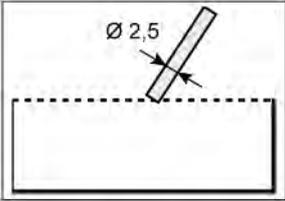
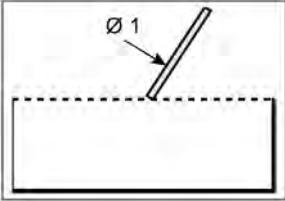
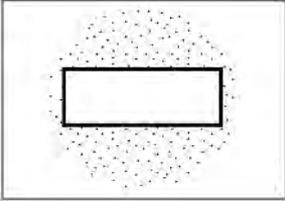
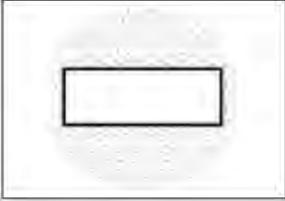
Code IP	Protection contre la pénétration de corps solides étrangers	Illustration
IP0X	Aucune protection	
IP1X	De diamètre ≥ 50 mm	
IP2X	De diamètre $\geq 12,5$ mm	

Tableau 12.1 – Premier chiffre du code IP : protection contre la pénétration de corps solides. (Suite)

Code IP	Protection contre la pénétration de corps solides étrangers	Illustration
IP3X	De diamètre $\geq 2,5$ mm	
IP4X	De diamètre ≥ 1 mm	
IP5X	Protégé contre la poussière : L'introduction de poussière est possible mais ne doit pas nuire au bon fonctionnement du matériel	
IP6X	Étanche à la poussière : Aucune pénétration de poussière	

REMARQUE

Pour les chiffres caractéristiques 5 et 6, la norme propose deux catégories d'essais :

- catégorie 1 : l'essai est réalisé en maintenant une légère dépression dans l'enveloppe ;
- catégorie 2 : l'essai est réalisé sans différence de pression interne et externe.

La norme CEI 60529 étant une norme-cadre, ne désigne pas les cas ni les matériels pour lesquels tels essais doivent être effectués. Cela est le rôle des normes spécifiques applicables aux matériels ou ensembles. Ainsi, pour les canalisations préfabriquées, c'est l'essai de catégorie 2 qui est demandé, étant le plus représentatif des conditions d'usage.

■ **Protection contre la pénétration de liquides**

Le second chiffre caractéristique classe le niveau de protection contre la pénétration d'eau (**tableau 12.2**).

REMARQUE

Pour les ensembles d'appareillage à basse tension, ces degrés de protection ne signifient pas qu'aucune pénétration d'eau soit observée. Si une quantité limitée d'eau arrive à pénétrer, son effet ne doit avoir aucune conséquence pour le fonctionnement ou la longévité des matériels.

Tableau 12.2 – Deuxième chiffre du code IP : pénétration contre la protection d'eau.

Code IP	Protection contre la pénétration d'eau	Illustration
IPX0	Aucune protection	
IPX1	Protégé contre des chutes verticales de gouttes d'eau	
IPX2	Protégé contre des chutes verticales de gouttes d'eau, avec une enveloppe inclinée de 15°	
IPX3	Protégé contre une pluie fine faisant un angle de 60° maximum par rapport à la verticale	
IPX4	Protégé contre les projections d'eau en toutes directions	
IPX5	Protégé contre les jets d'eau en toutes directions	
IPX6	Protégé contre les jets d'eau puissants en toutes directions	

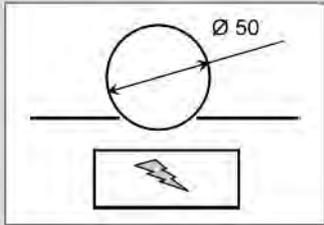
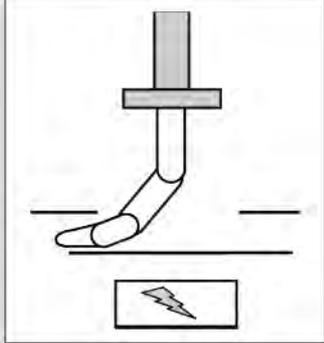
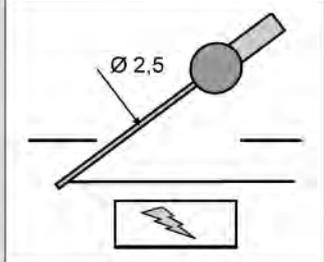
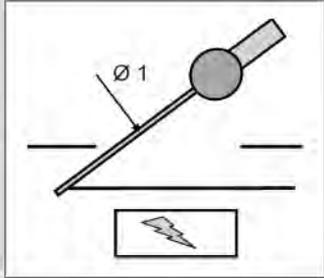
12.1.2 Protection des personnes contre l'accès direct aux parties sous tension

Le but de cette protection est d'éviter ou d'empêcher qu'une personne vienne à toucher accidentellement ou volontairement une partie active sous une tension dangereuse, supérieure à la « très basse tension ». Cette protection s'applique aux enveloppes et aux barrières.

Le premier chiffre caractéristique du code IP a servi longtemps – et sert encore – à définir le niveau de protection contre l'accès aux parties actives sous tension. Ainsi le code IP20 définit une protection contre l'accès au doigt articulé, le code IP30 définit une protection contre l'introduction d'un outil.

Toutefois ces descriptions sont restrictives. En effet il est possible d'avoir un code IP10, mais par un jeu de chicanes ou de dispositions appropriées, avoir de façon tout à fait satisfaisante une protection contre tout accès au doigt, voire même contre l'introduction d'outil. C'est pourquoi la norme CEI 60529 inclut maintenant une lettre additionnelle notée de A à D définissant le degré de protection contre l'accès aux parties sous tension.

Tableau 12.3 – Lettre additionnelle définissant le degré de protection contre l'accès aux parties sous tension.

Code IP	Protection contre l'accès aux parties dangereuses	Illustration
IPXXA	Protégé contre l'accès au dos de la main : Le calibre d'essai, sphère de diamètre 50 mm, doit rester à une distance suffisante des parties sous tension.	
IPXXB	Protégé contre l'accès avec un doigt : Le doigt d'épreuve de diamètre 12 mm, doit rester à une distance suffisante des parties sous tension.	
IPXXC	Protégé contre l'accès avec un outil : Le calibre d'essai de diamètre 2,5 mm et 100 mm de long, doit rester à une distance suffisante des parties sous tension.	
IPXXD	Protégé contre l'accès avec un fil : Le calibre d'essai de diamètre 1 mm et 100 mm de long, doit rester à une distance suffisante des parties sous tension.	

L'utilisation pratique de ces degrés de protection est d'adapter leur niveau à la qualification des personnes pouvant opérer sur ou à proximité des ensembles à basse tension.

Ainsi, le degré IPXXA est considéré comme un minimum de protection. Il est applicable à tout ensemble « ouvert », c'est-à-dire un châssis ou une armoire ouverte mais restant sous tension. Ce degré protège tout intervenant, même qualifié, contre tout risque de contact suite à un mouvement maladroit.

Le degré IPXXB est le niveau de protection imposé pour tout équipement à caractère « professionnel », c'est-à-dire accessible par des personnes d'exploitation ayant reçu un minimum de formation, mais n'étant pas habilité à opérer à proximité de parties sous tension.

Le degré IPXXC est le niveau à atteindre pour les équipements accessibles aux personnes « ordinaires », locaux domestiques par exemple.

Le degré IPXXD est prescrit pour les parties supérieures des armoires électriques, ou pour les ensembles de classe II (voir ci-après).

12.1.3 Degrés de protection des enveloppes contre les impacts mécaniques. Code IK

La norme française avait introduit un troisième chiffre au code IP pour décrire le niveau de résistance mécanique des enveloppes. L'essai consiste à frapper l'enveloppe par une masse de poids et de forme définie, lancée d'une hauteur spécifiée. L'impact provoqué se mesure donc par le travail de cette masse en kg.m ou plus exactement en joules pour utiliser une mesure normalisée. Le choix de la cible de l'impact est laissé au soin du laboratoire, il choisira les points jugés les plus faibles.

Les instances européennes et internationales n'ont pas retenu le principe du troisième chiffre dans la norme EN 60529. Toutefois une norme spécifique a été rédigée : EN 50102. Elle décrit les conditions d'essai et définit un code de résultats : code IK. À chaque code IK correspond un niveau d'essai exprimé en joules, ainsi que la méthode d'application du choc.

La norme EN 50102 est une norme de description d'essai, et non une norme de spécification de résultat. Il appartient aux rédacteurs des normes d'appareillages ou produits de spécifier les codes de protection requis, et également de décrire les résultats admis pour les appareils spécifiés. Cela signifie qu'un cahier des charges ne peut pas mentionner un code IK pour des matériels dont la norme concernant le produit ne prévoit pas cette caractéristique. Par exemple, spécifier qu'un disjoncteur doit avoir un code IK07 ne peut s'appliquer qu'à l'enveloppe d'un appareil sous coffret et non pas au disjoncteur lui-même.

Pour les enveloppes destinées à recevoir des matériels électriques, le résultat après l'essai doit conserver les caractéristiques initiales de protection, le code IP en particulier.

Tableau 12.4 – Correspondance entre le code IK et l'énergie d'impact.

Code IK	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
Énergie d'impact (en J)	–	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20

12.1.4 Protection des personnes contre l'accès indirect aux parties sous tensions

Ce sujet concerne des ensembles complets sous enveloppe en état d'utilisation. Il concerne aussi des appareils électriques tels que les outils électriques portatifs ou appareils électroménagers. Ces ensembles, afin qu'ils soient utilisables en toute sécurité, doivent permettre un raccordement au type d'alimentation auquel il est destiné, en assurant, sans autre disposition, une protection contre les contacts indirects.

Un bref rappel : on appelle contact indirect, le risque soumis à une personne ou un animal touchant une partie externe d'un appareil ou ensemble électrique pouvant être mis sous tension suite à un défaut d'isolement.

La norme EN 61140 décrit quatre classes de protection contre les chocs électriques.

■ Matériels de classe 0

Ces matériels ont une enveloppe conductrice et sont prévus pour être raccordés à un réseau basse tension (> 50 V). Une isolation principale est prévue entre les parties actives et l'enveloppe. Un défaut d'isolement est plausible, mais aucune disposition n'est prévue pour raccorder les parties conductrices accessibles à la terre. Ces matériels étaient admis pour une utilisation dans une enceinte sèche, ne comportant aucune partie métallique. Cette situation étant irréaliste, **cette classe est désormais interdite.**

■ Matériels de classe I

Ces matériels ont une enveloppe conductrice et sont prévus pour être raccordés à un réseau basse tension (> 50 V). Une isolation principale est prévue entre les parties actives et l'enveloppe, un défaut d'isolement est plausible. Les parties conductrices sont reliées entre elles et à une « borne de terre » destinée à être raccordée au conducteur de protection de l'installation. Par exemple un outil portatif de classe I dispose d'une fiche de courant à 3 broches : phase, neutre et terre.

■ Matériels de classe II

Ces matériels sont conçus de telle façon qu'un défaut d'isolement des parties actives ne puisse provoquer une mise sous tension des parties accessibles. Pour ce faire trois techniques sont utilisées :

□ Double isolation

Ce principe consiste à concevoir un appareil de telle façon qu'un défaut d'isolement n'atteigne que des éléments métalliques internes, ceux-ci étant isolés des parties externes par une isolation complémentaire. Ce serait le cas d'une perceuse dont la partie métallique (mandrin...) est isolée par un accouplement isolant. En cas de défaut dans les enroulements du moteur ou des circuits d'alimentation et de variation de vitesse, aucune tension ne peut se propager vers une partie conductrice accessible.

□ Isolation totale

Ce principe consiste à concevoir un appareil ou ensemble dont les parties externes accessibles sont exclusivement réalisées en matières isolantes. De ce fait, aucune

tension même suite à un défaut interne, ne peut se transmettre à l'extérieur. Bien sûr cette conception interdit toute pièce métallique qui traverserait l'enveloppe (vis ou rivet).

□ Isolation renforcée

Ce principe, contrairement aux deux précédents, a pour objectif de rendre improbable un défaut d'isolement. Les méthodes répondant à cet objectif sont de deux ordres : éloignement des parties actives des masses voisines ; isolation complémentaire des conducteurs.

Les matériels de classe II sont signalés par le pictogramme : .

■ Matériels de classe III

Ces matériels utilisent exclusivement une « très basse tension de sécurité » TBTS, c'est-à-dire inférieure à 50 V. Ces matériels ne doivent pas engendrer de tensions supérieures (par exemple TV à écran cathodique). Ils doivent être alimentés par une source TBTS. Ils sont signalés par le pictogramme : .

REMARQUE

Certaines catégories d'appareils disposent d'une alimentation Ph-N + Terre, bien que leur conception s'apparente à la classe II voire la classe III. Par exemple les ordinateurs et leurs périphériques, ou certains matériels audio. La « terre », pour ces matériels, a surtout un but de fixer le potentiel des masses afin qu'elles soient interconnectées dans le but d'éviter des influences électromagnétiques. Ils doivent être traités comme des matériels de classe I.

Les matériels de classe II et III ne doivent pas comporter de conducteur de terre. Les parties conductrices des matériels de ces classes ne doivent pas être mises à la terre ni interconnectées.

12.2 Différents types de tableaux

Les tableaux se distinguent à première vue par la constitution de leur enveloppe. Mais on remarque très vite que la technologie de celle-ci est complètement liée à une catégorie d'application définie, ainsi qu'à certaines techniques de fabrication industrielles. Ces tableaux sont tous destinés à accueillir des **fonctions électriques**, notions que nous avons amplement décrites en partie B.

12.2.1 Châssis

Ce type de tableau est installé dans des établissements industriels utilisant une grande concentration de commandes moteur. Ceux-ci sont commandés par des processus automatiques mettant en jeu une haute interaction entre les différents mouvements. Ces châssis sont installés en salle technique accessible uniquement à des personnels hautement qualifiés. Ils sont demandés dans des industries telles que la sidérurgie, les cimenteries, les papeteries ou les sucreries. Les moteurs sont très majoritairement de petite puissance ($\leq 7,5$ kW), à part quelques gros départs, les puissances n'excèdent pas 18,5 kW. Les moteurs sont utilisés en grande majorité pour des mouvements de manutention. Un nombre croissant d'entre eux sont contrôlés par

des démarreurs et des variateurs électroniques. Ceux-ci dégagent beaucoup de chaleur et demandent une ventilation énergique. D'autre part il n'est pas question d'arrêter la production pour effectuer un réglage, une mesure, ou même un échange simple de composant. Ces opérations doivent se faire par coupure partielles des circuits. Toutes ces raisons justifient le choix de ce type de tableaux ouverts.

12.2.2 Coffrets et armoires



Figure 12.1 – Armoire électrique.

Un coffret est une enveloppe habituellement à fixation murale, tandis qu'une armoire est fixée au sol. Leurs usages sont quasi universels. Ils sont principalement utilisés en coffrets ou armoires de commande de machines, de processus de fabrication ou de manutention. Ceux-ci comprennent :

- un interrupteur général ;
- une fonction d'arrêt d'urgence assurée par cet interrupteur général ou un contacteur général ;
- différents démarreurs moteurs, à contacteurs ou électroniques ;
- des contacteurs de commandes d'électrovannes, d'éclairage, de chauffage, etc. ;
- des contacteurs auxiliaires remplacés presque totalement, maintenant par des automates programmables ;
- des interfaces et relais de mesures ;
- et enfin trois groupes de bornes : borniers de puissance, de commande et de mesure.

Sur porte sont encastrés :

- des boutons poussoirs et sélecteurs de commande ;
- des appareils indicateurs de mesure ;
- et de plus en plus fréquemment des panneaux électroniques de visualisation et de commande.

12.2.3 Tableaux modulaires

Il est convenu de nommer ainsi les tableaux prévus pour le montage de des appareillages dit « modulaires ». Ce type d'appareillages a deux points communs : un montage par enclipsage sur un rail de type « chapeau » de 35 mm, et un profil normalisé selon la norme DIN 43880, permettant ainsi un montage homogène côte à côte. Ces appareillages ont une intensité inférieure ou égale à 125 A. Il est utile de noter que le pas d'un pôle est normalement de 17,5 mm. Cependant beaucoup de constructeurs utilisent un pas de 18 mm.

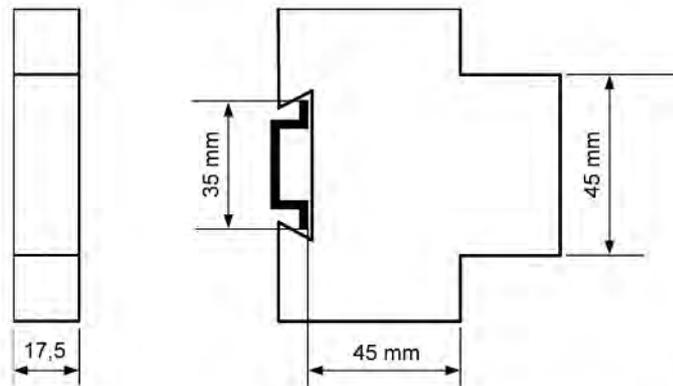


Figure 12.2 – Dimension des appareils « modulaires » selon DIN 43880.

Ces tableaux sont très généralement constitués :

- d'une enveloppe ;
- d'unités de montage, elles-mêmes constituées d'un système de fixation : rail ou platine et d'un plastron de protection contre l'accès aux parties sous tension. Ces unités sont spécialisées pour une utilisation définie :
 - jeux de barres,
 - appareillage « modulaire » à commande manuelle,
 - appareillages à fixation enclipsable non accessible (contacteurs, relais, interfaces...),
 - appareillage non « modulaire » à fixation par vis,
 - borniers de raccordement et/ou passage des câbles de raccordement.

Il doit être prévu un système d'étiquettes fixé durablement sur les plastrons. Ainsi en situation d'exploitation ces tableaux assurent :

- la protection contre l'accès aux parties sous tension ;
- l'accès aux commandes d'exploitation : marche, arrêt, réarmement, test (des différentiels), échange de cartouches fusibles ;
- la visibilité de la fonction de chaque circuit (PC Cuisine, éclairage extérieur...) ;
- les calibres de réglage des disjoncteurs.

Ces tableaux sont utilisés dans des locaux collectifs d'habitation, de bureaux, d'enseignement... Dans ces cas ils sont installés dans des volumes techniques fermés à clé. Si ces volumes n'existent pas, ou pour la nécessité d'assurer une étanchéité plus élevée, ils sont équipés d'une porte complémentaire fermée à clé.

Copyright © 2008 Dumod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le
 © Dumod - La photocopie non autorisée est un délit. de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus
 aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

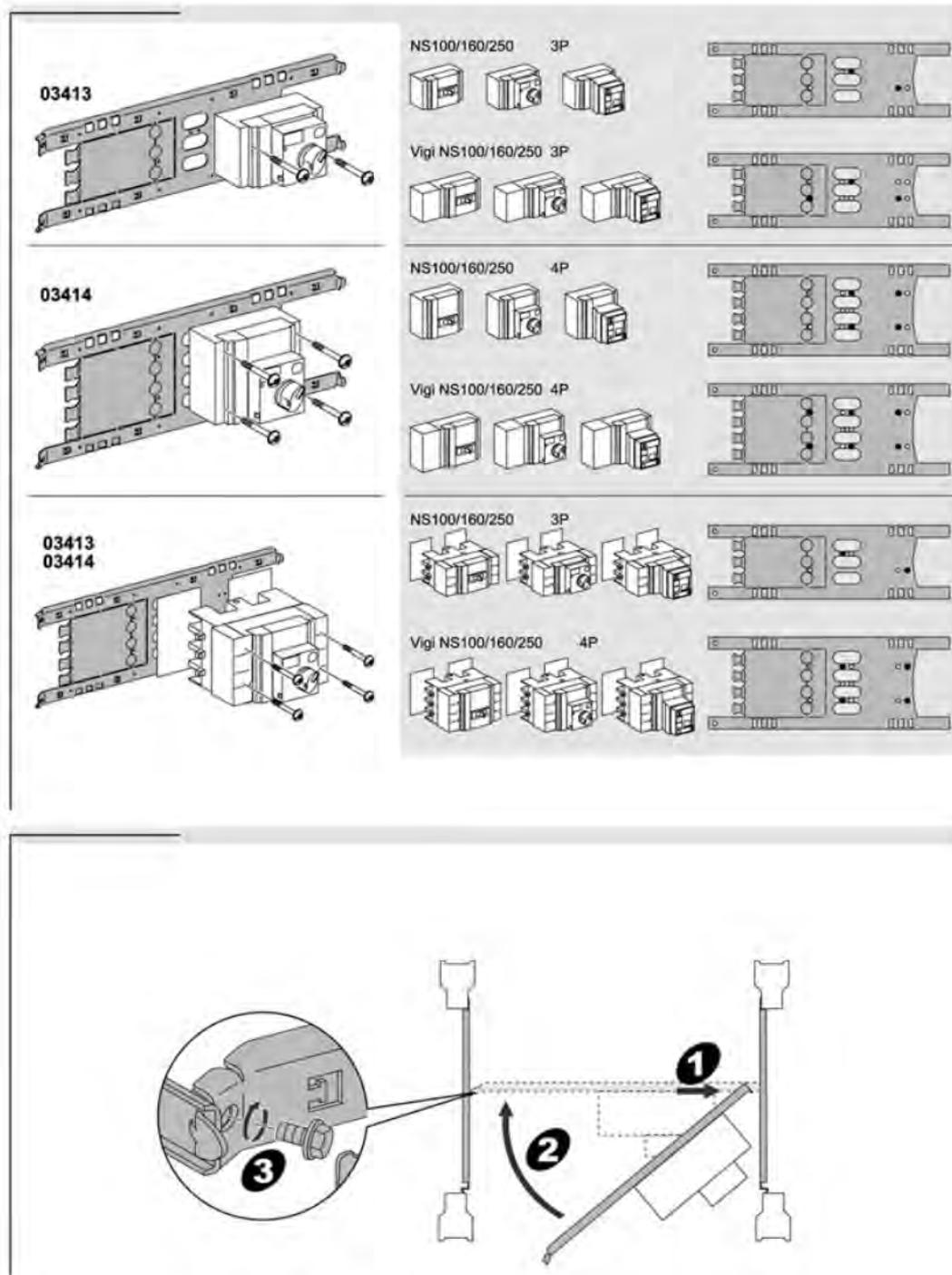


Figure 12.3 – Unités de montage pour tableaux modulaires (d'après Schneider Electric).

12.2.4 Ensembles à unités fonctionnelles



Figure 12.4 – Tableau Schneider Electric.

■ Description de principe

Une unité fonctionnelle est une « partie d'un ensemble comprenant tous les éléments mécaniques et électriques qui concourent à l'exécution d'une seule fonction »¹.
On distingue :

□ Unités d'arrivée

Ce sont les unités au travers desquelles l'énergie est fournie au tableau.
Celles-ci ont pour fonction principale, la mise sous tension ou hors tension générale du tableau, de manière manuelle ou à distance. Il peut être ajouté la fonction

1. Définition de la norme EN 60439-1.

de protection de la source, lorsqu'il s'agit d'une alimentation provenant d'un transformateur ou d'un groupe électrogène. Des fonctions de mesure sont couramment incluses (tension, intensité, facteur de puissance, consommation d'énergie...).

Unités de départ

Ce sont les unités au travers desquelles l'énergie est distribuée vers des circuits de départs. Ces départs sont majoritairement de deux ordres : les départs moteurs et les départs lignes.

Départs moteurs

Les départs moteurs sont constitués de démarreurs moteurs, électromécaniques ou électroniques, ainsi que toutes les fonctions auxiliaires nécessaires à la commande, et à la surveillance du récepteur contrôlé.

Par exemple un *départ pompe* comprendra toutes les fonctions électriques nécessaires à la commande et à la protection du moteur de la pompe, mais il peut, dans le cas de grandes puissances, comprendre aussi l'appareillage nécessaire pour surveiller la pompe elle-même, en vue de sa protection mécanique et du contrôle du résultat de son action, tel que le contrôle du sens de rotation, la détection de cavitation, le contrôle de pression ou de niveau, de la température des paliers...

Départs lignes

Les départs lignes sont constitués au minimum d'un disjoncteur ou d'un interrupteur à fusibles. Pour de grandes installations, il est demandé fréquemment de pouvoir surveiller la consommation des départs ainsi qu'un délestage/relestage éventuel. À ces fins, les disjoncteurs sont dotés d'une commande électrique. Des fonctions de mesure et de transmission de données sont quelquefois intégrées. La gestion et la surveillance de ces départs sont assurées par un poste de surveillance équipé d'une « gestion technique centralisée » (GTC). Celle-ci dispose d'un automate programmable principal et d'ordinateurs de gestion de données. Ceux-ci assurent généralement un contrôle selon une logique préprogrammée (par exemple délestage à heure prédéterminée selon des conditions définies). Mais une « prise en main » depuis le poste est possible.

La liaison entre les tableaux de distribution et cette GTC est maintenant faite par réseau de données (les plus utilisés sont Modbus ou Profibus).

En cas de difficultés de commande à distance à partir de la GTC, une disposition de sélection de commande locale (depuis le tableau) ou à distance (depuis la GTC) est toujours demandée. Ces dispositions font que les départs lignes des tableaux de distribution pour des grandes installations sont souvent richement équipés et très complexes.

Unités fonctionnelles particulières

Quelques unités fonctionnelles ont un rôle particulier. Parmi celles-ci, citons les **couplages de sources** dont le rôle est de permettre la mise en parallèle de deux sources identiques, de remplacer l'une par l'autre ou de délester tout une partie de départs. Le chapitre 1 donne des exemples de configurations de réseaux de distribution.

On peut également considérer qu'une fonction de transfert de sources appelée souvent fonction « **normal-secours** » forme une même unité fonctionnelle.

■ Groupes fonctionnels

Les groupes fonctionnels sont des ensembles de plusieurs unités fonctionnelles qui sont interconnectées entre elles pour exécuter leurs fonctions. L'exemple typique de groupe fonctionnel est une unité de régulation de facteur de puissance qui comprend plusieurs étages d'unités de commande de condensateurs, l'ensemble est piloté par un régulateur de $\cos\Phi$.

■ Réalisation des unités fonctionnelles

Le principe d'unité ou de groupe fonctionnel ne s'applique pas obligatoirement à des unités physiquement indépendantes. Dans le concept des ensembles de séries ou dérivés de série, une unité fonctionnelle doit faire l'objet, chez un constructeur, d'un schéma standard, d'une sélection de matériel approprié à un champ d'application défini et d'un plan ou d'une règle de disposition.

Pour les ensembles de série, ces éléments doivent se référer à des modèles qui ont été essayés et dont les résultats sont enregistrés.

Pour les ensembles dérivés de série, ces éléments doivent se référer aux caractéristiques des catalogues produits : leurs limites électriques d'emploi, leur mode de montage autorisé, leurs conditions-limites d'environnement (température...), ainsi que leurs limites de coordination. Il est souhaitable que ces vérifications soient enregistrées dans un document de référence.

Afin de rationaliser leur fabrication, et de faciliter tout échange ou extensions, les constructeurs ont établi des catalogues de systèmes réunissant l'ensemble des éléments nécessaires à la constitution d'une gamme tableau destinée à un usage défini. Ces éléments sont en principe physiquement indépendants. Ils permettent une bonne rationalisation de la fabrication. Éventuellement certains éléments peuvent être montés sur le site d'exploitation, par le service intervention du constructeur, ou par l'utilisateur lui-même, moyennant une explication adaptée.

12.2.5 Conception des unités fonctionnelles

■ Ensembles à isolation totale

Il est intéressant de présenter une catégorie un peu à part dans les offres des tableaux à unités fonctionnelles. Ce sont les **tableaux à isolation totale**. Leur application privilégiée est d'être installés en milieux humides et/ou corrosifs. En effet leur enveloppe est constituée de modules de coffrets isolants étanches IP55 et forme un ensemble de classe II. Ces modules sont en général disponibles chez les constructeurs en tant qu'unités fonctionnelles. Des unités de jeux de barres et de raccordement sont également disponibles, ce qui permet la constitution d'ensembles de distribution et/ou de commande moteur, jusqu'à 1 600 A, pour la plupart des constructeurs.

La particularité des enveloppes de haute étanchéité et isolantes électriquement et aussi thermiquement, confère une faible dissipation thermique. En conséquence les matériels « montent » à des températures plus hautes. Pour résoudre ce problème, soit le constructeur réalise des essais thermiques dans ces conditions de montage,

soit le fabricant des coffrets indique la puissance dissipable à l'intérieur des coffrets pour un échauffement donné (en K).

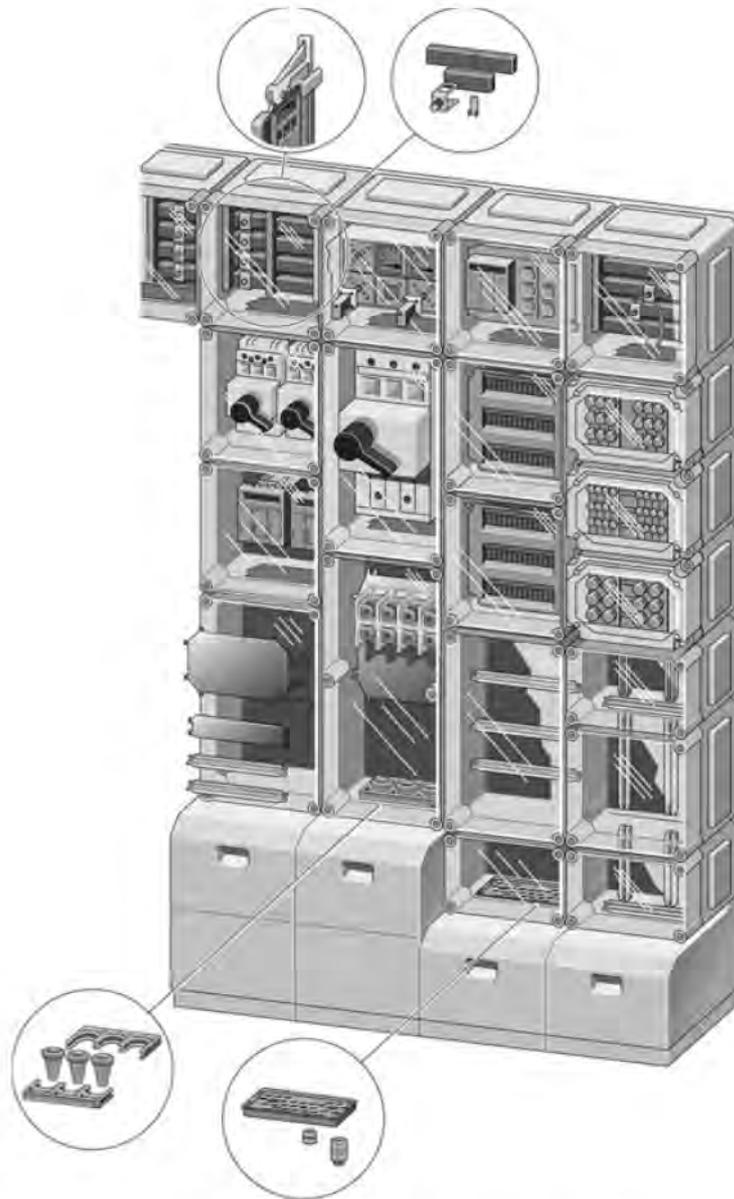


Figure 12.5 – Tableau à isolation totale.

■ Modes de connexion et de montage

Ce thème a fait et fait encore l'objet de nombreuses compétitions de terminologies de la part des constructeurs pour expliquer que « leur nouvelle gamme apporte une innovation digne d'intérêt ». Nous détaillons ici tout ce qui peut décrire les modes de montages et de connexion des unités fonctionnelles nous les noterons par la suite UF. Nous n'utiliserons pas toujours les termes utilisés dans les catalogues, ni ceux de la norme qui ne donnent pas entière satisfaction.

■ Modes de montage

- **Montage fixe** : les UF ne peuvent être déposées qu'avec l'aide d'un outil. Elles n'ont que deux positions : en place ou déposées.
- **Montage amovible** : les UF peuvent être déposées sans l'aide d'outil. Toutefois pour des objectifs de sécurité, des dispositifs de verrouillages sont intégrés pour empêcher certaines manœuvres. Ces UF ont deux positions : en place et déposées.
- **Montage guidé** : les UF sont amovibles et montées sur un dispositif à glissières permettant d'avoir au moins deux positions d'utilisation en plus de la position retirée. Dans le vocabulaire utilisé dans les catalogues, il est convenu de nommer :
 - **chariot**, un dispositif de montage guidé d'une UF, non solidaire d'une face avant ;
 - **tiroir**, un dispositif de montage guidé d'une UF, solidaire d'une face avant.

■ Connexions

Trois connexions doivent être considérées :

- **Connexions amont** : ce sont les connexions d'alimentation des UF. Elles ont pour particularité de rester sous tension lorsque l'UF n'est plus en place ou si elle est à l'arrêt. En toutes positions de l'UF, cette connexion doit être protégée contre un accès aux parties sous tension de degré au moins IPxxB.
- **Connexions aval** : ce sont les connexions de raccordement des câbles de départs. Ces connexions sont mises hors tension par la manœuvre d'ouverture du dispositif de sectionnement de l'UF.
- **Connexions auxiliaires** : ce sont les connexions des circuits auxiliaires de commande, de retour d'information et de mesures. Plusieurs niveaux de tension peuvent être utilisés dans ce type de connexions. Toutes les polarités ne sont pas coupées par le dispositif de sectionnement de l'UF.

■ Modes de connexion

Pour chacune de ces connexions quatre modes peuvent être utilisés :

- **Mode fixe** : la connexion ne peut être établie ou séparée qu'à l'aide d'un outil.
- **Mode connecteur** : la connexion est établie à l'aide d'un connecteur, fonctionnant comme une prise de courant, qui n'est pas solidaire du dispositif de montage de l'UF.
- **Mode broches** : la connexion est établie à l'aide de broches solidaires de dispositif de montage de l'UF.
- **Mode glissière** : les contacts du dispositif de connexion ou au moins certains d'entre eux, sont établis sur deux positions d'un dispositif de montage guidé.

On imagine bien qu'en combinant les possibilités de montage de la partie mécanique avec les modes de connexion, on arrive à un nombre impressionnant de possibilités. C'est dans ce contexte que nous présentons ici quelques modes de montage et connexions.

□ Connexion débrosable

Une connexion débrosable est une connexion à broches solidaire d'un dispositif de montage guidé.

Lorsque le qualificatif « *débrochable* » s'applique à la connexion amont d'une UF, il signifie que deux positions stables sont assurées, et clairement identifiables :

- position en service ;
- position de sectionnement : la distance de séparation est assurée.

À ce propos, une connexion débrochable justifiant d'une fonction de sectionnement doit se représenter par ce symbole : +C- .

■ Dispositifs amovibles uniquement hors tension

Ces dispositifs permettent un montage ou démontage afin d'effectuer dans un temps très court, un échange ou une extension. Ils ont selon les définitions proposées ci-dessus, un dispositif de montage amovible et un dispositif de connexion amont à broches ou à connecteur. Cependant les manœuvres de montage ou de démontage ne peuvent pas s'effectuer en assurant une sécurité suffisante : les connexions source restent accessibles et/ou elles peuvent être effectuées en charge et provoquer des arcs. Ces dispositifs sont très utiles pour la construction d'ensembles de commande de machines. Ils ne peuvent pas être utilisés en organe de sectionnement ou d'échange, en cours d'exploitation.

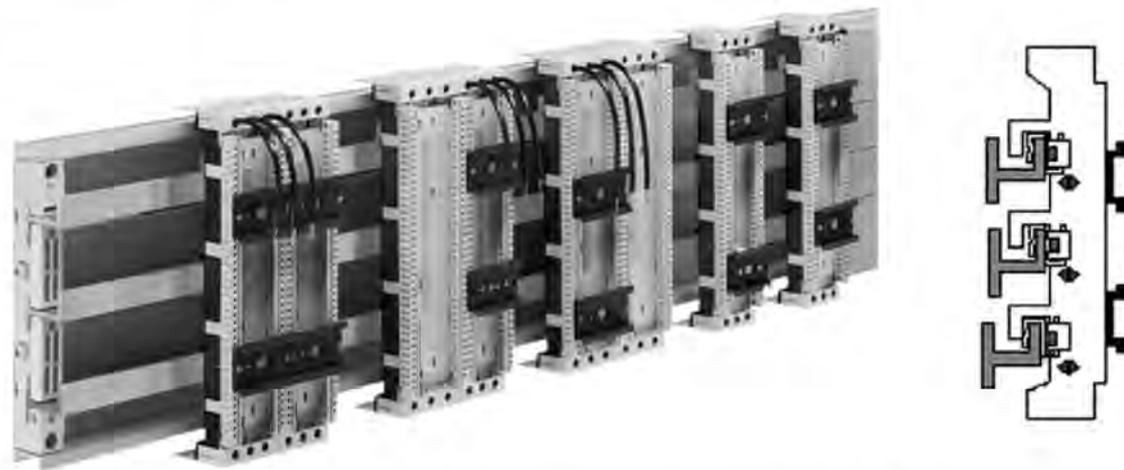


Figure 12.6 – Système de montage sur jeu de barres (Rittal).

■ Indice de mobilité

L'indice de mobilité a été introduit dans la norme EN 60439-1. Il est constitué de trois lettres représentant les modes de connexions amont, aval et auxiliaire d'une unité fonctionnelle. Pour chacune de ces trois connexions, trois possibilités sont décrites, symbolisées par une lettre :

- F : connexion fixe ;
- D : connexion déconnectable établie à l'aide d'un connecteur, manœuvrable sans outil ;
- W : connexion débrochable (*withdrawable* en anglais).

Ainsi un indice de mobilité FFF désigne une UF fixe, tandis qu'un indice WWW désigne une UF débrochable.

Tableau 12.5 – Indices de mobilité selon EN 60439-1.

	Valeur de X			
	Fonction	F	D	W
X**	Mode de connexion AMONT des unités fonctionnelles	Ne peut être connectée ou déconnectée qu'à l'aide d'outils.	Peut être connectée ou déconnectée sans l'aide d'outils.	Peut être amenée à une position connectée ou en position de sectionnement tout en restant relié mécaniquement à l'ensemble.
X	Mode de connexion AVAL des unités fonctionnelles	Ne peut être connectée ou déconnectée qu'à l'aide d'outils.	Peut être connectée ou déconnectée sans l'aide d'outils.	Peut être amenée à une position connectée ou en position de sectionnement tout en restant relié mécaniquement à l'ensemble.
**X	Mode de connexion des CIRCUITS AUXILIAIRES des unités fonctionnelles	Ne peut être connectée ou déconnectée qu'à l'aide d'outils.	Peut être connectée ou déconnectée sans l'aide d'outils.	Peut être amenée à une position connectée, en position de test ou en position de sectionnement tout en restant relié mécaniquement à l'ensemble, par simple manœuvre de l'UF.

12.2.6 Accès aux équipements

Cette rubrique concerne :

- les distances de passage de services et de dégagement autour des tableaux ;
- l'accès aux organes externes des tableaux en vue d'une conduite et surveillance « ordinaire » : commandes de marche et d'arrêt et leur contrôle et de leur installation : position des bornes par exemple ;
- l'accès aux appareillages en vue de leur réglage, de leur contrôle qualité ou de leur échange.

■ Distances de passage de services

La norme NF C15-100 impose pour les tableaux fermés une largeur de passage devant les organes de commande et tout obstacle ou paroi d'au moins de 0,7 m. La norme recommande en outre les distances suivantes autour des tableaux de puissance distribuée > 250 kVA :

- passage devant les tableaux : 1,5 m ;
- dégagement en partie supérieure : 2,5 m ;
- passage arrière en cas de raccordement arrière : 0,7 m.

■ Accès aux organes externes et aux raccordements

Les organes de commande tels que les manettes ou leviers des interrupteurs ou disjoncteurs, les boutons poussoirs de commandes de marche et d'arrêt, les

sélecteurs de mode de fonctionnement, etc., doivent être situés à une hauteur d'au moins 0,4 m et au plus à 2 m¹. Pour les appareils indicateurs, une distance légèrement supérieure est tolérée, mais non imposée. Par exemple 2,2 m est considéré comme acceptable. Les borniers de raccordement doivent être installés au moins à 0,2 m du niveau du sol, leurs distances par rapport aux parois doivent permettre une accessibilité suffisante. Une distance de 10 cm pour un bornier de contrôle, et une valeur de 15 à 20 cm pour les borniers de puissance sont souvent considérées comme minimales. L'organe de manœuvre d'un interrupteur général doit se situer à une hauteur comprise entre 0,8 m et 1,6 m.



Figure 12.7 – Intervention dans une armoire.

■ Accès aux appareillages en vue de leur maintenance

Il s'agit ici de connaître dans quelles conditions un opérateur peut avoir accès aux appareillages en vue d'effectuer un réglage, une mesure ou un échange. L'accessibilité physique est un élément, mais le risque d'avoir accès aux parties sous tension, ainsi que celui de créer des perturbations à des parties voisines, sont les critères décisifs. La propriété que présentent pratiquement tous les appareils modernes d'assurer une protection contre l'accès accidentel au doigt de degré IP20 ou IPxxB, résout une grande partie des problèmes d'exploitation. Dans les équipements de commande de machines ou de processus de manutention, les appareillages sont montés en armoires. De nombreux démarreurs de commande moteurs, de variateurs et de dispositifs de régulation demandent souvent des interventions de réglages et de réarmements. Ces interventions doivent être effectuées par des opérateurs formés mais en conservant toutes les meilleures conditions de sécurité.

■ Notion de disponibilité de l'énergie

Le montage en armoire conventionnelle présente de graves limites pour des exploitations d'utilisation intensive exigeant un haut niveau de disponibilité de son alimentation en énergie.

La **disponibilité de l'énergie** est le résultat de la conception globale d'une installation à être en mesure de délivrer l'énergie électrique à des récepteurs dont l'arrêt entraînerait des situations graves en termes de sécurité ou de perte économique, cela quels que soient les dysfonctionnements ou même les accidents imaginables. Les « ingrédients » nécessaires à cet objectif sont principalement :

- La **fiabilité des constituants** : leur niveau de confiance à ne tomber en panne que très rarement dépend de la qualité de leur fabrication et du choix judicieux de leurs performances en regard des conditions de leurs utilisations.
- Les **conditions de montage et câblage** des matériels : elles ne doivent pas compromettre leurs performances. Elles ne doivent pas elles-mêmes générer de risques de défaillances et doivent en outre éviter la propagation d'accidents.

Pour commenter ces propos, le non-respect des distances d'isolement, des sections de câblages insuffisantes, des connexions peu sûres (mauvais serrage, vibrations...), des torons ou goulottes de câblages trop importants et trop serrés... sont autant de facteurs de risques d'amorçages ou d'incendies générateurs d'arc internes pouvant presque à coup sûr conduire à la destruction totale d'une armoire.

- Une **division des tableaux en unités fonctionnelles** indépendantes séparées des jeux de barres d'alimentation, ainsi qu'entre elles, par des cloisons, permet de limiter considérablement les risques de propagation d'arcs ou d'incendies.
- La **redondance des circuits d'alimentation** permet de transférer l'alimentation d'énergie par d'autres voies. Ce principe est utilisé à des niveaux multiples en fonction de l'importance des conséquences d'un arrêt.
- La conception des tableaux peut permettre des **possibilités d'interventions** tout en assurant une continuité de services.
- Enfin des **tableaux communicants** permettent d'apporter à distance le maximum d'informations sur la situation technique de l'installation et des récepteurs. Les informations peuvent fournir des tendances donnant accès à des décisions

préventives d'exploitation. Elles donnent également la possibilité d'établir des bilans et historiques permettant une maintenance préventive.

12.3 Formes de séparation

Le cloisonnement interne permet de limiter la propagation d'arcs ou d'incendies aux éléments voisins. Il assure également une protection des personnels contre les risques de contacts avec les parties sous tension pendant certaines manœuvres d'interventions. La norme EN 60439-1 envisage plusieurs « formes » de cloisonnement.

Tableau 12.6 – Formes de séparation des tableaux.

Critère principal	Séparation des bornes de raccordement	Forme
Séparation des jeux de barres des unités fonctionnelles.	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs ne sont pas séparées des jeux de barres.	Forme 2a
	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs sont séparées des jeux de barres.	Forme 2b
Séparation des jeux de barres des unités fonctionnelles. Séparation des unités fonctionnelles entre elles. Séparation des unités fonctionnelles et des bornes de raccordement. Les bornes de raccordement ne sont pas séparées entre elles.	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs ne sont pas séparées des jeux de barres.	Forme 3a
	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs sont séparées des jeux de barres.	Forme 3b
Séparation des jeux de barres des unités fonctionnelles. Séparation des unités fonctionnelles entre elles. Les bornes de raccordement sont séparées entre elles.	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs sont séparées des jeux de barres. Elles sont logées dans le compartiment des unités fonctionnelles associées.	Forme 4a
	Les bornes de connexion pour les câbles extérieurs sont séparées des jeux de barres. Elles sont logées dans un compartiment individuel, séparé des unités fonctionnelles associées.	Forme 4b

Ces formes ne doivent pas être interprétées comme des degrés de qualité de conception. Elles doivent être associées à la conception des appareils. Ainsi un tableau de forme 2b équipé de matériels ayant un degré de protection IPxxB présente autant de sécurité qu'un tableau de forme 4 dont certaines parties de câblage sont effectuées en barres nues.

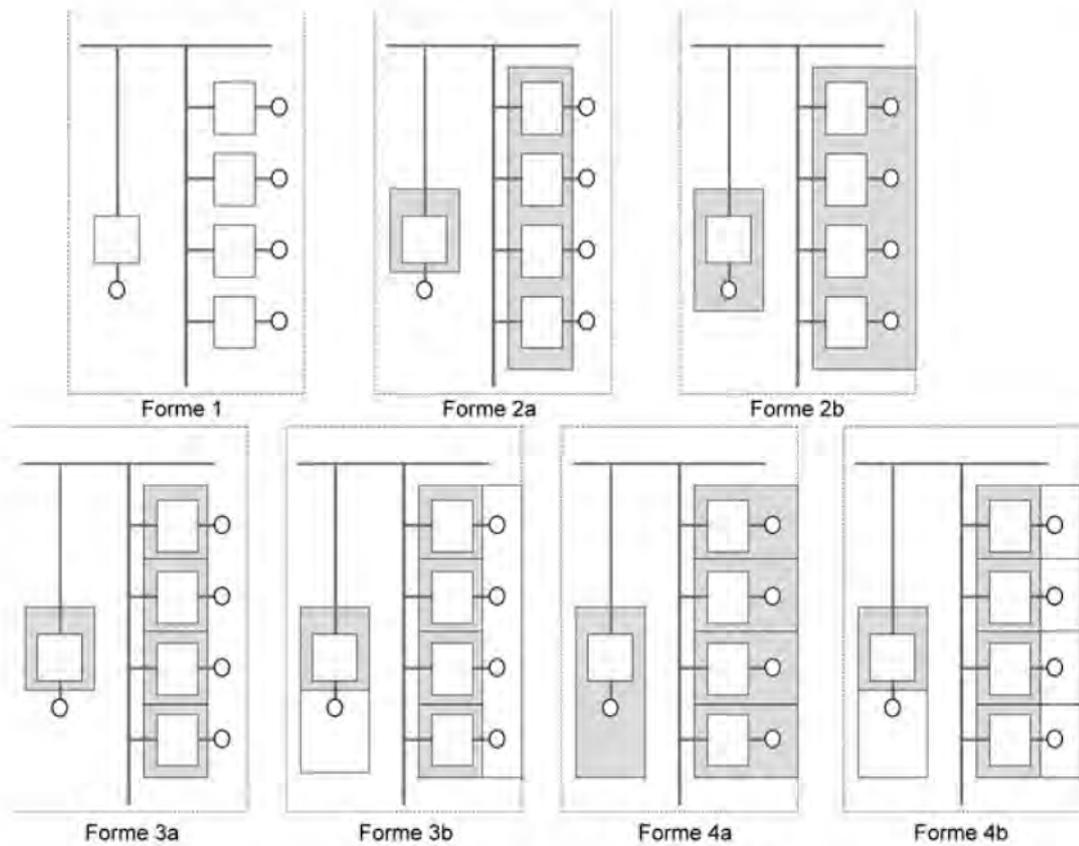


Figure 12.8 – Principes des formes de séparation.

12.4 Indices de service

Au fil de ce qui précède, nous avons décrit les tableaux par leur technologie de construction. Nous avons évoqué les châssis, les armoires, les tableaux à unités fonctionnelles fixes, déconnectables ou débrochables, les tableaux cloisonnés... La diversité des technologies est telle qu'il est difficile de comparer les services que peut apporter chacune d'entre elles.

Cette idée a été développée par les constructeurs français de tableaux au sein du GIMELEC¹. Leurs travaux ont abouti au guide UTE C63-429. Le principe est de pouvoir évaluer le type de service que peut apporter un tableau à un exploitant, sur la base de trois critères :

- accessibilité de l'ensemble en vue d'une intervention sur l'installation (**exploitation**) ;
- accessibilité de l'ensemble en vue de sa **maintenance** ;
- accessibilité de l'ensemble en vue de travaux d'une **évolution**.

La description de ces niveaux de service est résumée par un **indice de service**.

1. GIMELEC est le groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés.



Figure 12.9 – Tableau Hazemeyer IS333.

L'indice de service se note avec le préfixe IS, suivi de trois chiffres, chacun de 1 à 3. Le **tableau 12.7** en explique les significations.

■ Exploitation

Le critère d'**exploitation** met l'accent sur une fonction de sectionnement « évoluée », à savoir :

- Pour mettre hors tension un départ, en vue d'effectuer des travaux sur son installation aval, est-il nécessaire ou non de mettre hors tension l'ensemble du tableau ? La fonction de sectionnement est normalement assurée sur tous les départs en vertu de l'obligation donnée par la norme NF C15-100. Toutefois une condamnation n'est pas toujours prévue. C'est le cas des armoires de commande de machines ou de processus à haut degré d'automatisme. Il est nécessaire de comprendre le sens de « condamnation », la possibilité pour un non-électricien de se mettre en sécurité, et que personne n'annulera sa protection. (Voir partie B : fonction de sectionnement.)
- Pour vérifier ou simuler certaines fonctions d'automatismes ou d'informations, est-il possible de mettre en sécurité le circuit principal tout en conservant actifs les circuits auxiliaires ? Cette aptitude peut être assurée par tout moyen accessible habilité, à condition qu'aucune des manœuvres ne soit à un non-électricien dangereuse.

■ Maintenance

Le critère de **maintenance** décrit l'aptitude à pouvoir échanger un constituant d'une unité fonctionnelle, y compris l'organe de sectionnement en tête du départ. Cela

suppose que l'UF soit au moins amovible. Un degré « 2 » demande un indice de mobilité au moins de DFF. Un degré « 3 » demande un indice de mobilité au moins de DDE. Si les appareils offrent tous une protection IPxxB, une séparation forme 2 est suffisante, sinon une forme 3 sera nécessaire.

■ Évolution

Enfin le critère d'**évolution** envisage la possibilité de transformer un tableau en changeant au moins partiellement la combinaison des départs ou en en ajoutant d'autres. Ces possibilités s'entendent de façon « physique », c'est-à-dire qu'elles peuvent s'effectuer « mécaniquement » en toute sécurité. Toutefois, il est indispensable de vérifier, selon les instructions du constructeur, si l'intensité totale distribuée, ainsi que l'échauffement total interne, restent compatibles avec les possibilités de la colonne de distribution.

REMARQUE

Une évolution peut être « involontaire ». En effet, sans ajouter un seul départ, le facteur de simultanéité, ou les réglages des déclencheurs thermiques peuvent se trouver augmentés. Cette évolution non maîtrisée peut conduire à des échauffements entraînant des destructions qui peuvent être graves.

Un degré d'évolution 2 sera appliqué à un dispositif débrochable sur socle ou sur chariot (disjoncteur par exemple), car la partie mobile pouvant s'y adapter est limitée en calibre et en technologie. Le **tableau 12.7** résume l'ensemble des indices de service.

Tableau 12.7 – Tableau général des indices de service.

Indices de service selon UTE C63-429				
Fonction	Valeur de X	1	2	3
	ISX**	Accessibilité de l'ensemble en vue d'une intervention sur l'installation (exploitation)	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation et condamnation générales de l'ensemble • Pas de possibilité de séparer et condamner individuellement les UF • Pas de possibilité d'essayer les circuits auxiliaires (notamment les automatismes), circuits de puissance hors charge 	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation et condamnation individuelles des UF • Pas de possibilité d'essayer les circuits auxiliaires (notamment les automatismes), circuits de puissance hors charge

Tableau 12.7 – Tableau général des indices de service. (Suite)

Indices de service selon UTE C63-429				
Valeur de X		1	2	3
Fonction				
IS*X*	Accessibilité de l'ensemble en vue de la maintenance de l'ensemble	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation et condamnation générales de l'ensemble • Indisponibilité totale de l'installation pendant le temps d'intervention, pour une durée indéterminée. Seuls les réglages accessibles en face avant sont modifiables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seule l'UF concernée par l'intervention est en position de sectionnement • Nécessité d'intervenir sur les raccordements pour remplacer l'UF 	<ul style="list-style-type: none"> • Seule l'UF concernée par l'intervention est en position de sectionnement • Pas d'intervention sur les raccordements pour remplacer l'UF
IS**X	Accessibilité de l'ensemble en vue d'une évolution de l'ensemble	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation et condamnation générales de l'ensemble. • Indisponibilité totale de l'installation pendant le temps d'intervention, pour une durée indéterminée 	<ul style="list-style-type: none"> • Seule l'UF concernée par l'évolution est éventuellement en position de sectionnement • Des évolutions prédéterminées (puissance et technologie), convenues lors de l'investissement, sont possibles sans séparation générale de l'ensemble • L'ajout d'une UF se fait à partir d'un espace équipé en partie fixe défini entre le constructeur et l'utilisateur 	<ul style="list-style-type: none"> • Seule l'UF concernée par l'évolution est éventuellement en position de sectionnement • Des évolutions libres (puissance et technologie), dans les limites convenues lors de la conception de l'ensemble, sont possibles sans séparation générale de l'ensemble

Très souvent les tableaux décrits par les cahiers des charges des maîtres d'œuvre répondent à plusieurs indices de service. On peut observer que la plupart des constructeurs offrent des solutions de colonnes de tableaux compatibles entre elles, pouvant accueillir des UF soit fixes, soit déconnectables, soit débouchables.

UN INDICE DE SERVICE IMPLIQUE-T-IL UNE TECHNOLOGIE DÉTERMINÉE ?

La réponse est non, c'est la particularité de cet outil de rester ouvert à toute technologie. Il permet à un maître d'œuvre de comparer des offres de technologies différentes mais offrant les mêmes services.

12.5 Différentes parties des armoires et tableaux

12.5.1 Enveloppe

L'enveloppe d'un tableau est constituée de deux groupes d'éléments ayant des rôles distincts : la **structure** et les **parois**.

■ Structure

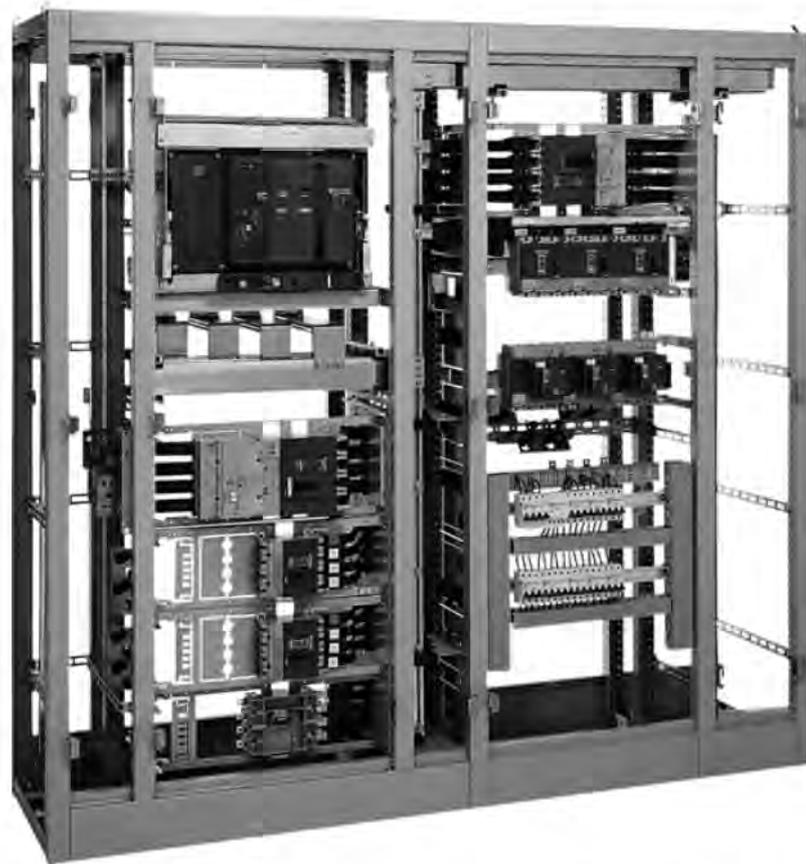


Figure 12.10 – Illustration d'une structure interne de tableau (Merlin Gerin).

Elle a un rôle essentiellement mécanique. Il faut réaliser que le poids du matériel monté dans une cellule peut atteindre la tonne pour les tableaux de fortes intensités. L'essentiel du poids est généré par les jeux de barres et les barres de connexion. Le jeu de barres principal étant le plus souvent situé en partie supérieure, le centre de gravité est situé assez haut. Les phases les plus délicates mettant la rigidité de la structure à l'épreuve sont le transport et la manutention sur le chantier. Les constructeurs n'utilisent plus de structures soudées, à moins de disposer d'un atelier de serrurerie annexée à l'atelier de montage et câblage. La structure est obtenue

par assemblages d'éléments prédécoupés. La rigidité est assurée grâce à la résistance en torsion des montants et traverses principaux, ainsi qu'à la solidité de l'assemblage tripode des coins.

■ Parois

Les parois ont un rôle de :

- protection contre l'accès aux parties sous tension. La caractéristique significative est le code IP**X, X étant une lettre de A à D (*voir § 12.1.2*) ;
- protection de l'ensemble lui-même contre les agressions de l'environnement : poussières, eau, chocs (*voir § 12.1.1 et 12.1.3*) ;
- protection des personnes situées à proximité, en cas d'arc interne. Cette caractéristique est développée plus loin.

Les parois peuvent également être judicieusement équipées d'ouvertures de ventilation, lesquelles doivent maintenir les propriétés précédentes (*voir calculs des échauffements au chapitre 5*).

12.5.2 Équipement interne

L'équipement interne d'un tableau comprend :

- le système de montage ;
- les systèmes de câblage et de maintien des fils ;
- le(s) jeu(x) de barres et les systèmes de répartition ;
- les plastrons, les cloisons ;
- les systèmes de raccordement et les borniers ;
- les traversées de câbles.

■ Système de montage

Les systèmes de montage sont assez nombreux. On peut toutefois les répartir en trois catégories : les platines, les châssis et les modules constructeurs.

□ Platines

Leur avantage principal est de pouvoir accueillir le montage d'appareils à fixation par vis, ainsi que des rails pour des petits appareils à fixation encliquetable.

Les platines métalliques sont hautement recommandées pour le montage d'équipements électroniques de puissance qui demandent un câblage blindé. Elles servent de plan de potentiel de référence utile, voire indispensable, dans le but de diminuer les influences électromagnétiques. Ce point est développé plus loin.

Les platines de faibles dimensions sont presque toujours une simple tôle pleine d'épaisseur 2,5 à 3 mm afin d'accepter un taraudage. Celles de grandes dimensions ont des bords pliés qui leur confèrent une bonne rigidité.

Les platines ont l'inconvénient de devoir être percées, ce qui interdit ou limite les modifications. Elles obligent d'autre part un câblage puissance et contrôle par l'avant, ce qui augmente considérablement la surface occupée par les appareils de forte puissance. Des goulottes de câblage des circuits auxiliaires et de petites puissances sont également nécessaires.



Figure 12.11 – Exemples de platines de montage.

Elles sont bien adaptées à une fabrication de série, pour la commande de machines, où sont utilisés des matériels de diverses origines et technologies. Les ensembles électroniques sont abondamment utilisés.

□ Châssis

Leur principe est d'utiliser une structure plane constituée de deux montants et de rails horizontaux. Ces rails ont un profil en « C » ou en « G » dans lequel des écrous sont glissés afin de monter des appareils à fixation par vis. Cette technique de fixation est maintenant plutôt réservée aux appareils de moyenne puissance (160 à 630 A) ou aux appareils lourds tels que les transformateurs. Le rail appelé quelquefois oméga, plus officiellement « profilé chapeau » de 35 mm, est maintenant couramment utilisé pour le montage enclipsé des appareils de faible encombrement.

Le montage sur châssis a pour avantage principal de permettre le passage du câblage puissance à l'arrière, et réduit de ce fait l'encombrement, en comparaison avec un montage sur platine. Des modifications avant câblage sont possibles ; après câblage, à cause du passage et de la fixation des conducteurs à l'arrière, cette opération est plus difficile.

N'offrant pas un plan de potentiel de référence efficace, les châssis sont mal adaptés au montage et surtout au câblage des appareils électroniques câblés en fils blindés.

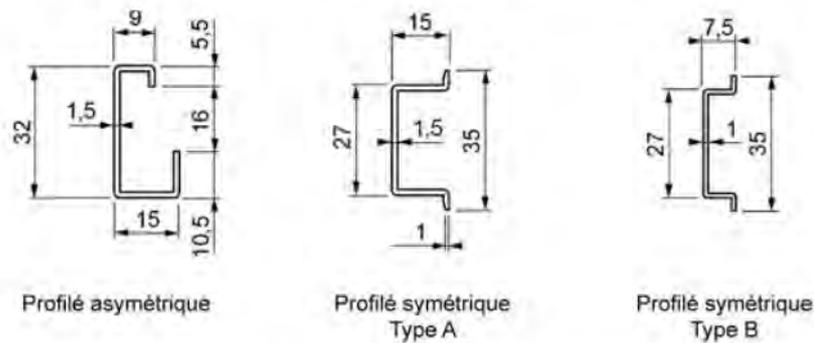


Figure 12.12 – Les principaux rails de fixation.

□ Châssis mixtes à platines et rails

Cette solution revêt un caractère plus universel. Elle s'applique aux grands ensembles en armoires à montage fixes. Elle cumule les avantages des platines et des châssis à rails.

□ Modules constructeurs

Plusieurs constructeurs proposent maintenant un catalogue de kits de montage et de câblage prévus pour la réalisation d'un tableau de formes de protection et de séparation données. Ces modules de montages sont prévus pour toutes fonctions : disjoncteurs boîtier moulé, démarreurs moteurs, disjoncteurs et appareillages modulaires, jeux de barres, borniers, etc. Ces kits permettent à tout tableautier de réaliser un ensemble de bonne qualité sans outillage ni grande compétence. En revanche, le principe est captif, c'est-à-dire utilisable presque exclusivement pour l'appareillage de la marque.

■ Jeux de barres

Les jeux de barres dans les tableaux ont pour fonction de répartir un courant d'alimentation vers plusieurs départs. Leurs qualités principales doivent être :

- conduire et répartir le courant sans échauffement excessif ;
- supporter sans détérioration les surintensités maximales prévisibles telles que les courants de courts-circuits, les pointes de courants dues à des démarrages successifs de moteurs, des dépassements de facteur de marche ou de facteur de foisonnement ;
- faciliter le raccordement de dérivation de fortes sections comme de faibles sections, et en assurer la fiabilité dans la durée ;
- permettre le contrôle et les extensions ;
- enfin, permettre une protection contre l'accès direct de degré IPxxA à IPxxC, selon les circonstances.

□ Section et matières des jeux de barres

Il n'est pas toujours exact de penser que l'intensité admissible dans un jeu de barres ne dépend que de sa matière et de sa section. Seule la température finale détermine cette intensité.



Figure 12.13 – Répartition du courant dans un conducteur plein de forte section.
Un tube de dimensions externes équivalentes a la même conductivité.

De plus seul le constructeur en définit les limites. Ces dernières seront établies à partir d'essais en tenant compte des températures observées en contacts des supports isolants et aux points de connexion des dérivations.

Des mesures en laboratoires ont démontré que pour les très fortes sections de barres, en courant alternatif, la densité du courant est maximale à la périphérie de la section et est quasiment nulle au centre. Un tube peut donc avoir la même conductivité qu'un cylindre plein de même circonférence.

La température des barres dépend de la capacité de dispersion calorifique. Celle-ci est conditionnée par la surface d'échange et par la couleur. Pour augmenter la surface d'échange les constructeurs appliquent des méthodes très diverses.

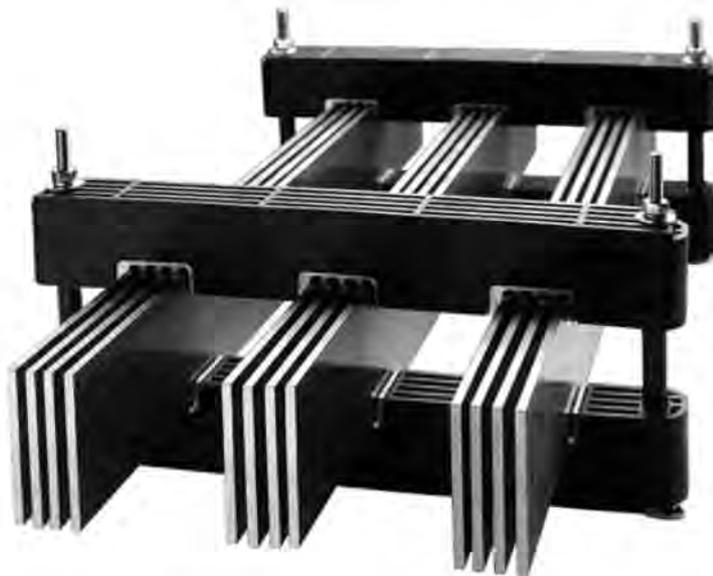


Figure 12.14 – Utilisation de barres plates (Socomec).

La plus utilisée est d'utiliser plusieurs barres planes de faible épaisseur et les décaler pour faciliter une convection. Ce principe ne fonctionne que si les barres sont disposées dans un plan vertical. Il a pour inconvénient de fragiliser les barres qui aurait tendance à se rapprocher par force électrodynamique. Cette force peut s'exercer en cas de court-circuit, ce qui amènerait une déformation. Elle provoque

un son audible en vertu des vibrations à 100 Hz qu'elle génère, principalement pendant le démarrage de gros moteurs. En conséquence ce type de montage impose un maintien des barres entre elles à l'aide de cales disposées à des distances assez courtes (20 à 30 cm).



Figure 12.15 – Barres profilées (Schneider Electric).

D'autres méthodes consistent à tréfler une barre selon un profil procurant une grande surface de dissipation et également une bonne facilité de raccordement. Ce principe est appliqué par certains constructeurs. Il comporte les avantages et les inconvénients des systèmes « captifs » ne pouvant être mis en œuvre que dans le cadre d'un ensemble de la marque.

Certains constructeurs montent tout simplement des radiateurs sur les barres, à l'instar de ceux qui sont utilisés dans les ponts redresseurs ou le refroidissement des microprocesseurs. Cette idée a l'avantage d'être utilisable sur des barres plates standard, plus économiques et moins sujettes aux ruptures de stock.

Autre « astuce » utilisée : les barres de fortes intensités, peuvent admettre sans problème une température dépassant 100 °C. Il faut toutefois rester dans des limites acceptables, de 125 à 135 °C par exemple. À ce niveau de température, le principe de peindre les barres de couleur noire (si possible mate), augmente de façon significative la dissipation calorifique par rayonnement.

Enfin la température des barres dépend directement de la température environnante. Une bonne ventilation est alors indispensable. C'est ainsi qu'un jeu de barres situé en haut d'une armoire étanche IP54 sera utilisé à une température environnante très élevée. Un fort déclassement sera indispensable (*voir plus haut le calcul des échauffements dans les armoires*).

Les jeux de barres verticaux jouissent souvent d'un effet cheminée qui favorise leur ventilation. Il faut malgré tout veiller à ce que les supports de barres et autres cloisonnements ne puissent pas annuler cet effet.



Figure 12.16 – Utilisation de radiateurs sur les barres (Moeller Electric).

□ Jeux de barres en aluminium

L'aluminium est un peu moins conducteur que le cuivre, toutefois son poids et son coût le rendent très attractif. Cette « compétition » économique aluminium-cuivre est toutefois très sujette aux variations de cours.

L'aluminium a un très gros inconvénient. Il est, à l'état nu, très oxydable, son oxyde, l'alumine, est très dur et étanche. Cette fine couche d'alumine protège toute pièce en aluminium de toute progression de l'oxydation, à moins d'une destruction mécanique ou chimique. Le problème, pour l'utilisation de l'aluminium en électricité est que l'alumine est aussi un très bon isolant. Toute connexion électrique présente donc une résistance ohmique instable qui ne cessera d'augmenter en raison de l'échauffement qui accélère le processus.

Une solution a été apportée en étamant les conducteurs. L'étain a une très bonne résistance de contact. Malheureusement cette solution s'est avérée encore plus dangereuse, car si la couche d'étain est trop importante, elle risque de fondre et de provoquer une soudure ; dans le cas inverse, toute rayure de la couche d'étain met à nu l'aluminium. Or, l'alumine et l'oxyde d'étain peuvent provoquer un mélange explosif. Des accidents ayant pour origine ces phénomènes ont eu lieu. Ils ont longtemps justifié une profonde méfiance de la profession à l'égard de ce métal.

Pour les câbles, une connexion avec un sertissage profond a pu rendre ceux-ci utilisables avec satisfaction. Pour les barres, à part leur soudure sous atmosphère neutre, le problème n'était pas résolu.

□ Traitement des barres d'aluminium

Une méthode maintenant appliquée depuis une bonne trentaine d'années est de recouvrir l'aluminium par électrolyse de deux couches successives de métaux. Une première couche de nickel assure une dureté superficielle acceptable. Une seconde couche d'étain assure une bonne qualité de conductivité de contact. L'ensemble présente un couple électrochimique assez faible, évitant ainsi une corrosion par effet d'électrolyse.

Quelquefois les barres sont isolées par une gaine thermorétractable ou encore par un émaillage époxy, qui leur confère une excellente isolation superficielle, évitant de ce fait un amorçage consécutif à des accumulations de poussières.

Enfin les jeux de barres peuvent être complètement moulés dans un bloc isolant. Cela leur confère une résistance absolue à toute agression mécanique, chimique, forces électromagnétiques ou amorçage.

Il faut toutefois vérifier que ces solutions sont compatibles avec les règles récentes de recyclage des matériaux.

■ Connexions aux jeux de barres

Il y a eu pendant longtemps une culture d'électriciens cherchant à vérifier jusqu'à l'obsession, le serrage des connexions. Les boulons étaient serrés jusqu'à leurs limites de rupture. Certes, il est exact que les connexions mal serrées sont la principale cause de destructions, voire d'incendies.

Il est maintenant acquis que les échauffements, les dilatations et rétractations répétées, voire les vibrations, fatiguent les systèmes de serrage à vis. Des écrasements de matières ou des élongations de boulons finissent par créer des desserrages, voire des connexions libres. L'oxydation est favorisée, rendant irréversible la dégradation.

La solution est de rendre élastique le serrage des connexions. Ce principe permet d'absorber toutes les contraintes décrites précédemment. L'élasticité est obtenue par différents moyens. Nous en citons les principaux :

- Utilisation de rondelles coniques encore appelées rondelles Belleville. Celles-ci peuvent s'empiler soit en parallèle pour augmenter la force élastique, soit en série pour augmenter la course d'élasticité, ou encore en série-parallèle.

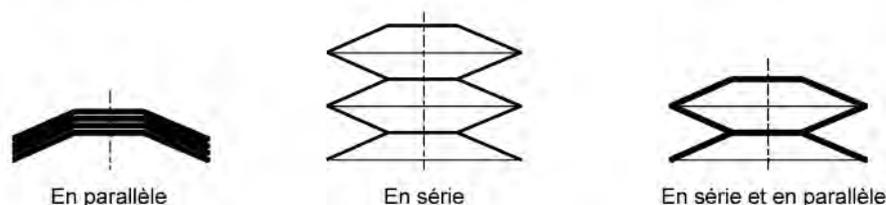


Figure 12.17 - Rondelles Belleville.

- Utilisation de boulons à vis longue. Le serrage allonge la tige de la vis. La course d'allongement devient significative à partir d'une longueur de boulon de 4 cm environ. Ce type de vis doit avoir une qualité d'acier 8.8 ou 10.9¹.

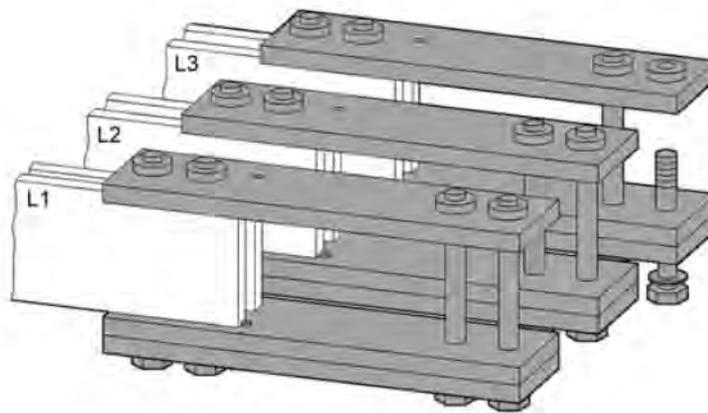


Figure 12.18 – Utilisation de vis longues.

■ Connexions de faibles sections

Il n'est pas évident de dériver une faible section à partir d'un jeu de barres 1 000 A voire 3 000 ou 4 000 A. Percer et tarauder une barre comporte des risques. Une solution employée est de monter une barre de faible section servant de répartiteur à plusieurs connexions de faibles sections.

Il existe également des bornes griffes qui s'adaptent aux barres. Elles utilisent parfois un serrage élastique sur la barre source.

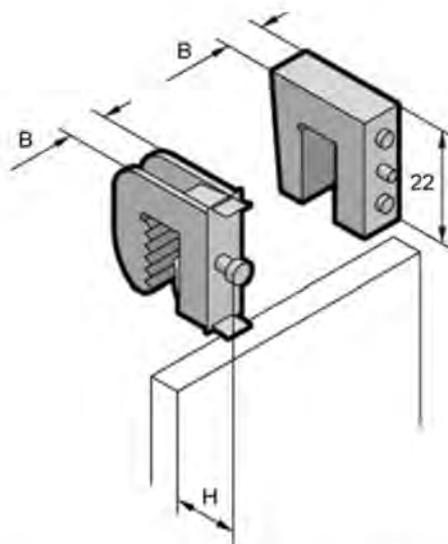


Figure 12.19 – Borne de « repiquage » sur jeu de barres (d'après Rittal).

1. Le premier chiffre donne la résistance à la rupture en dizaine de dN/mm^2 , le second donne la limite élastique en % de la résistance à la rupture.

■ Connexions débrochables

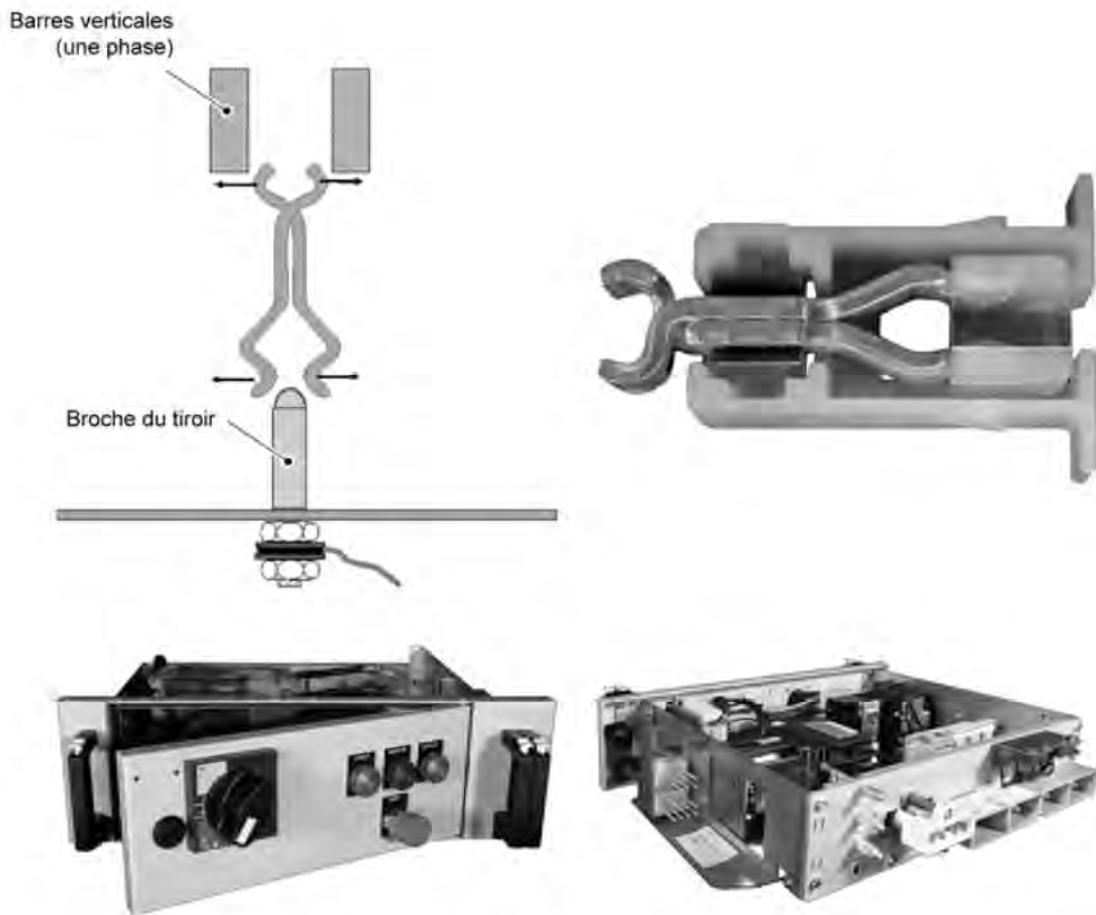


Figure 12.20 – Quelques principes de connexions débrochables.

□ Particularités des connexions débrochables

Leurs constructeurs ne tarissent pas de mots pour expliquer les avantages de leurs principes. Puisque tous ont normalement fait l'objet d'essais de tenue à l'échauffement et aux courts-circuits nous ne vanterons aucun principe en faveur d'autres. Toutefois il peut être utile de résumer quelques points importants.

- Les broches de connexion doivent présenter un certain jeu de position afin d'assurer un alignement correct.
- Il faut vérifier la compatibilité des métaux en contact. Le cuivre nu ou ses alliages ne constituent pas de bons contacts. Ils doivent être argentés ou étamés en couche mince.
- Un fonctionnement en service permanent conduit à un équilibre thermique, que les constructeurs savent contrôler par les essais de type. Il en est de même d'un court-circuit que le dispositif de protection de l'unité fonctionnelle sait protéger (sous le contrôle de l'essai de type). En revanche en cas de démarrage répété d'un gros moteur, les connexions peuvent chauffer jusqu'à leur destruction, sans que les protections contre les surintensités n'aient pu agir.

■ Jeux de barres « forme 2 »

Sous ce qualificatif, des constructeurs proposent des systèmes de jeux de barres incluant des dispositifs de capotages permettant de construire des armoires protégées forme 2A ou 2B. Bien sûr ce n'est pas le jeu de barre qui est de forme 2, mais l'ensemble de l'armoire. Dans la mesure où tous les appareils ont une protection IPxxB, y compris les dispositifs de raccordement, effectivement, seul le jeu de barres doit disposer de protections complémentaires.



Figure 12.21 – Jeu de barres de répartition forme 2 (Rittal).

Ces jeux de barres constituent également des dispositifs de raccordement rapides, et même des dispositifs de montage et de connexion de modules ou d'appareils (fusibles, petits démarreurs moteurs...). Ils sont très utiles à la réalisation d'armoires de commande de machines.

12.6 Essais des ensembles et certification de conformité CE

12.6.1 Essais selon la norme EN 60439-1

Les essais concernant les ensembles de séries sont « menés à l'initiative du constructeur ». Cette expression présentée par la norme EN 60439-1, n'insinue en rien que le constructeur a l'opportunité de faire le strict minimum, voire même de ne mener aucun essai. Il faut rappeler ici le principe de la directive européenne relative aux appareils et ensembles à basse tension : *tout matériel mis à disposition d'un utilisateur final ne doit en aucune circonstance devenir dangereux, dans le cadre d'une utilisation clairement définie*. Si ces termes ne sont pas l'exacte reproduction de la directive, ils en expliquent fidèlement la teneur.

Cette directive étant transposée en droit français, cela signifie que le constructeur est responsable devant la loi :

- de l'information décrivant les limites d'application de sa construction : limites d'environnement, limites électriques, limites de facteur de marche, de cadence, etc. ;
- de la garantie du respect des caractéristiques, soumise éventuellement à des recommandations d'installation, de maintenance ou de propositions de services ;
- de l'archivage pendant dix ans des documents ayant servi à la fabrication ;
- des recommandations concernant des conditions de fin de vie en faveur du recyclage des tableaux et appareils, lesquelles peuvent aller jusqu'à leur prise en charge.

Pour étayer sa bonne foi, le constructeur doit constituer un **dossier de conformité CE**. Ce dossier décrit l'ensemble des essais de type, ainsi que les éléments permettant la traçabilité de ses constructions. Ces dossiers sont constitués dès la commercialisation d'un produit, sous forme d'enveloppes scellées ou moyens équivalents. Ils sont la propriété du constructeur. Ils peuvent toutefois être réclamés par une instance juridique en cas d'enquête suite à un accident ou une plainte fondée sur un doute sérieux de conformité.

Les essais comprennent les essais de type et les essais individuels.

■ Essais de type

- a) vérification des limites d'échauffement ;
- b) vérification des propriétés diélectriques ;
- c) vérification de la tenue aux courts-circuits ;
- d) vérification de la continuité du circuit de protection ;
- e) vérification des distances d'isolement et des lignes de fuite ;
- f) vérification du fonctionnement mécanique ;
- g) vérification du degré de protection.

Il faut normalement ajouter les vérifications d'intégration des appareillages utilisés dans les conditions de montage prévues. La position de montage, la température environnante, les conditions de câblage, etc. peuvent changer les caractéristiques d'un disjoncteur, d'un contacteur ou d'un variateur de vitesse. Cette vérification s'applique particulièrement aux unités fonctionnelles que le constructeur présente à son catalogue.

■ Essais individuels

Les essais individuels ont essentiellement un objectif de contrôle de la qualité de fabrication et de conformité aux modèles qui ont fait l'objet d'essais de type. En outre un essai de fonctionnement électrique est pratiqué par la plupart des constructeurs. Enfin un essai diélectrique est pratiqué à la valeur égale à U_i correspondant à la catégorie de surtension du tableau. La tension d'essai peut être différente pour les parties de tensions différentes à condition qu'elles soient physiquement séparées.

12.6.2 Résistance à l'arc interne

Ce type d'essai est décrit par la norme CEI 61641 (1996). Cette norme complète la norme de base EN 60439-1 et entre dans la logique de l'objectif d'assurer qu'un

tableau ne doit en aucune circonstance être dangereux pour les personnes. L'essai demande une installation très lourde. En effet il s'agit de créer un amorçage réel sur un jeu de barres, provoquant un arc interne, et de s'assurer que celui-ci ne puisse pas être dangereux pour une personne située à proximité du tableau.



Figure 12.22 – Essai à l'arc interne
(Moeller Electric).

L'arc interne est l'accident le plus dangereux et le plus destructeur dans un équipement électrique. Lorsqu'un amorçage se produit entre deux phases, une colonne d'air conductrice se forme, qui sera portée à une température énorme supérieure à 5 000 °C, cela en un temps de l'ordre de 5 ms. Cette température porte l'air à une très haute pression. L'effet produit est tout à fait comparable à celui que produirait une forte charge explosive. Le risque est que les portes de l'enveloppe s'ouvrent et laissent se projeter des gaz brûlants et hautement toxiques vers une personne qui se situerait devant.

L'essai consiste à monter un fil de cuivre de 1,5 à 2,5 mm² entre barres et de produire un court-circuit. Le fil fond immédiatement, produisant une colonne d'air conductrice. À tout endroit imaginable de dégagement de gaz chaud sont posés des témoins constitués de cadres de coton noir. Ces témoins s'enflammeraient spontanément au-dessus d'une certaine température. La réussite de l'essai est bien sûr qu'aucun de ces cadres ne s'enflamme.

Cet essai n'a pour seul but que de protéger les personnes. Il est évident que le tableau lui-même, en cas d'arc interne, sera totalement détruit. Certains établissements ne peuvent en aucun cas encourir le risque d'être privé d'énergie pendant un temps dont on imagine la durée, le temps de réparation, suivant celui d'expertise. Alors plusieurs constructeurs proposent une somme de solutions pour réduire ce risque. Ces solutions consistent à :

- rendre le moins probable possible un amorçage, en isolant les barres, voire même en les noyant dans un bloc isolant ;
- freiner la propagation de l'arc, grâce à des cloisonnements, vers des volumes fonctionnels voisins et vers le jeu de barres lui-même ;



Figure 12.23 – Tableau en cours avant un essai à l'arc interne (Moeller Electric).

- détecter et éteindre l'arc avant qu'il n'atteigne une amplitude trop destructrice. Le principe d'extinction de l'arc est de provoquer un court-circuit franc faisant tomber à zéro la tension génératrice. Les disjoncteurs amont sont chargés de couper le courant de court-circuit.

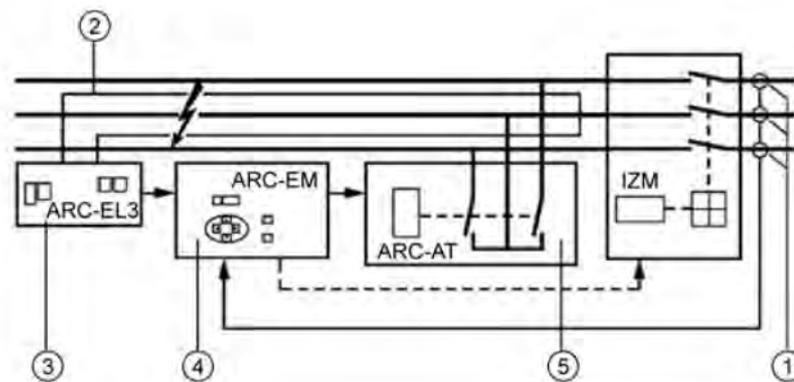
Il est important de ne pas confondre un arc interne avec un court-circuit.

- Le premier est particulièrement destructeur, même si les conducteurs sont largement dimensionnés. Les disjoncteurs ou fusibles sont trop lents pour éviter une destruction importante de l'ensemble.
- Un court-circuit est toujours considéré « franc ». Il provoque un courant calculable. Ses effets sont connus et les protections efficaces.

Ces considérations forcent à un peu de modestie lorsqu'on évoque les protections contre les courts-circuits, la protection des câbles ou jeux de barres et les discours sur la sélectivité. Presque tous les courts-circuits ne sont en fait pas francs et sont accompagnés d'un arc interne. Certes, rares sont ceux qui atteignent les jeux de barres, mais souvent plusieurs départs sont atteints par l'arc.

SYSTÈME DE PROTECTION CONTRE L'ARC INTERNE ARCON®

Le système de protection contre l'arc interne ARCON assure une sécurité maximale des personnes et des installations, en particulier dans les processus de production continue. Il offre une protection contre les courants d'arc de 6 à 100 kAeff.



- ① Transformateur de courant
- ② Capteur optique linéaire + ARC-SL...
- ③ Unité d'analyse électronique (esclave) + ARC-EL3
- ④ Unité d'analyse électronique (maître) + ARC-EM
- ⑤ Dispositif d'extinction + ARC-AT



En cas de réponse de l'unité d'analyse électronique, tout se déroule à la vitesse de l'éclair. ARCON® éteint l'arc en 2 ms, avant que ce dernier n'ait eu le temps de causer des dégâts sérieux dans l'installation.

Figure 12.24 – Principe d'un extincteur d'arc interne (d'après Moeller Electric).

Les arcs sont détectés à l'aide de capteurs optiques et ampèremétriques. Lorsque l'unité d'analyse décèle la présence simultanée d'un signal lumineux et d'un signal de courant, elle envoie un ordre de déclenchement au dispositif d'extinction et aux disjoncteurs d'alimentation. L'arc est éteint en moins de 2 ms. L'installation peut être remise en service après élimination du défaut et remplacement du dispositif d'extinction.

12.7 Canalisations préfabriquées

Les canalisations électriques préfabriquées sont des ensembles de série, au même titre que les tableaux électriques qui répondent à cette appellation. Elles consistent en une gamme d'éléments assemblables entre eux, afin de constituer une canalisation électrique installée selon un parcours prédéfini.

La première particularité des canalisations préfabriquées est qu'elles sont auto-porteuses, contrairement aux câbles qui nécessitent un support de pose (chemins de câbles, caniveaux...).

Chaque élément est constitué d'un jeu de barres conductrices sous enveloppe. Elles sont d'ailleurs appelées souvent « **gaines à barres** » ou quelquefois « **gaines** » lorsque ce mot ne prête pas à confusion. Cette simple description annonce toutes les questions évoquées précédemment à propos des enveloppes, des jeux de barres et leurs modes de connexions.

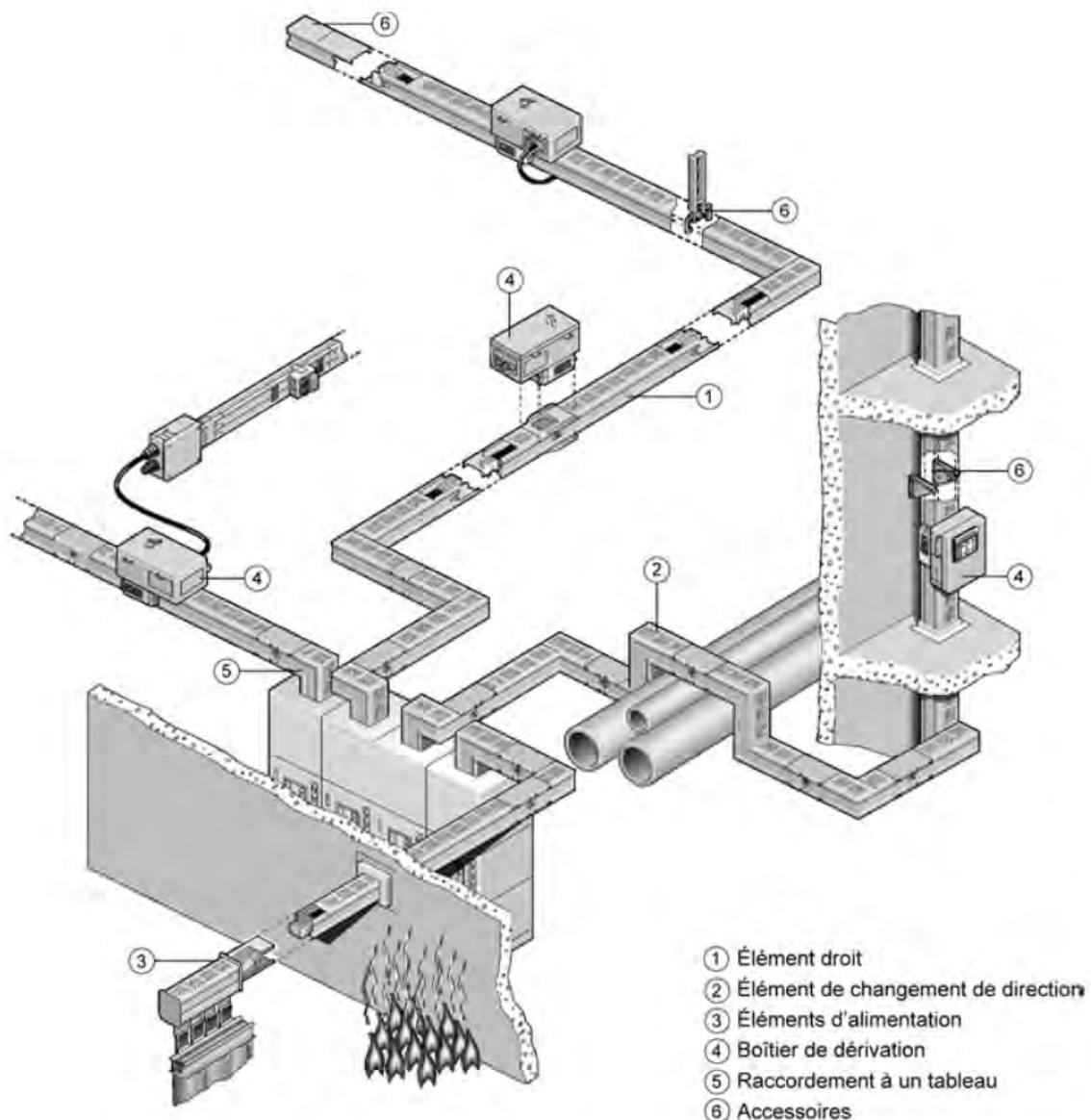


Figure 12.25 – Canalisation de transport (Siemens).

Les canalisations préfabriquées, à l'instar des tableaux ont trois niveaux de distribution électrique :

- Les **canalisations de transport**, comparables aux tableaux généraux à basse tension, ont pour rôle de transporter de fortes intensités d'un point à un autre. Leur intensité couvre la plage de 800 A à 6 000 A.
- Les **canalisations de distribution**, qui peuvent se comparer aux tableaux de distribution d'ateliers ou de bâtiments à usage tertiaire, ont pour rôle de mener l'énergie au plus près de leur utilisation et de permettre un branchement à tout instant d'une très large plage d'intensité, sans perturber le reste de l'installation. Leur intensité couvre une plage de 100 à 1 000 A.



Figure 12.26 – Canalisation préfabriquée de distribution.

- Les **canalisations de distribution terminales**, comme les coffrets et tableaux terminaux, ont plus une utilisation spécifique : distribution de petits ateliers, canalisation d'éclairage. Leur intensité couvre la gamme de 16 à 40 A.

Les **canalisations de transport** concurrencent directement les câbles. D'ailleurs, pour de fortes intensités, la norme NF C15-100 recommande de préférer une canalisation préfabriquée pour des intensités qui demanderaient plus que 4 câbles en parallèle. Cela correspond à une intensité de 2 500 A en cas d'utilisation de câbles de 300 mm². Ces canalisations admettent des points de dérivation, toutefois ceux-ci doivent être prévus dès l'étude d'installation. Le plus souvent ces dérivations ne peuvent être installées que hors tension ; toutefois les constructeurs prévoient depuis quelques années des coffrets de dérivation pouvant être posés en cours d'exploitation. Malgré tout, les boîtiers sont souvent très lourds et les tronçons de gaine, montés dans des endroits souvent peu accessibles. Cette opération reste une intervention demandant des moyens et des précautions appropriés. Ces canalisations sont très fréquemment utilisées pour le raccordement entre transformateurs et TGBT. On les rencontre également dans de grands ateliers de production industrielle pour assurer une liaison de couplage entre postes.

Les **canalisations de distribution** pourraient être assimilées à des tableaux de distribution étendus sur un atelier ou verticalement pour la distribution d'étages.

Les principales caractéristiques des canalisations préfabriquées sont :

- l'intensité thermique assignée ;
- la tenue aux courts-circuits ;
- le degré d'étanchéité.

Nous avons vu à propos des jeux de barres que l'intensité thermique ne dépend que très relativement de la section des barres, mais surtout de leur dissipation thermique. Parallèlement, la tenue aux courants de courts-circuits est tributaire de la résistance des supports isolants et surtout de leur distance.

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le
 © Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus
 aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

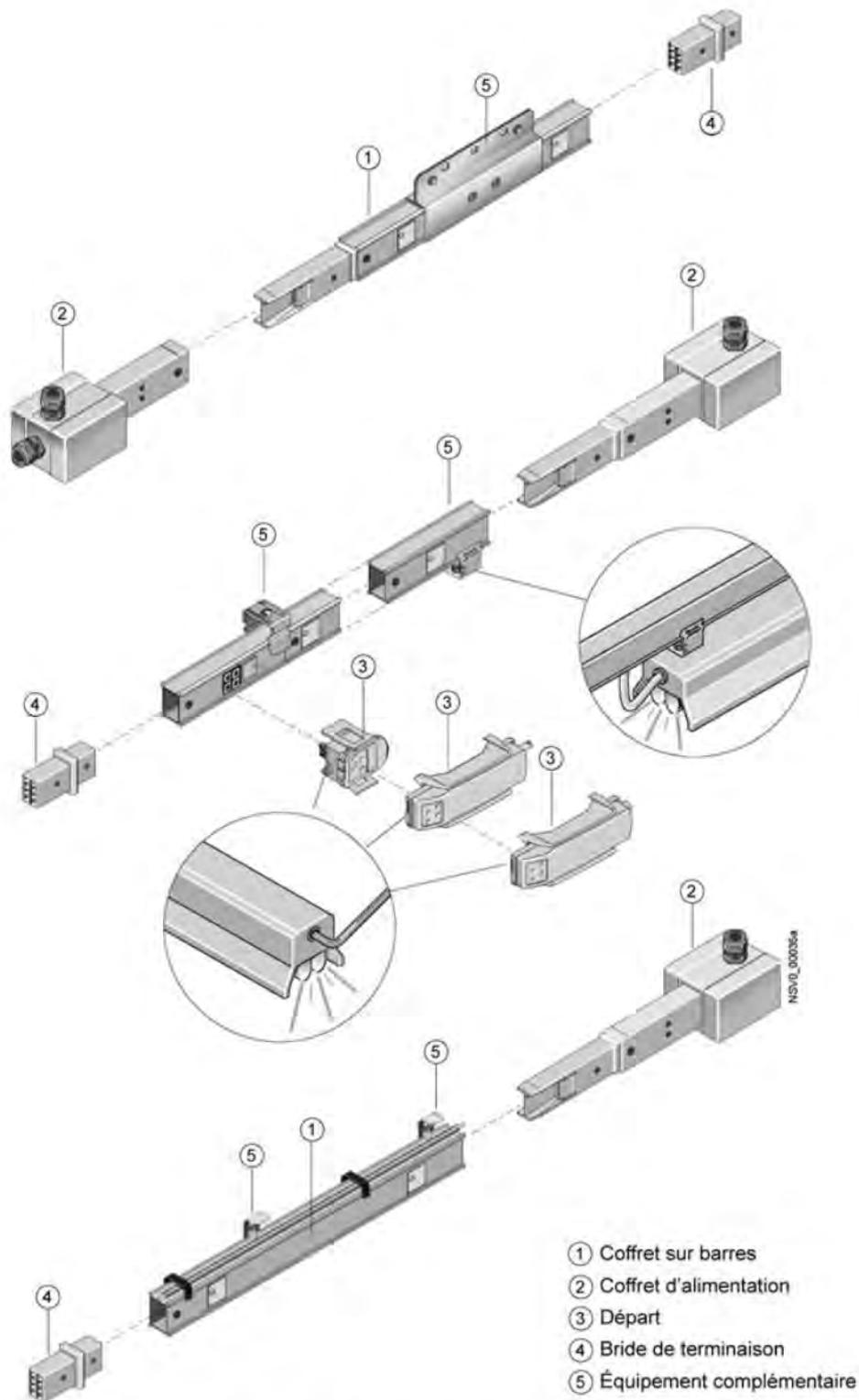


Figure 12.27 – Canalisation d'éclairage.

Trois techniques de conception des canalisations préfabriquées résolvent de façon complètement opposée ces questions.

12.7.1 Barres ventilées

Les barres sont montées sur supports isolants et sont ventilées à l'intérieur de l'enveloppe. Elles sont espacées pour assurer une circulation de l'air. On devine que la ventilation des barres sera sévèrement contrariée si l'enveloppe est étanche ou si les barres sont montées dans un plan horizontal, empêchant toute convection.

En revanche le principe demande très peu de main-d'œuvre. L'enveloppe en tôle d'acier est très économique. La tenue aux courants de courts-circuits est très bonne. Les dérivations sont très simples à construire.



Figure 12.28 – Conception à barres ventilées.

12.7.2 Barres dites « sandwich »

Selon le second principe, les barres sont isolées par un enrubannage de film isolant extrêmement fin et stable aux hautes températures. Elles sont comprimées par deux flasques latéraux très rigides qui font office d'enveloppe, d'où le nom de barres sandwich qui a été donné à cette conception. Ces flasques sont munis d'ailettes pour les rendre plus rigides mais également pour augmenter la surface de dissipation calorifique.

En d'autres termes, si, dans le principe précédent, l'enveloppe est plutôt un frein à une bonne dissipation calorifique des barres, selon ce second principe, c'est l'enveloppe elle-même qui forme le radiateur. Cette conception est plus coûteuse à construire, l'enveloppe demande des matériaux plus onéreux. Celle-ci est presque toujours réalisée en aluminium.

Les barres étant plaquées contre elles, séparées par un fin film isolant, la réactance (qui augmente avec la distance des conducteurs) est très faible ; en revanche un effet capacitif peut se faire ressentir, engendrant un courant capacitif qui peut être gênant pour certaines mesures.



Figure 12.29 – Conception à barres « sandwich » (Siemens).

Les dérivations et les éclissages des éléments imposent une séparation des barres, créant une discontinuité de forme, favorisant des points faibles d'échauffement et de tenue diélectrique. Ce sont des points critiques de leur fabrication nécessitant un contrôle rigoureux. Cette conception favorise très efficacement l'échange de chaleur. Elle a pour conséquence une diminution significative de la section des barres conductrices.

12.7.3 Barres surmoulées



Figure 12.30 – Barres surmoulées (Siemens).

Selon ce principe, les barres sont totalement moulées dans un bloc de résine isolante. Les constructeurs qui proposent ce principe, prévoient un kit de jonction comprenant, outre les boulons d'éclissage et leur méthode de contrôle de serrage, un moule et une résine à deux composants pour la réalisation sur site de la continuité du surmoulage.

Cette conception est demandée chez certains exploitants chez qui ces canalisations sont montées en extérieur, et/ou exposées à un environnement particulièrement corrosif. Ce type d'exploitation se rencontre dans les raffineries, les complexes chimiques, les papeteries...

12.7.4 Techniques d'éclissage

L'un des avantages potentiels des canalisations préfabriquées est son temps de pose. En effet, en comparaison avec le montage des câbles qui nécessitent un support résistant, tel qu'un chemin de câbles, et qui par ailleurs exigent une technique par tirage, demandant des moyens lourds pour les sections importantes et de grandes longueurs, les canalisations préfabriquées se montent élément par élément, de longueur et de poids limités, manœuvrables par deux hommes. Toutefois la jonction électrique et mécanique des éléments ne doit pas prendre un temps qui ferait perdre tous ces avantages.

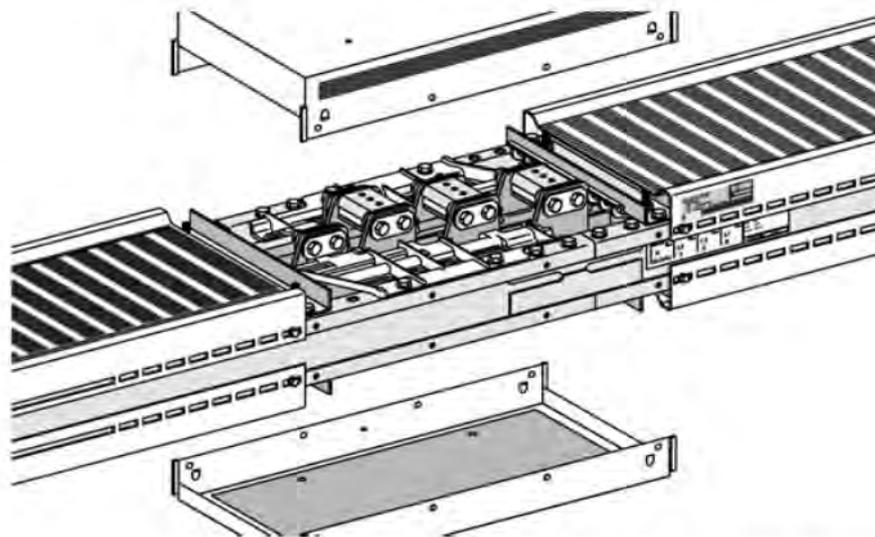


Figure 12.31 – Serrage par boulons multiples (Canalis KH, Schneider Electric).

Une technique assez ancienne, mais éprouvée, nécessite une jonction par plusieurs boulons de chacune des barres. Le contrôle du serrage de tous ces boulons n'est laissé qu'à la bonne fiabilité des monteurs. Une autre technique maintenant largement utilisée consiste à disposer d'un seul dispositif de serrage pour l'ensemble du paquet de barres. Deux variantes de ce principe sont proposées :

- Le dispositif ne participe qu'au serrage des barres. Celles-ci sont pressées l'une contre l'autre grâce à un boulon unique équipé d'une forte rondelle conique qui

en assure un serrage élastique. Cette disposition impose une forme particulière (dite en baïonnette) des extrémités de barres, afin de conserver l'alignement.

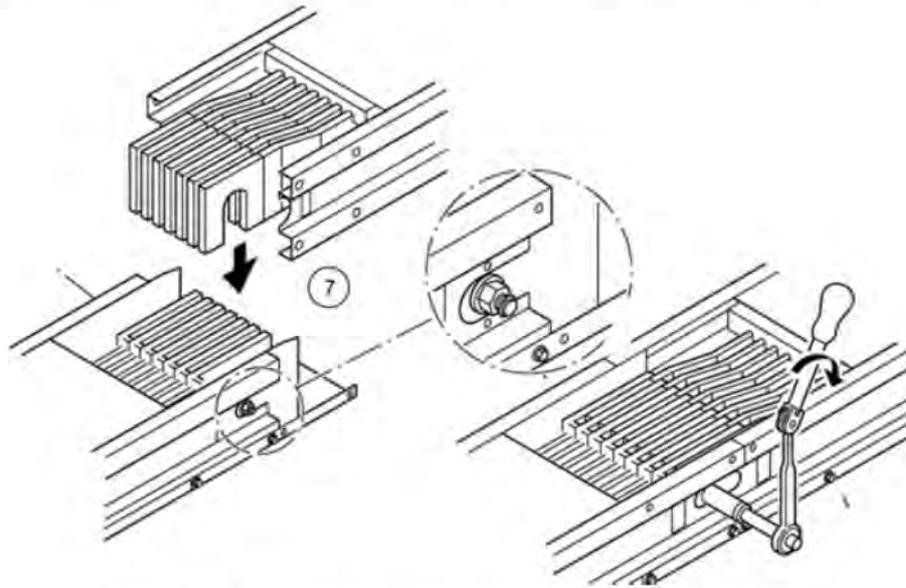


Figure 12.32 – Serrage par boulon unique (d'après Siemens).

- Le dispositif forme à la fois un bloc de jonction et un dispositif de serrage. Deux contacts en série sont établis par jonction au lieu d'un seul dans le cas précédent.

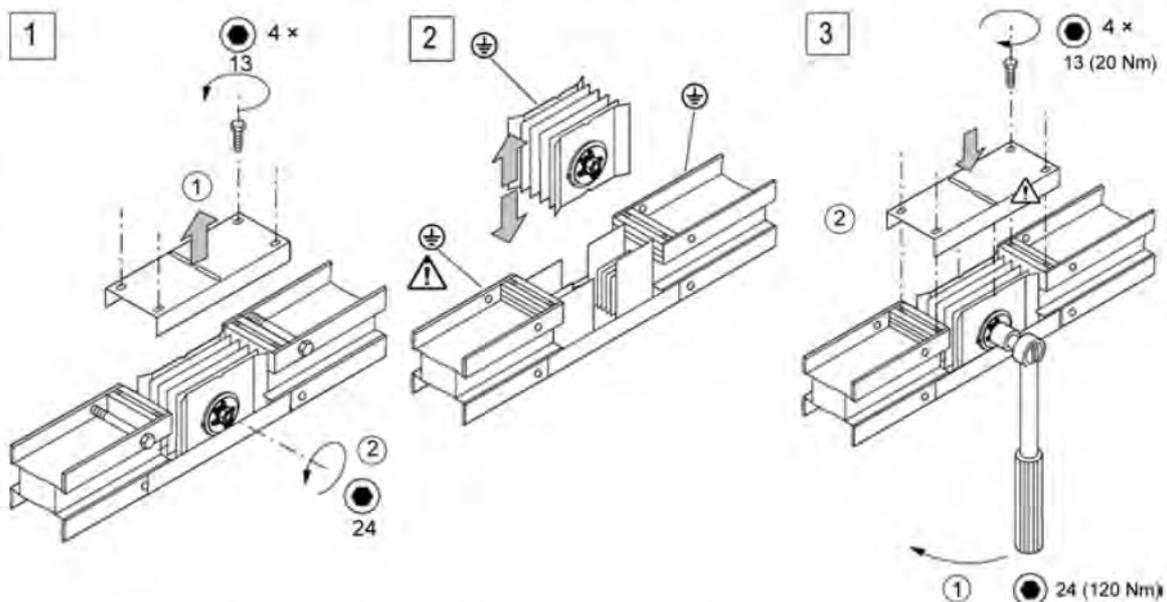


Figure 12.33 – Serrage par bloc de jonction (d'après Siemens).

On ne peut pas dégager d'avantages pour l'un ou l'autre de ces deux systèmes. Ils font partie des particularités de chaque gamme. Les serrages se font, soit sous le contrôle de clé dynamométrique, soit par un indicateur de serrage visible de l'extérieur.

12.7.5 Dilatation des barres

En régime de fonctionnement, la température des barres peut avoisiner les 100 °C, voire les dépasser si elles sont en cuivre. À froid, elles sont à la température de l'air ambiant. On imagine donc que pour de telles différences de température, les barres vont s'allonger sous l'effet de la dilatation.

Dans la conception décrite précédemment à « barres ventilées », le paquet de barres est souvent non solidaire longitudinalement de l'enveloppe. Celui-ci se déplace à l'intérieur de cette dernière en suivant les effets de la dilatation. Toutefois ce mouvement est rendu impossible dès la présence d'un coude de changement de direction. Des éléments de compensation de dilatation sont alors nécessaires. Ceux-ci sont constitués de clinquants souples soudés aux barres.

Lorsque l'éclissage est assuré par un bloc de jonction, celui-ci est parfois équipé lui-même d'un élément souple de compensation de dilatation.

Pour des longueurs assez courtes (de 10 à 20 m selon les recommandations du constructeur) les jonctions à serrage élastique permettent un glissement suffisant pour compenser la dilatation. Pour les autres systèmes où l'enveloppe est solidaire des barres, les éléments de dilatation doivent compenser le mouvement de l'ensemble de l'enveloppe. Enfin dans les systèmes à barres surmoulées, la résine extérieure doit avoir le même coefficient de dilatation que les barres. Les éléments de dilatation ne peuvent pas être surmoulés.

12.7.6 Éléments spécifiques

Les canalisations préfabriquées sont constituées d'éléments capables de suivre tout parcours nécessaire à l'installation. Des éléments de changement de direction sont ainsi nécessaires. Ils peuvent avoir des dimensions standard du constructeur, toutefois ce dernier peut les fabriquer « sur mesure ». D'autres éléments permettent le raccordement à un tableau, à un transformateur, ou à d'autres tronçons de gaine.



Figure 12.34 – Éléments de changement de direction préfabriqués (Siemens).

12.7.7 Boîtiers de dérivation

Il est intéressant de ne décrire que les boîtiers pouvant être installés en cours d'exploitation. Ceux-ci doivent avoir les propriétés suivantes : pour des intensités supérieures à 16 A, ils ne doivent pouvoir ni s'embrocher, ni se débrocher en charge. Un dispositif de verrouillage doit obliger de n'effectuer ces manœuvres que si le dispositif de sectionnement est ouvert. Celui-ci ne peut être fermé que si le boîtier est correctement maintenu en place. Pendant toutes les manœuvres, une protection contre l'accès aux parties sous tension doit être maintenue.

12.7.8 Traversées coupe-feu

Les canalisations préfabriquées sont des éléments d'installations électriques, mais, dans la mesure où elles sont susceptibles de traverser des cloisons ou des planchers d'étages, elles sont aussi des éléments de construction de bâtiments. Or pour certaines salles ou certains établissements, les cloisons doivent assurer une résistance au feu. Pour être plus précis, en cas d'incendie dans une salle, la cloison ne doit pas transmettre de gaz brûlants ni une température susceptible de générer un incendie de l'autre côté de celle-ci, cela pendant une durée de 0,5 à 4 heures. Cette durée définit le degré de coupe-feu.

Lorsqu'une ouverture est pratiquée dans la cloison, celle-ci doit être obturée par un dispositif de même degré coupe-feu que la cloison. Il en est ainsi pour les portes, et aussi pour les traversées de canalisations préfabriquées. Or il ne suffit pas que l'ouverture du passage de la canalisation soit bouchée par une maçonnerie, il est indispensable que le procédé de bouchage ait le même degré de résistance au feu.

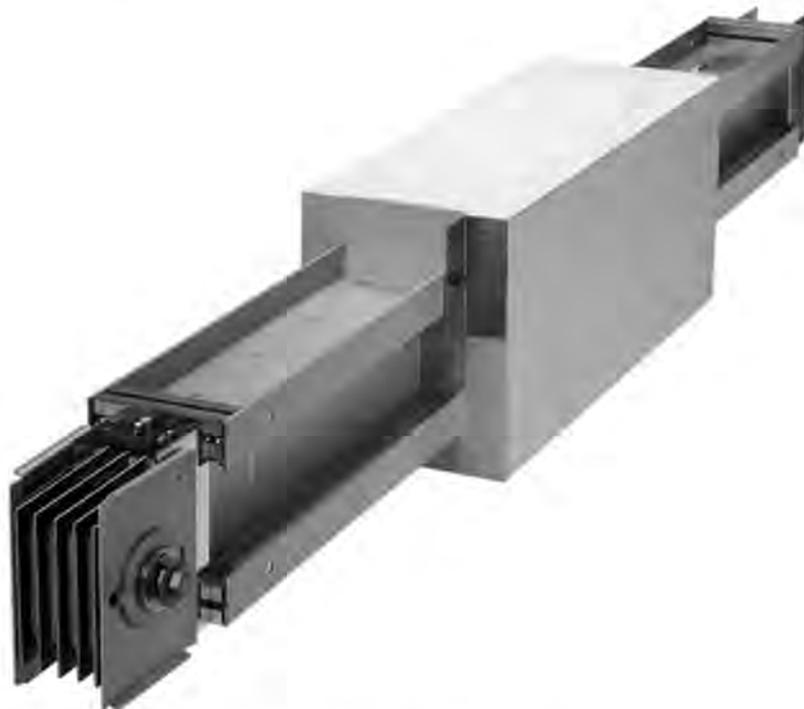


Figure 12.35 – Exemple d'éléments coupe-feu.

Si tel est le cas, il faut enfin connaître le comportement de la canalisation elle-même. En effet les barres étant très conductrices de la chaleur, elles peuvent transmettre une température plus élevée que celle admise. Pour les canalisations à « barres ventilées » les espaces entre barres et entre barres et enveloppes doivent être bouchés par un matériau isolant et résistant au feu. Pour les barres noyées dans la résine, cette dernière ne doit pas fondre ou brûler pendant le temps requis.

La règle est fixée par l'*arrêté du 3 août 1999 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages*. Les éléments de construction doivent être essayés par un laboratoire européen équipé et agréé pour mener de tels essais¹. Ces essais sont obligatoires pour tout type de canalisations préfabriquées.

1. En France ces essais sont menés par le CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment.

13 • CÂBLAGE DES ENSEMBLES D'APPAREILLAGE

13.1 Séparation des domaines

La notion de domaine de tension est expliquée au chapitre 7, § 7.1. Le principe de séparation physique et électrique est évoqué. Il s'agit maintenant de préciser quelques particularités de choix de matériels et de câblages propres à chaque domaine et sous-domaine.

■ Ensembles à très basse tension

Ainsi qu'il a été expliqué, la TBT concerne les parties d'installation ≤ 50 Vca (ou 120 Vcc).

□ TBTS : très basse tension de sécurité

Le principe de la TBTS est prévu pour être utilisé dans le but d'alimenter des appareils dans des conditions où le risque de choc électrique est aggravé par un environnement particulièrement humide (piscines ou assimilées), ou bien le risque de dégradation des conducteurs devient réel (atelier de mécanique automobile par exemple). Ces appareils doivent être alimentés par une source dite de sécurité, c'est-à-dire une source qui en aucun cas, même celui de défaillance, ne doit engendrer ni transmettre une tension supérieure à la tension limite. Cette tension limite est normalement de 50 V, mais elle peut être de 24 V voire de 12 V.

Principales règles des équipements en TBTS :

- ils doivent être alimentés par une source de sécurité :
 - générateur indépendant d'un autre réseau (batterie d'accumulateurs, groupe électrogène...),
 - transformateur « de sécurité » conforme à la norme EN 61558-2-6,
 - bloc électronique d'alimentation disposant de toutes sécurités afin de ne pas transmettre de tension supérieure à sa tension de sortie, même en cas de défaillance ;
- ils ne doivent en aucun cas être communs avec des équipements BT, même avec une séparation physique ;
- les circuits d'alimentation ne doivent pas comporter de conducteur relié à la terre ;
- les parties métalliques internes et externes ne doivent pas être reliées à la terre.

□ **TBTP : très basse tension de protection**

Nous avons insisté sur le fait que dans la logique de la TBTS, aucun voisinage susceptible de risque ne doit exister avec des équipements en BT. Toutefois une TBT peut être fort utile pour la réalisation de circuits de commande ou d'éclairage de machines. Tous les organes accessibles aux exploitants ne sont que les dispositifs de commande, de réglage ou d'éclairage. Mais pour les raisons expliquées en partie B, chapitre 3, § 3.6, un double défaut d'isolement affectant la même polarité dans un circuit de commande, provoquerait des désordres pouvant être graves dans le fonctionnement d'une machine ou d'un processus. La mise à la terre d'une polarité résout la plupart des difficultés. L'utilisation d'un contrôleur d'isolement peut être utile dans les limites décrites dans le paragraphe déjà cité. Dans tous les cas ces dispositions sont contraires à la règle applicable à la TBTS selon laquelle il n'est pas permis de relier une polarité à la terre. C'est le rôle de la TBTP, de permettre une protection contre les contacts indirects jusqu'à 50 Vca et une protection contre les contacts directs jusqu'à 25 Vca. La source doit également être du même type que celle qui est imposée en TBTS. La polarité « commun bobines » est reliée à la terre. En toute logique, cette liaison n'a pas de rôle de protection des personnes. Les règles du PE ne s'appliquent pas, en particulier la logique voudrait de ne pas utiliser la double couleur jaune et vert pour les conducteurs reliés à la terre dans un ensemble alimenté en TBTP (NF C15-100, annexe A, article 1). Toutefois l'usage observé est que ce conducteur est malgré tout câblé en couleur vert et jaune. Les prises de courant utilisant un circuit TBTS ou TBTP ne doivent pas être compatibles avec toutes autres prises de tensions différentes.

□ **TBTF : très basse tension fonctionnelle**

Certains ensembles tels que les systèmes de commande électroniques utilisent une tension inférieure à 50 Vca ou 120 Vcc. La tension la plus utilisée est 24 V courant continu. Si l'alimentation et le câblage ne répondent pas aux exigences de la TBTP, ces ensembles sont qualifiés de TBTF. Certains circuits demandent un blindage. Celui-ci ne peut en aucun cas être considéré comme un conducteur de protection. **Il ne doit pas être câblé par un conducteur de couleur vert et jaune.** Il en est de même si une polarité est reliée à la terre.

13.2 Conducteurs de « mise à la terre »

Nous avons expliqué au chapitre 10 les fonctions et règles différenciant et réglementant les conducteurs de liaison à la terre dans une installation. Dans un ensemble, armoire ou tableau, ces règles sont en tous points applicables. Il convient toutefois d'entrer dans certains détails concrets qui illustrent bien les différences entre les conducteurs PE, LE et TE.

13.2.1 Conducteurs PE

Les conducteurs PE doivent être associés aux circuits auxquels ils sont attachés. À chaque circuit d'arrivée ou de départ, un conducteur PE est affecté. Une borne de raccordement est dédiée exclusivement à chaque circuit, à proximité des bornes

des conducteurs actifs. Une même borne PE ne doit pas être commune à plusieurs départs.

La distribution du conducteur PE doit se faire en conducteurs en cuivre ou en aluminium, à partir d'une barre PE elle-même en cuivre ou en aluminium. Nous vous invitons à voir la particularité de distribution du PE dans le cas du schéma TN-C-S.

La dépose d'une unité fonctionnelle ou système, avec ou sans outils, ne doit pas rompre la continuité du réseau des conducteurs de protection et sa liaison à la terre. Les conducteurs PE sont soit en barres nues soit en fils isolés de double couleur vert et jaune. Le symbole attribué aux conducteurs de protection est .

13.2.2 Masses internes

Les masses internes à un ensemble sont des éléments métalliques qui peuvent être portés accidentellement à une tension supérieure à 50 V suite à un défaut d'isolement. De cette définition des masses, nous tirons les enseignements suivants.

Si aucune tension n'est supérieure à 50 V, les parties conductrices ne constituent pas des masses. Ceci s'applique aux portes et aux panneaux sur lesquels ne seraient montés que des auxiliaires alimentés en 24 V ou 48 V par un transformateur de séparation et bien sûr à ceux qui sont éloignés de tous conducteurs sous tension.

Un châssis ou platine de montage équipé d'appareillage utilisant une tension supérieure à 50 V constitue une **masse interne**. Il en est de même de la carcasse métallique d'un transformateur ou de tout autre appareil (disjoncteur, contacteur, etc.) présentant une partie métallique accessible. Ces masses doivent être raccordées individuellement au conducteur de protection.

Toutefois la norme EN 60439-1 admet qu'une partie métallique de « petites dimensions » (environ 50 × 50 mm) et qui n'est pas prévue pour être tenue à la main, ne constitue pas une masse.

Dans la mesure où le châssis ne peut pas être démonté individuellement sans rendre l'ensemble inutilisable, il peut également servir de « prolongation » de la barre de PE. Dans ce sens, certaines masses, comme les carcasses de transformateurs ou d'appareillage peuvent y être raccordées s'ils sont éloignés de la barre PE.

13.2.3 Éléments conducteurs et liaisons équipotentielles de protection (LEP)

Toutes les parties métalliques ne constituant pas des masses au sens précédemment défini, sont des éléments conducteurs au sens donné par la norme NF C15-100. Celles-ci doivent être interconnectées entre elles de proche en proche par des liaisons équipotentielles de protection (LEP). L'élément le plus proche pour les parois est le plus souvent la charpente de la cellule, si celle-ci existe. Sinon le châssis sera la destination naturelle des liaisons équipotentielles. Celui-ci est alors assimilable pour un ensemble à une liaison équipotentielle principale.

La méthode de réalisation des liaisons équipotentielles relève de la responsabilité du constructeur. Les règles de câblage en étoile et de sections convenant aux PE, ne s'appliquent pas aux LEP. Les LEP doivent être câblés en fils de double coloration vert et jaune.

13.2.4 Blindages et liaisons équipotentielles fonctionnelles (LEF)

Le blindage des circuits a pour rôle de constituer une barrière de protection contre les champs magnétiques. Le principe en est expliqué plus loin. En fonction de ce qui précède, il convient de retenir que les conducteurs PE et LEP décrits précédemment sont destinés à véhiculer des courants « non souhaités ». Ceux-ci peuvent générer entre deux points un peu éloignés l'un de l'autre une différence de potentiel de quelques volts, trop faible pour être dangereuse pour les personnes (c'est leur fonction) mais suffisante pour perturber des circuits de transmission de données analogiques ou digitales. De cette observation, il a été recommandé à une certaine époque, de relier tous les blindages et les potentiels de référence en étoile à un même point. Selon ces mêmes recommandations, les blindages ne devaient être reliés qu'en une extrémité à ce point de référence.

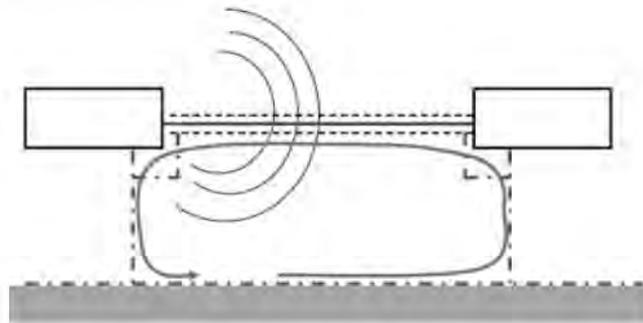


Figure 13.1 – Une variation de champ magnétique produit un courant sur une boucle fermée.

Comme l'illustre la **figure 13.1**, lorsque les lignes blindées sont séparées des plans de masse, la boucle réceptrice formée génère une tension. Si la boucle est fermée, c'est-à-dire si les câbles blindés sont raccordés au plan de masse aux deux extrémités, un courant est généré qui « au mieux » perturbera les circuits de données, au pire fera fondre les isolants par échauffement. Si la boucle est ouverte en ne reliant qu'une seule extrémité des blindages, et si le champ reçu est de haute fréquence ou présente des fronts raides de variation, une tension extrêmement élevée peut apparaître provoquant un « claquage » par surtension (**figure 13.2**).

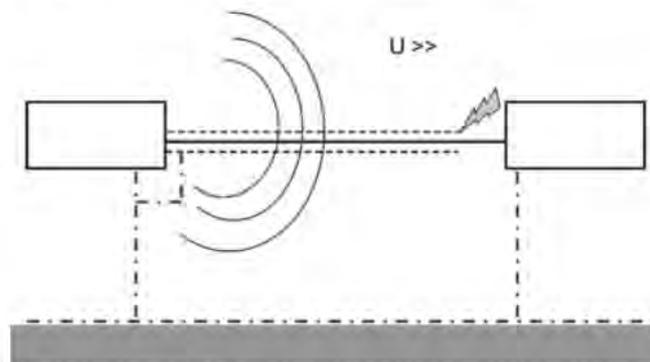


Figure 13.2 – Une variation de champ magnétique produit une tension importante sur une boucle ouverte.

Claquage ou fusion ? Il n'y a pas lieu de choisir, la solution est ailleurs. L'origine étant la surface de boucle deux solutions existent : réduire presque à zéro les surfaces de boucle ou orienter le courant induit sur un conducteur « victime » de section importante (**figure 13.3**).

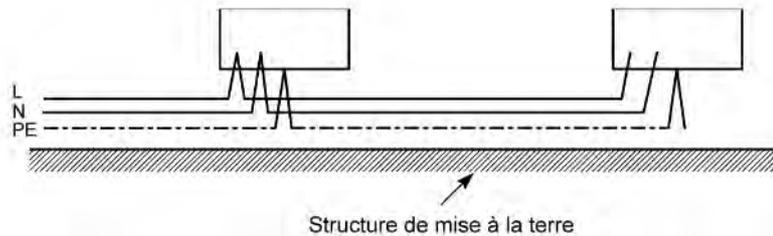


Figure 13.3 – Réduire la surface de boucle en plaquant les conducteurs contre un plan de masse.

■ Notion d'effet réducteur

Imaginons un transformateur dont le secondaire est ouvert. Le courant primaire reste modeste. Il n'est pratiquement tributaire que de l'impédance primaire. Mettons le secondaire en court-circuit. Le courant primaire va considérablement augmenter. Dans le premier cas, l'impédance est élevée, dans le second, elle est beaucoup plus faible.

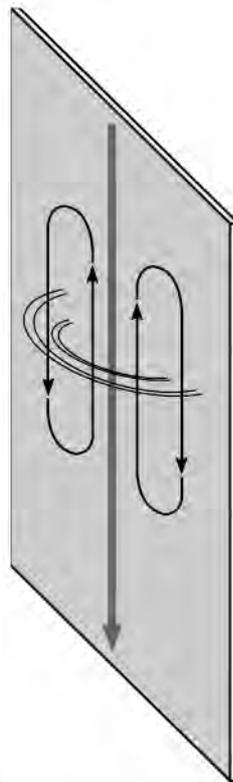


Figure 13.4 – Effet réducteur d'une tôle sur un conducteur.

Plus l'impédance d'un conducteur est élevée, meilleures seront ses capacités d'antenne, à être influencées par la variation d'un champ magnétique. La self inductance d'un fil éloigné d'un autre conducteur est de $1 \mu\text{H}/\text{m}$. Imaginons un conducteur plaqué contre une tôle métallique. Si celui-ci est parcouru par un courant alternatif de haute fréquence ou un courant présentant des fronts raides de variations de courant, la tôle réagira comme le secondaire d'un transformateur en court-circuit. Il en résultera une diminution tout à fait considérable de la self inductance, pouvant aller de 4 à 10 fois. Le fait donc de plaquer des conducteurs contre une platine de montage réduit non seulement la surface réceptrice de champs magnétiques, mais en plus provoque un effet compensateur réduisant considérablement la self inductance réceptrice.

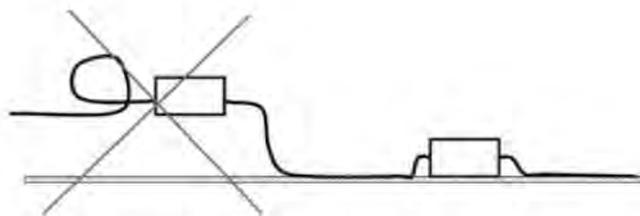


Figure 13.5 – Câbler les connexions sensibles aux influences électromagnétiques contre une platine.

Oubliées les belles trompettes de câblage, à la mode depuis de nombreuses années ! Oubliées les « queues de cochon » consistant à câbler les extrémités des câbles blindés avec un fil vert et jaune traversant toute l'armoire pour les raccorder à la barre de terre ! Les câbles blindés doivent être plaqués contre une platine, de même que les filtres et parafoudres. Raccorder les extrémités à cette platine avec un cavalier conducteur. La platine est elle-même reliée de façon la plus maillée possible aux autres éléments métalliques voisins.

Nous appelons « liaisons équipotentielles fonctionnelles » ces connexions qui ont pour but d'interconnecter les blindages aux éléments métalliques qui leur sont proches. En vertu de ce qui vient d'être dit, ces liaisons doivent être les plus courtes possibles.

Nous observons donc que si le châssis de montage est, au moins partiellement, constitué d'une platine métallique, il se voit maintenant affecté d'un triple rôle :

- extension possible de la barre PE, pour raccorder certaines masses internes ;
- rôle de conducteur d'équipotentialité principal ;
- rôle de plan de masse donnant un effet réducteur aux conducteurs sensibles aux champs électromagnétiques.

Cela sans oublier sa fonction mécanique de montage, avec ses qualités de résistance aux chocs et aux vibrations.

13.2.5 Équipements à isolation totale

La particularité de ces équipements est de disposer d'une enveloppe entièrement isolante. Le conducteur de protection traversant ce type d'ensemble ne doit pas être influencé par une quelconque défaillance d'isolement. Il est alors distribué et

isolé comme un conducteur actif. Toutes masses internes ne doivent pas être raccordées au conducteur de protection.

Pourtant, on peut tout à fait imaginer que deux défauts d'isolement affectent les conducteurs vers une même masse interne (**figure 13.6**). Cette éventualité est très limitée si l'ensemble est constitué de modules indépendants les uns des autres. Elle ne devient pas négligeable si le nombre d'appareils et la quantité de câblage deviennent significatifs.

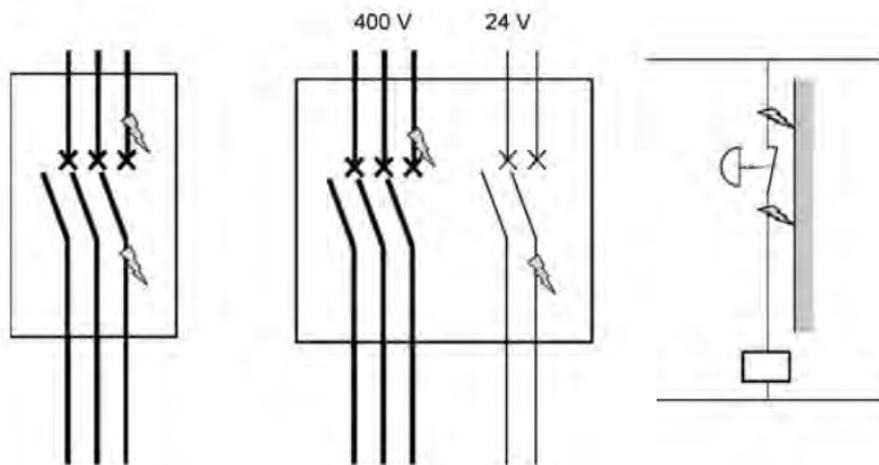


Figure 13.6 – Double défaut d'isolement

vers une masse interne d'un ensemble à isolation totale :

- à gauche : les fonctions de sectionnement et de protection contre les courts-circuits sont shuntées ;
- au centre : la sortie 24 V peut être portée jusqu'à 400 V ;
- à droite : le bouton d'arrêt d'urgence est shunté.

L'enseignement que peuvent apporter ces remarques est que les platines ou châssis métalliques devraient être remplacés par des solutions isolées (platines polyester-fibres de verre, ou profilés isolés).

L'autre solution est de raccorder à la barre PE toutes les masses internes. La protection contre les contacts indirects reste aussi efficace. Toutefois les règles de la classe II ne sont pas respectées. L'apposition du sigle  est interdite.

13.3 Cohabitations courants faibles et courants forts

Cette question pourrait faire l'objet de longs développements et explications théoriques. Nous nous en tiendrons à donner des règles simples pouvant aider à éviter les erreurs de câblage les plus courantes.

■ Règles de base

Nous avons abordé en partie B, chapitre 3, § 3.6, les causes de génération de surtensions dues à des couplages entre conducteurs voisins. Nous en expliquons ici les implications sur les règles de câblage des ensembles BT.

Nous savons qu'un conducteur parcouru par un courant I génère un flux magnétique qui sera intercepté par une ligne constituée de deux conducteurs formant une boucle réceptrice. Ainsi un conducteur de phase, de neutre ou même de terre qui serait parcouru par un pic brutal de courant, induirait sur ses conducteurs voisins une tension perturbatrice.

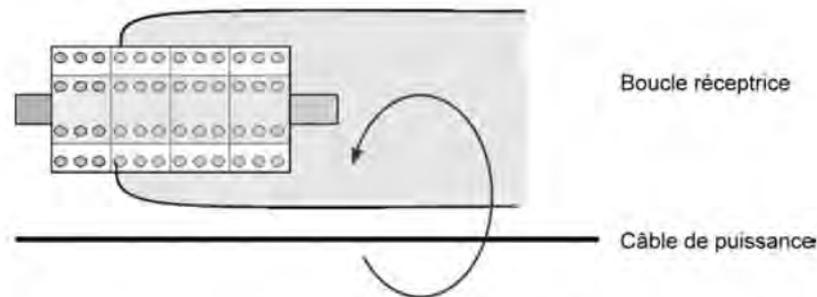


Figure 13.7 – La disposition des bornes oblige à créer une grande surface réceptrice.

Hélas, beaucoup d'appareils, automates programmables, relais ou contacts auxiliaires de contacteurs ou de disjoncteurs, sont conçus de telle façon que les deux bornes de connexions de transmission d'un même signal sont disposées de part et d'autre du rail de montage. Cela oblige à un câblage offrant une très grande surface réceptrice.

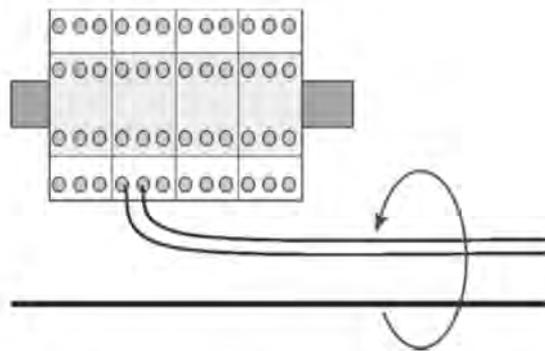


Figure 13.8 – La disposition des bornes permet un câblage avec réduction de la diaphonie.

Il y a donc intérêt à câbler chaque entrée de signal avec ses deux conducteurs « aller et retour » selon le même parcours. Il convient même dans certains cas de torsader ces paires de conducteurs afin d'annuler la surface réceptrice.

Les conducteurs victimes sont influencés par des conducteurs coupables dans la mesure où ils suivent sur une certaine longueur un chemin parallèle. Pour éviter ce risque il convient de câbler les conducteurs de courants faibles perpendiculairement aux conducteurs de puissance. Proscrire les goulottes et les torons communs aux conducteurs de puissance et de contrôle.

13.4 Techniques de maintien des fils (goulottes, torons, peignes)

Ce sujet est assez révélateur de l'évolution de la « qualité ressentie » de la réalisation des ensembles à basse tension. Chacun a sans doute vu ces superbes tableaux des années 1930, constitué de grands panneaux de marbres et câblés en fils rigides soigneusement disposés en parallèle et coudés à angles droits. Beaucoup d'appareils et de barres étaient nus. La beauté du câblage renforçait sans doute une approche « magique » de l'électricité. La « sacralisation » des tableaux électriques suffisait peut-être à n'en réserver l'accès qu'à une classe d'ouvriers au savoir-faire mystérieux... L'utilisation des fils souples a incité les câbleurs à réaliser de magnifiques bottes de fils appelées torons. La beauté de leur réalisation restait digne des faisceaux de fils rigides. Le câblage sur châssis ou sur platine appela l'invention de la goulotte puis des « lyres » de maintien de fils. Cette technique imposait les fils souples, surtout pour le câblage des équipements de machines. C'en était fini des beaux câblages en fils rigides dont on pouvait suivre du simple regard, le parcours. Les schémas devenant de plus en plus compliqués, il a fallu inventer le principe de repérage des fils par bagues élastiques puis par clips ou autres méthodes.

Le repérage par bagues numérotées demande un certain espace entre les appareils et les goulottes. Ce qui demande une assez grande surface d'armoire. Dans de

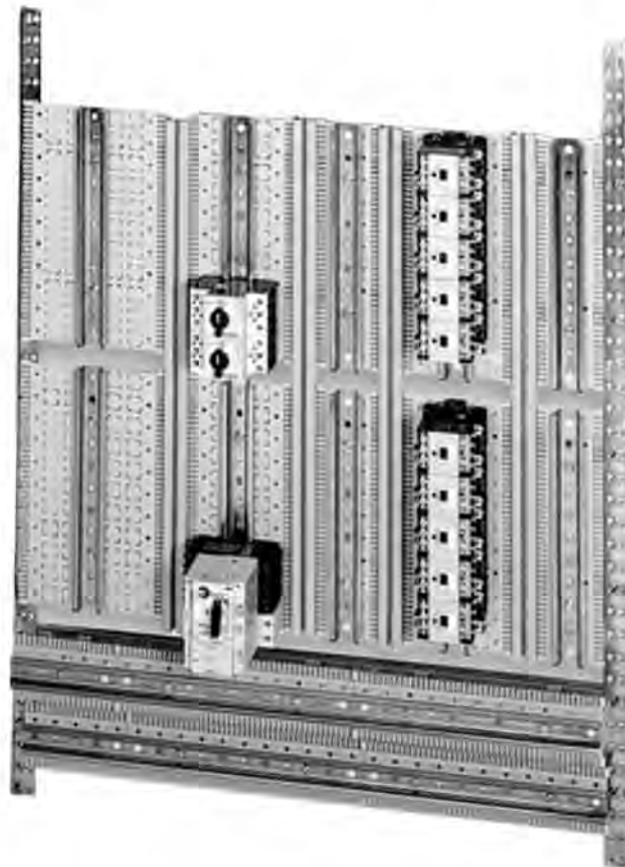


Figure 13.9 – Châssis sans goulotte (Moeller Electric).

nombreux cas (en équipements de machines-outils par exemple) la réduction des dimensions d'armoire est une recherche importante.

La beauté d'un câblage génère peut-être une appréciation de qualité ressentie, mais qui n'est pas synonyme d'efficacité ni de qualité d'usage. Les goulottes ou les gros torons trop pleins chauffent souvent dangereusement. De plus en cas de dépannage ou de modifications, le déplacement des fils est souvent problématique.

Une autre méthode de passage et de maintien des fils consiste à les faire passer à l'arrière des appareils. Les fils sont maintenus par des peignes. À l'arrière, ceux-ci sont laissés « en vrac ». Les fils sont mieux ventilés, mieux accessibles aux modifications, leurs directions aléatoires diminuent les risques d'influences mutuelles. Enfin, la disparition des goulottes permet un gain de surface appréciable tout en améliorant la visibilité du marquage des fils.

13.5 Connexion des barres entre elles

Ainsi que nous l'avons déjà évoqué, les barres nues sont utilisées à une température assez élevée. Elles peuvent atteindre 125 °C ou même dépasser cette valeur. Il est opportun pour le concepteur d'un ensemble à basse tension de décider si une connexion entre barres doit conduire la chaleur en vue de refroidir une barre potentiellement chaude, ou au contraire former une « barrière thermique » dans l'objectif inverse.

Or la conductivité électrique d'une connexion dépend essentiellement de la pression entre les deux éléments en contact, mais très peu, dans la pratique, de la surface de contact. En effet il est illusoire de prétendre que la pression est uniforme. Elle dépend bien sûr du nombre de boulons de serrage (sans en être proportionnelle). L'échange thermique, quant à lui, dépend de la surface de contact.

La **figure 13.10** présente deux techniques de connexion de deux barres. Les deux solutions sont équivalentes au point de vue de la conductivité électrique, en revanche la solution de gauche défavorise l'échange thermique, alors que celle de droite le favorise. Il n'est pas possible de donner de règle pour recommander l'une ou l'autre des solutions.

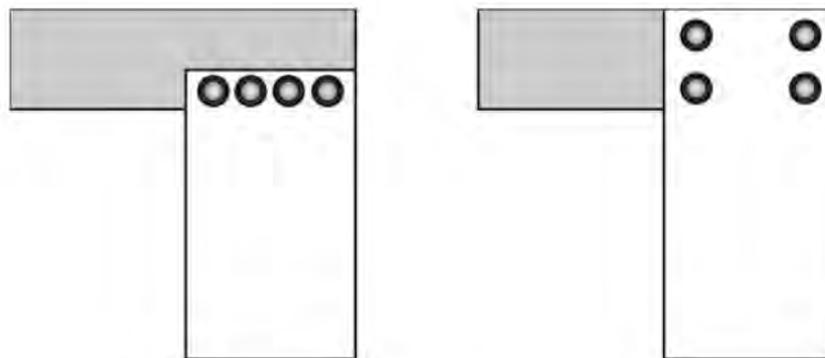


Figure 13.10 – Deux techniques de connexion de barres.

14 • MAINTENANCE DES TABLEAUX ET DE L'APPAREILLAGE

14.1 Principes généraux

Les tableaux électriques sont conçus pour ne demander aucun entretien. Ce propos ne signifie en aucune manière qu'aucune surveillance ne doit leur être portée. Bien au contraire, tout matériel électrique présente des limites d'utilisation. Les appareillages ont, pour leur compte, des limites de longévité de manœuvres. Il est indispensable de surveiller que ces limites ne soient pas dépassées.

Il est totalement illusoire d'intervenir sur un tableau pour en exercer une expertise et dresser un diagnostic suite à une avarie. Bien sûr il est possible de constater des dégâts et d'énoncer le processus qui les a provoqués (échauffement, arc), mais il est pratiquement impossible de démontrer avec certitude les enchaînements d'événements qui ont conduit à une telle situation.

On peut observer qu'un bon médecin posera une longue liste de questions à un patient qui se plaint d'un mal. Le diagnostic et le remède ou l'intervention seront guidés, pour une grande part, par une connaissance la plus parfaite de tous les antécédents du client. Un électricien ne peut pas agir autrement face à un équipement devenu défectueux.

14.2 Principe du carnet de bord

Le carnet de bord d'un tableau constitue son « carnet de santé ». C'est un support où sont enregistrés tous les contrôles, événements et conditions d'exploitation relatifs à un tableau.

Le premier groupe de documents à conserver est constitué par :

- le cahier des charges initial qui en décrit l'usage ;
- la spécification technique du constructeur ;
- le schéma de fabrication avec sa nomenclature ;
- le(s) rapport(s) d'essais, de recettes en usines et de mise en service ;
- les documents d'instructions de transport, de manutention et de montage sur site.

En complément, une description suffisante des procédures d'assurance qualité du constructeur et de l'installateur est utile. Ces documents sont indispensables pour conserver l'historique et la certitude que l'ensemble a été construit et installé en totale conformité aux objectifs d'exploitation envisagés à sa livraison. En effet les

premières causes profondes de défaillance d'un tableau sont dues à une évolution des conditions d'exploitation, par exemple : le facteur de foisonnement des départs d'une colonne a augmenté très significativement ; le facteur de marche de plusieurs départs a augmenté ; la ventilation a été obstruée ; une pollution a diminué le niveau d'isolement ou corrodé des parties essentielles, etc.

Le deuxième groupe de documents à enregistrer concerne toutes les modifications effectuées depuis la « naissance » du tableau. Modifications sur le tableau lui-même, mais aussi sur l'installation. L'ajout ou la transformation est certes souvent possible, surtout si le tableau offre un indice de service IS333. Toutefois ces opérations ne sont pas anodines. Il est nécessaire d'enregistrer ces événements, leurs motifs et les contrôles qui ont été pratiqués. Principalement l'incidence sur les intensités simultanées engendrées, que ce soit en régime permanent, ou en service continu.

Des modifications de sources (ajout de transformateur en parallèle, alimentation de remplacement par groupe électrogène...) changent complètement les limites de fonctionnement ou de réglages admises initialement.

Le troisième groupe de documents concerne les pannes ou tous autres événements plus ou moins graves, ayant nécessité une intervention, depuis le simple réarmement d'un disjoncteur ou l'échange d'un appareil. La cause et la solution choisie pour prévenir un nouvel incident, doivent être décrites.

Enfin, le **quatrième groupe de documents** concerne les mesures relevées en exploitation. Principalement les mesures d'intensités et de qualité de courant (harmoniques par analyseur de réseau). Il est particulièrement utile que ces mesures soient horodatées et mises en rapport avec les conditions d'exploitation.

À ce titre, le fait qu'un tableau ait été mis hors tension pendant une assez longue période est un événement important. En effet, pendant ce temps le matériel est beaucoup plus exposé aux corrosions dues à l'humidité ; il échappe souvent à la surveillance du personnel exploitant, quelquefois tenté de prélever certaines pièces pour des besoins d'urgence.

Les contrôles obligatoires d'installations par un organisme habilité, doivent faire partie de ce dossier. Des relevés thermographiques par caméra infrarouge sont particulièrement utiles en tant qu'enregistrement au titre d'historique.

Le carnet de bord est bien sûr, maintenant enregistré sur document informatique. Il sera utilement organisé afin de pouvoir effectuer des recherches et comparer les historiques d'événements et d'interventions entre plusieurs tableaux.

14.3 Observations et mesures

Les toutes premières mesures préventives consistent essentiellement à vérifier la conservation de la construction d'origine.

Les parties mécaniques devant assurer la protection des personnes contre les contacts directs, ainsi que celles devant assurer la protection du tableau contre les agressions extérieures, seront particulièrement examinées. Ainsi l'état et la bonne fixation des portes, cloisons amovibles, des barrières et capotages seront examinés.

Dans certains établissements tels que les centrales de traitement d'eaux, les papeteries, les industries chimiques ou alimentaires, des émanations de vapeurs toxiques, même

en très faibles concentrations, finissent par corroder dangereusement les parties métalliques, en particulier le cuivre. Il y a lieu de noter que les vapeurs les plus agressives sont l'ammoniac (NH_3), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'anhydride sulfurique (SO_3). Les deux premiers gaz ont la particularité de s'infiltrer dans les micro-crevasses des pièces en cuivre qui se forment lors de leurs pliages, puis par ces chemins de progresser leur corrosion en profondeur, jusqu'à réduire considérablement leur conductivité et leur résistance à la rupture. Ce type de dégradation atteint les pièces de contacts tels que les broches de dispositifs débroschables, ou les pôles fixes de contacteurs ou de disjoncteurs. Les jeux de barres sont souvent atteints, mais l'évolution ne reste que visuelle. Les barres prennent une couleur noire, sans incidence sur leur fonction. Toutefois si les jeux de barres reçoivent des dispositifs débroschables ou s'ils sont susceptibles de recevoir de nouvelles dérivations, il est alors indispensable que les barres soient au préalable étamées, éventuellement argentées. L'identification en clair des unités fonctionnelles doit rester maintenue à jour et parfaitement visible. Une confusion d'affectation d'un départ ou d'un appareil de mesure peut entraîner des erreurs qui peuvent conduire à des accidents.

Les réglages des appareils doivent être parfaitement identifiés et vérifiés. Dans ce but un dossier technique, tenu à jour, doit présenter un niveau de confiance absolu. Il servira de référence à la vérification des réglages. Certains appareils n'indiquent pas les réglages en valeurs réelles, mais en valeur relative ou parfois même selon une échelle numérotée. Il est alors indispensable de disposer d'un tableau de correspondance soit sur le dossier technique, soit à proximité des appareils.

Les mesures ponctuelles sont utiles dans le cadre d'un diagnostic précis sur un départ pour lequel une préoccupation particulière est portée. Mais dans le cadre d'une analyse globale d'un tableau, seules les mesures enregistrées peuvent fournir un renseignement utile.

Toutefois il est opportun d'installer des capteurs de courant et/ou de tension afin d'effectuer une campagne de mesure en vue de vérifier, par exemple le courant moyen et maximum distribué par un jeu de barres d'une colonne de tableau. Ce type d'opération peut être utile dans le but de vérifier la possibilité d'augmenter le nombre ou la puissance distribuée dans une colonne, ou à l'inverse, d'analyser la nécessité de les réduire.

14.4 Contrôle des températures

Les accidents dans un tableau ont deux classes d'origines possibles :

- **amorçage** dû à la dégradation du niveau d'isolement ou introduction de corps étranger (ou animal) ;
- **échauffement** dû à une consommation excessive de courant ou à la dégradation de la conductivité d'une connexion.

Il est indéniable que les dégradations par échauffement excessif représentent la grande majorité des défaillances constatées dans les tableaux à basse tension. Il est certain qu'il n'est pas possible de disposer de mesures d'intensités en tout point d'un ensemble. Il n'est pas plus possible de contrôler la qualité de toutes les connexions.

D'ailleurs, nous l'avons déjà souligné, il est très néfaste de chercher à serrer continuellement les connexions. La seule solution moderne et efficace réside dans le contrôle des températures des conducteurs et de leurs connexions.

Les thermomètres à sondes peuvent rester utiles pour la mesure de parties cachées et peu accessibles. Mais « l'arme absolue » est la caméra infrarouge. Celle-ci, selon le modèle peut donner une image des différences de températures, révélant les points anormalement chauds éventuels.

Si, sur un départ triphasé, une phase est plus chaude qu'une autre sur toute la longueur de son parcours, un déséquilibre d'intensité est certain. Si une connexion sur une phase présente un point chaud, un desserrage ou oxydation est détecté. Si un répartiteur de courant présente une température anormale, une surconsommation d'intensité est à craindre.

Cet outil est formidablement utile pour constituer un « reportage » de référence qui sera enregistré sur papier, ou mieux sur dossier d'images numériques. Tous les résultats des campagnes ultérieures de mesure seront comparés à cette référence. En effet ce type de mesures de température ne peut porter à interprétation qu'en mode de comparaison : une borne de phase nettement plus chaude qu'une autre d'un même circuit ; une température d'un câble ou d'un appareil à intensité égale nettement plus élevée que celle qui a été relevée précédemment...

La valeur absolue d'une température relevée ne peut pas apporter à elle seule une valeur de diagnostic. Une borne à 60 °C, un jeu de barres à 100 °C, la carcasse d'un transformateur à 50 °C, sont autant de cas pour lesquels il n'est pas possible de se prononcer en invoquant une situation normale ou anormale. Les constructeurs sont presque unanimement réticents à fournir des informations détaillées sur les valeurs limites en différents points de leurs constructions.

L'accès aux prises de vues thermographiques est toutefois restreint par le souhait des utilisateurs mais aussi de la réglementation, de disposer de plastrons, barrières ou autres capots ayant pour but d'empêcher l'accès aux parties sous tension. Les tableaux cloisonnés forme 2, 3 ou 4 ne facilitent pas ce type de mesures. Les broches des tiroirs ou appareils débroschables sont toujours parfaitement inaccessibles, pourtant elles constituent les points de surveillance les plus sensibles.

Toutefois, certains constructeurs ont disposé les jeux de barres à l'arrière du tableau. Il suffit alors, lorsque cela est possible, de déposer le panneau arrière pour effectuer la prise de vue. Cette opération devrait être faite par des personnes hautement formées sous l'assistance du constructeur lui-même. Bien sûr cette partie arrière du tableau doit être suffisamment dégagée pour y avoir accès.

14.5 Contrôle du serrage des connexions

Si la première cause de panne est, comme il a été expliqué précédemment, une utilisation des matériels dans des conditions non prévues, la seconde cause est sans nul doute liée à la dégradation de la qualité des connexions. Cette dérive se remarque particulièrement dans le cas des bornes de raccordement des câbles multibrins. En effet, lors d'un premier serrage, les brins ne remplissent pas obligatoirement tout le volume de serrage de la borne. Avec le temps, et surtout suite aux échauffements-

refroidissements successifs, les brins tendent à « fluer », c'est-à-dire à mieux se ranger et prendre leur place définitive. Cela se produit au détriment de la pression de serrage. Le remède préventif est de contrôler le serrage après « un certain temps d'utilisation ». Pour être plus concret il est convenu d'opérer ce contrôle au bout de six mois d'utilisation dans des conditions d'exploitation nominales. Il est important, pour que cette opération de prévention ne se transforme pas en dégradation irréversible, de respecter les couples de serrages que les fabricants doivent donner. Cette campagne de contrôle de serrage ne doit être effectuée qu'une seule fois. En effet toutes les bornes ont un effet de serrage élastique. Il est toujours possible de resserrer une borne. Mais il arrive un stade où un élément vient à sa limite de rupture, ce sera en général les filets de la vis ou de l'écrou de serrage.

Dans le cas de certains équipements de machines, les vibrations peuvent entraîner un desserrage. Une solution préventive a été de bloquer les vis avec un point de pâte durcissable, de préférence de couleur visible pour faciliter le contrôle visuel. Mais depuis l'exigence de fournir des appareils avec une protection IPxxB, les vis de bornes se trouvent encastrées. Aussi les bornes les plus récentes sont étudiées pour provoquer un frein de serrage. Toutefois ces solutions, lorsque les équipements risquent d'être soumis aux vibrations sont maintenant remplacées par des serrages sans vis. Un ressort assure la constance de la pression de contact. Différents brevets ont été pris pour assurer cette technologie. L'un des principes est illustré en **figure 14.1**.

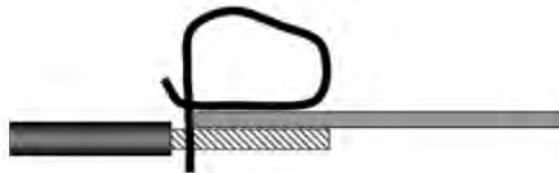


Figure 14.1 – Connexion à ressort.

Cette technique est en pratique utilisable pour les sections jusqu'à environ 16 mm². Il est important dans la conception d'un ensemble que toutes les connexions soient accessibles, en général hors tension, en admettant la dépose de boucliers éventuels. Toutefois certains montages ne peuvent pas permettre un tel accès. C'est le cas par exemple de boîtiers de dérivations de canalisations préfabriquées de fortes intensités. L'encombrement réduit recherché aboutit à de telles situations. Les constructeurs adoptent toutes solutions, par exemple le soudage, ou plus récemment la découpe de pièces à partir de planches de cuivre, méthode rendue possible à l'aide de commande numérique et de découpe au laser. Une autre méthode, bien plus simple à mettre en œuvre est le rivetage à froid. Un exemple de rivet à rupture de tiges est illustré en **figure 14.2**.

Ces exemples illustrent le fait que beaucoup d'innovations ont été issues des exigences de maintenance.

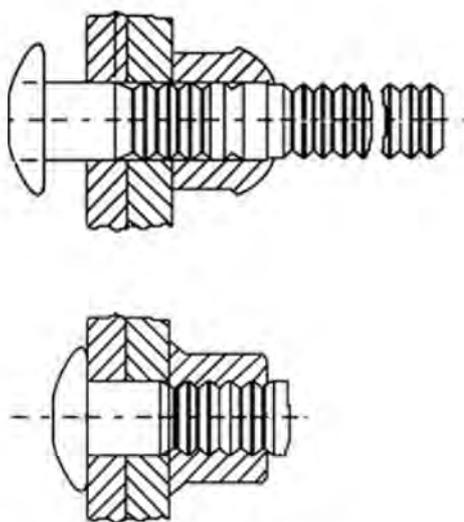


Figure 14.2 – Rivets Avdelock®.

14.6 Surveillance et maintenance de l'appareillage

Il fut un temps, celui des sectionneurs à couteaux et des contacteurs sur barreaux, où les constructeurs fournissaient un manuel de réglage et un catalogue de pièces de rechange. Ce temps est maintenant révolu, avec pour conséquence perverse que les services d'exploitation et de maintenance n'ont plus de référence pour connaître la meilleure attitude à prendre face à ce qui peut être pris pour anomalie.

Des questions très pertinentes peuvent se poser. Par exemple :

- Un interrupteur-sectionneur conserve-t-il sa fonction de sectionnement après un long usage ?
- Un disjoncteur conserve-t-il son pouvoir de coupure après un déclenchement sur court-circuit ?
- Comment savoir si un contacteur est en fin de vie, après avoir effectué un long service de commande de moteur ?

Il faut bien se rendre à l'évidence que les constructeurs n'apportent pas de réponses à de telles questions. Les conseils qui suivent ne cherchent pas à donner des règles de diagnostic précis pour tous types d'appareils, mais visent à apporter des éléments d'informations afin de guider la réflexion des techniciens de maintenance.

14.6.1 Vérification de l'aptitude d'un appareil à conduire son courant d'emploi

Le principe de la vérification est basé sur la perte éventuelle de conductivité. Celle-ci conduit à augmenter la résistance de contact. Une mesure à froid n'est pas significative. Seules les méthodes pratiquant une mesure en situation de fonctionnement peuvent apporter des informations déterminantes.

Deux méthodes sont praticables :

La première vise à évaluer l'échauffement des pôles, par thermographie ou par prise de température par sonde. Les pôles ne sont pas accessibles directement. Mais par conduction thermique, les bornes subissent un échauffement mesurable.

La seconde vise à mesurer la chute de tension entre les bornes amont et aval de l'appareil. Selon cette méthode, il convient de prendre pour donnée de référence la valeur des pertes Joule des pôles de l'appareil, donnée par le constructeur. Elle est donnée en général pour l'ensemble des pôles. Il faut alors ramener cette donnée à une valeur par pôle. En la divisant par l'intensité de référence associée à la donnée du constructeur, on obtient la chute de tension « normale » (dUn). La mesure de la chute de tension (dU) doit être associée à la mesure d'intensité (I). La valeur de chute de tension à prendre en compte (dUr) doit être ramenée à la valeur de l'intensité de référence (I_r) :

$$dUr = dU \times I_r / I$$

Si cette chute de tension (dUr) est significativement plus élevée que la chute de tension normale (par exemple le double), il y a lieu probablement de changer l'appareil. Une mesure de confirmation pourra être pratiquée à quelques jours de décalage.

14.6.2 Vérification de l'aptitude d'un appareil à la fonction de sectionnement

Le conseil vise essentiellement à vérifier si les conditions diélectriques de séparation sont conservées. Dans un premier temps, l'appareil ouvert en position de sectionnement, il faut vérifier à l'aide d'un voltmètre la tension aux bornes de sorties de l'appareil. Si le voltmètre est numérique ou présente une impédance interne élevée, une tension sera mesurée sans être significative. Toutefois cette valeur peut être comparée à celle qui peut être mesurée en aval d'un appareil neuf. L'étendue de la différence guidera l'opérateur sur sa décision.

Une opération plus rigoureuse, mais à mener avec prudence, consiste à mesurer l'intensité de fuite, appareil ouvert, en branchant l'ampèremètre entre deux bornes de sorties. L'intensité ne doit pas excéder 6 mA, valeur donnée par la norme NF C15-100. Cette valeur peut sembler élevée. Selon la fonction de l'appareil, une valeur entre 2 mA et 6 mA pourra être jugée suffisamment préoccupante pour changer l'appareil.

14.6.3 Interrupteurs

Les vérifications décrites ci-dessus s'appliquent aux interrupteurs. Pour les gros appareils il est utile de les manœuvrer de temps en temps. En effet l'excès de manœuvres n'est pas à craindre pour ce type d'appareil, mais au contraire l'absence de manœuvre. Cette situation peut conduire à une sorte de « grippage mécanique » par corrosion ou par solidification des graisses qui au fil du temps peuvent se polymériser.

Il est alors utile d'effectuer de temps en temps quelques manœuvres d'ouvertures/fermetures à vide et en charge. La période de 6 mois est à prendre pour base, elle peut être plus fréquente pour les ensembles situés en ambiance froide ou soumises à un environnement assez agressif (condensation, air marin, vapeurs acides...).

14.6.4 Disjoncteurs

La crainte de beaucoup de personnes est d'imaginer, voire d'être persuadé, qu'après une coupure sous court-circuit, le pouvoir de coupure d'un appareil se trouve fortement dégradé. En premier élément de réponse, il faut retenir que le pouvoir

de coupure d'un disjoncteur est lié à la conception de sa cinématique, aux distances de coupure et au nombre de lamelles de ses chambres de coupure. Mais il ne dépend absolument pas de l'état de ses pôles. Tant que le mécanisme n'est pas dégradé et que la tenue diélectrique reste acceptable, le disjoncteur garde entièrement des capacités de coupure.

En revanche la fonction de sectionnement risque de se dégrader, de même éventuellement que sa capacité à conduire son courant nominal, soit parce que les pôles ont perdu beaucoup de matière, soit parce que les bilames du déclencheur thermique ont subi une dérive de leur courbure initiale. Il convient alors de pratiquer les vérifications décrites ci-dessus.

Beaucoup de disjoncteurs ont une fonction test. Cela ne permet pas de calibrer les déclencheurs (sauf certains appareils électroniques, à l'aide d'un boîtier d'étalonnage), mais de vérifier le fonctionnement mécanique des déclencheurs.

Il est utile de réaliser que les disjoncteurs comme les interrupteurs sont beaucoup plus sensibles aux effets du nombre de manœuvres mécaniques et électriques. Cette remarque s'applique particulièrement aux appareils munis d'une commande électrique, par exemple pour des séquences de délestage associées à un contrôleur d'économie d'énergie. Quelquefois les disjoncteurs en tête d'équipements de machines, munis de commande électrique et de bobine à manque de tension sont sollicités beaucoup plus que prévu en raison des arrêts et marches demandés, selon les horaires des personnels d'exploitation (changement d'équipe, temps de pause...).

14.6.5 Fusibles

Bien évidemment, on ne peut pas tester les fusibles. En cas de fusion d'un fusible sur un circuit triphasé, il est indispensable de changer les trois cartouches.

Pour les fusibles en accompagnement de démarreurs direct de gros moteurs (> 100 kW), la pointe de magnétisation à la mise sous tension (*voir partie B, chapitre 3, Protection des moteurs*) tend à provoquer un vieillissement prématuré. Il faut s'attendre à ce que l'un d'eux fonde sans raison apparente.

Certaines cartouches de fusibles à couteaux sont étamées, ainsi que les pinces de leur embase. Après de longues heures de fonctionnement à chaud, les couteaux risquent de se trouver brasés sur leur embase. Si cette anomalie est constatée, l'échange difficile voire dangereux des cartouches risque de faire disparaître l'étamage et de mettre à nu le cuivre ou le laiton. Ce qui provoquera un mauvais contact. Il faut changer l'embase et du même coup, autant changer de fabricant.

14.6.6 Contacteurs

Les contacteurs ont pour fonctions principales de démarrer et arrêter des récepteurs tels que les moteurs, cela un très grand nombre de fois, s'exprimant en millions de manœuvres. Il est utile de comprendre qu'à la coupure d'un courant, l'arc formé est immédiatement dirigé vers les chambres de coupure. Les pastilles de contacts sont ainsi en partie protégées des dégradations des arcs de coupure.

À la fermeture des pôles, on serait tenté de penser qu'aucun arc ne se forme, donc aucune usure n'est provoquée. Pourtant il n'en est rien, bien au contraire. En effet quand un contacteur se ferme, les pôles mobiles étant montés sur un support élastique rebondissent inmanquablement sur les pôles fixes. Ces rebonds sont bien sûr

de très faibles amplitudes. Justement cette faible ouverture sous un fort courant de démarrage, et même sous le courant de magnétisation du moteur, favorise la production d'arcs faisant fondre une partie des pastilles de contacts. C'est la raison pour laquelle ces plaquettes de contact, lorsqu'un pouvoir de fermeture élevé est recherché, sont réalisées avec un matériau pratiquement inapte à la soudure. Car le danger à craindre est la soudure des contacts à la fermeture.

■ Exemple d'observation

« Un contacteur installé récemment a ses pôles très fortement brûlés ; des projections de métal sont importantes dans la région des chambres de coupure. » Ce type d'observation est quelquefois rapporté. La première explication venant à l'esprit est de considérer que le contacteur a fermé sur court-circuit.

Une fermeture sous court-circuit amènerait probablement les pôles du contacteur à se souder. Mais dans ce cas énoncé, la raison de la dégradation est, de façon quasi certaine, que le contacteur a été entraîné dans une commande instable de « type sonnette ». Les pôles ont ouvert et fermé à une cadence extrêmement rapide le courant de démarrage d'un moteur. L'arc n'ayant pratiquement pas le temps de s'éteindre pendant ces manœuvres, les pastilles de contact se consomment rapidement ; leur brasure venant parfois à fondre elles peuvent finir par se détacher. Il est à craindre que le moteur lui-même ait eu quelques dégradations consécutives à ce régime de courant de démarrages par impulsions et surtensions successives. La cause de ce dysfonctionnement en est une perturbation du circuit de commande : borne mal serrée, schéma de commande incorrect, programme d'automate incorrect, influence électromagnétique sur un module électronique mal conçu ou mal câblé.

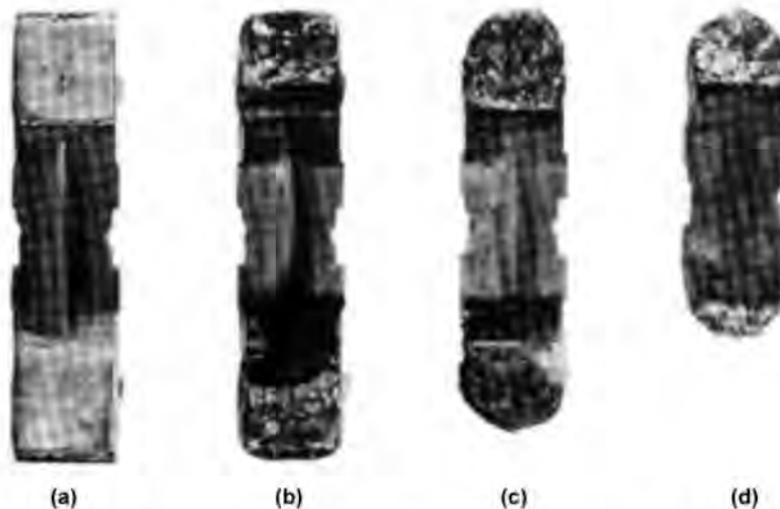


Figure 14.3 – Différents stades d'usure de pôles de contacteur (Moeller).
Seule l'image d représente un pôle en fin de vie.

Il faut se méfier de l'impression que peut donner l'observation visuelle de pastilles de contacts d'un contacteur. La seule indication d'usure électrique est une consommation des plaquettes de contacts telle qu'aucune sur-course d'écrasement ne subsiste, aboutissant à ce que la pression de contact devienne très insuffisante, voire nulle.

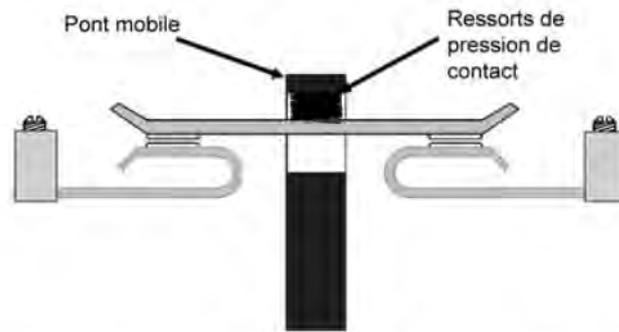


Figure 14.4 – L'absence de sur-course de pression de contact détermine la fin de vie électrique.

Quand l'électroaimant d'un contacteur est excité, l'armature mobile frappe avec une vitesse assez grande l'armature fixe. Au bout de quelques millions de manœuvres, on peut concevoir que les surfaces de frappe arrivent à s'écraser (à se mater comme on l'exprime pour un marteau ou un burin). La conséquence est que l'entrefer nécessaire pour éviter le maintien de l'attraction par rémanence, diminue à tel point que l'armature mobile risque de ne plus retomber. La fin de vie mécanique est déterminée par le fait que pour une tension de bobine inférieure à 20 %, l'électroaimant ne s'ouvre plus.

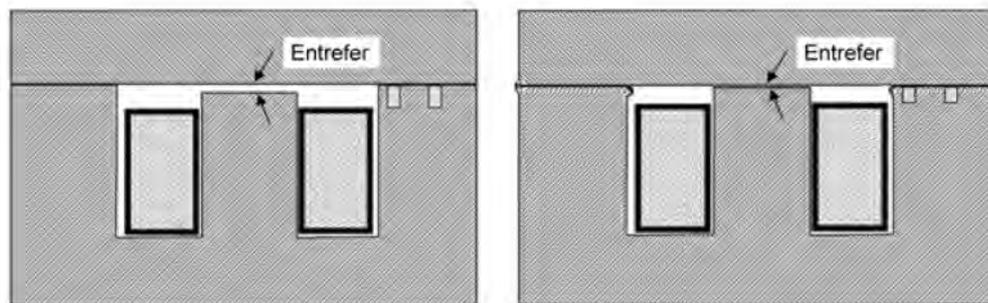


Figure 14.5 – À gauche un électroaimant neuf, à droite un électroaimant en fin de vie : l'entrefer est nul.

Il y a bien sûr d'autres raisons pour qu'un électroaimant ne s'ouvre plus.

■ Exemple d'observation

« La bobine a chauffé excessivement, entraînant la fusion de son mandrin isolant, lequel a bloqué l'équipage mobile de l'électroaimant. »

Une bobine peut chauffer pour deux raisons : la tension de fonctionnement est excessive, par exemple 20 à 30 % supérieure à la tension normale ; l'autre raison qui est de loin la plus plausible, est une commande instable qui provoque un « effet sonnette ». La bobine est alors alimentée sous son courant d'appel avec un facteur de marche important. La valeur moyenne du courant est alors bien supérieure à la valeur normale. Un tel effet est provoqué soit par une erreur de schéma ou de programmation d'un automate programmable, soit par une chute de tension importante se révélant durant l'appel de la bobine. Une connexion desserrée provoque une telle chute de tension.

Il convient de noter qu'une erreur de tension de bobine (230 V au lieu de 110 V) conduit en général à la fusion très rapide du bobinage. Le temps est trop rapide pour entraîner la fusion du mandrin.

Une autre raison de non-ouverture d'un électroaimant peut se produire quand un contacteur est fermé durant une très longue période alors que la température d'environnement est devenue excessive. Les fines isolations séparant les tôles du circuit magnétique peuvent arriver à « couler » légèrement, s'infiltrant par capillarité dans la surface de contact des armatures fixes et mobiles. Cette matière restant dans un état semi-pâteux peut suffire à coller l'équipage mobile.

14.7 Évaluation de l'état des tableaux : profEL®

La plupart des gestionnaires savent que leur établissement est alimenté en énergie *via* un tableau électrique. Mais ils n'en connaissent souvent peu de chose, ni son importance dans la vie, voire la survie, de leur entreprise, ni l'état de sa désuétude éventuelle. Or beaucoup d'installations ont été faites au cours de l'expansion économique des années 1970. Celles-ci ont vieilli, ont été modifiées, les plans et schémas n'ont pas, pour la plupart, été tenus à jour ; les personnels d'entretien qui connaissaient leur historique, ne sont plus présents. Certes des contrôles légaux de conformité sont bien effectués, des réparations mineures sont opérées suite aux observations. Toutefois cette reconnaissance de conformité ne préjuge en rien du degré de risque encouru en cas d'incident, voire d'accident et de leurs conséquences. Un outil puissant permet d'évaluer le **profil ÉLectrique** des tableaux électriques. Cette application nommée **profEL®** a été développée par un groupe de constructeurs de tableaux au sein du GIMELEC, groupe auquel l'auteur de cet ouvrage a activement participé.

14.7.1 Classes de risque et vecteurs de risque

Cette application évalue trois grandes **classes de risque**, chaque classe comprend trois « **vecteurs de risque** » :

- risques pour les personnes :
 - risque pour les exploitants ayant à intervenir sur l'installation électrique,
 - risque pour les employés du site,
 - risque pour le public présent sur le site ;
- risques économiques :
 - coût d'arrêt de travail + pertes de production + de non-qualité,
 - valeur de l'outil de production,
 - valeur des primes d'assurance ;
- risques d'atteinte à l'environnement :
 - pollution en cas d'incendie,
 - pollution due au processus ou au produit fabriqué,
 - développement durable.

Chaque vecteur de risque est évalué à partir d'un questionnaire d'évaluation du niveau de « facteurs d'influence ». Ces facteurs d'influence auront une incidence différente sur les vecteurs de risques selon le type d'établissement.

EXEMPLE

La « **disponibilité des intervenants** » dans la catégorie « **ressources** » signifie la rapidité d'intervention en cas d'incident ayant entraîné une coupure d'alimentation en énergie. Ce facteur d'influence n'a pas la même incidence pour un hôpital, un lycée, une industrie chimique...

Un facteur d'influence peut avoir une incidence aggravante ou une incidence réductrice sur le risque.

EXEMPLE

La présence d'un groupe électrogène, la présence d'un système de communication donnant des alertes et un guide de diagnostic précis sur une partie d'exploitation, sont autant de facteurs réducteurs, mais aggravants en cas d'absence.

14.7.2 Facteurs d'influence

Les facteurs d'influence proposés sont :

- appareillage :
 - année de fabrication,
 - défaillances et observations,
 - obsolescence,
 - service d'appareillages essentiels,
 - service d'appareillages non essentiels ;
- installation liée au tableau :
 - année de réalisation,
 - sources,
 - transformations ;
- ressources :
 - disponibilité des intervenants,
 - maintenance assistée par ordinateur,
 - moyens d'alerte ;
- services liés au tableau :
 - évolutivité,
 - exploitation,
 - maintenance,
 - outils de surveillance ;
- tableau :
 - année de fabrication,
 - défaillances et observations,
 - obsolescence,
 - protection arc interne,
 - suivi du tableau,
 - transformations.

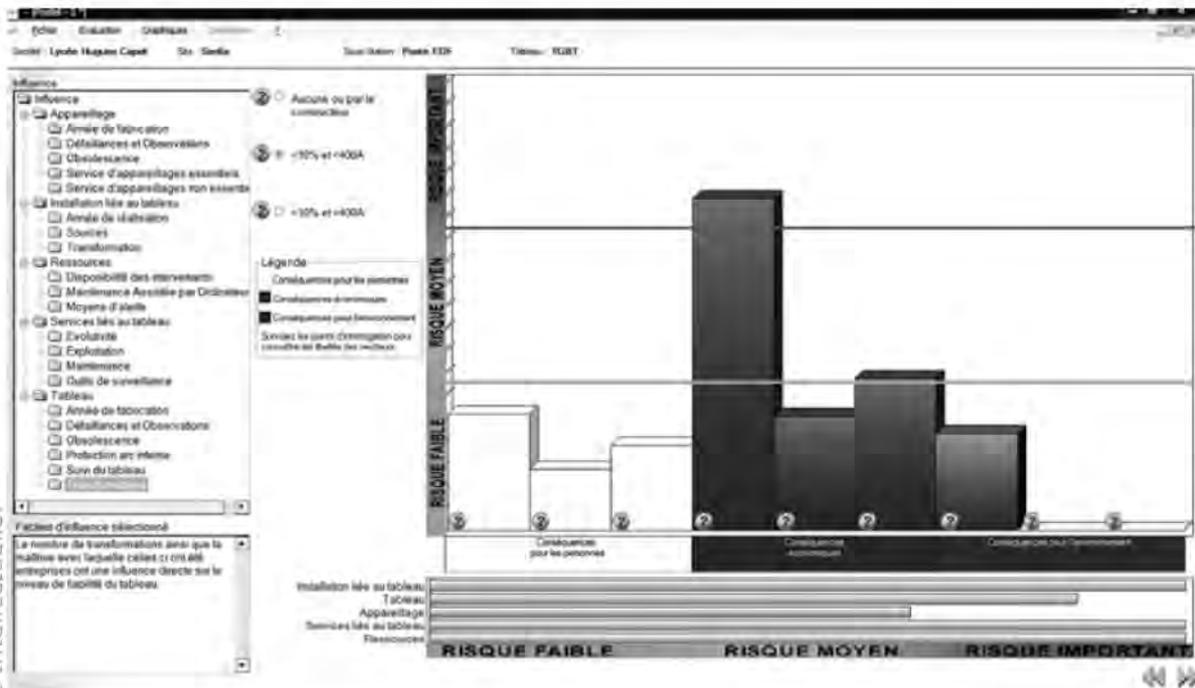


Figure 14.6 – Outil profEL® : représentation des risques en fonction de facteurs d'influence.

L'outil disponible au GIMELEC ou chez les constructeurs adhérents, est utilisable par toute personne. Les résultats ont pour but d'alerter et de sensibiliser les exploitants qui n'ont pour la plupart aucune notion en matière d'installation électrique, et encore moins, sans doute, en matière de risques encourus en cas d'avarie sur les tableaux électriques. Toutefois cette application ne propose aucune solutions d'évolution ou de remplacement. Celles-ci dépendent du contexte général de l'entreprise et de ses objectifs d'investissements.

L'outil pourra servir à établir un cahier des charges décrivant le contexte d'exploitation ainsi que les ressources et services recherchés.

CONCLUSION • ÉVOLUTION DE L'ÉLECTROTECHNIQUE

Depuis les années 1970, l'électrotechnique a considérablement évolué. Les efforts considérables des constructeurs en matière de recherche et développement ont permis la création de nouveaux appareils plus performants, plus économiques et plus sûrs. Trois vecteurs ont favorisé cette évolution :

- une réglementation de plus en plus précise et contraignante a conduit les constructeurs à entreprendre une démarche qualité effective ;
- une recherche d'innovation afin de se différencier de la concurrence ;
- une volonté de réduire les coûts de fabrication pour s'adapter à une pression du marché énorme.

La venue de nouveaux outils d'étude et de calculs a formidablement amélioré la qualité et la fiabilité des études. Les catalogues électroniques ont fait leur apparition, bien que leur gestion reste encore difficile à maîtriser. Comme nous l'avons déjà exprimé au cours de cet ouvrage, ces outils ont quelquefois dégradé le niveau de formation de nombreux acteurs du métier. Ce devrait être une priorité de mieux former les ingénieurs et techniciens aux technologies de base ainsi qu'à la réglementation qui régit notre métier.

Au sujet des bases de données concernant les produits, les constructeurs et éditeurs de logiciels n'ont pas encore franchement tranché entre rendre captifs leurs clients en les enfermant dans un système (logiciels, base de données, information, produits, solutions, services...) ou à l'inverse rendre publiques et compatibles le maximum d'informations afin d'incorporer les produits dans tous systèmes d'intégration, de configuration ou de calculs.

Une nouvelle vision s'est rapidement développée dans les esprits. Celle d'envisager toute activité, toute production, industrielle en particulier, dans un esprit d'optimiser les ressources de façon durable, qu'elles soient matérielles, immatérielles ou humaines.

Dans cette optique, depuis déjà un certain temps les normes ISO 14000 proposent une démarche entièrement calquée sur les normes de la série ISO 9000 en matière d'assurance qualité. Cette organisation vise à ce qu'une entreprise applique une approche environnementale où tous les aspects, tant dans le choix des matériaux, des procédés de fabrication ou de recyclage, sont examinés et mis en œuvre. Cette démarche tend à rechercher constamment toute amélioration. La première action qui ait été entreprise a été d'éliminer l'utilisation de produits dangereux pour la

santé. Parmi ceux-ci : l'amiante, le cadmium, le plomb, le chrome. Ainsi le fameux traitement de surface des châssis « cadmié-bichromaté » a dû être remplacé par des procédés de galvanisation plus classiques. Le cadmium, encore lui, donnait une magnifique couleur rouge à nos boutons et poignées d'arrêt d'urgence. Il a dû être remplacé par d'autres ingrédients plus doux, au prix d'une couleur un peu moins flatteuse.

Les dernières directives européennes sur le recyclage des matériaux ont obligé les constructeurs à réviser leur conception. Par exemple, réduire les quantités de matières est une bonne intention, mais aujourd'hui la recherche se concentre sur la notion de cycle de vie des produits. Le produit bon marché et jetable n'a plus cours, il s'agit d'utiliser des matériaux recyclés ou recyclables et également de concevoir des appareils facilement démontables afin d'en prélever les matériaux à trier plus facilement. Cette révolution n'est sans doute pas facile à gérer pour les appareils à usage domestique qui, selon les règles actuelles, ne doivent pas être démontables.

Dans le domaine des installations, une conception visant les économies d'énergie devrait devenir l'une de premières préoccupations dans leur conception. Actuellement la norme NF C15-100 n'oriente guère les concepteurs vers cette exigence. Par exemple, concernant le traitement des courants harmoniques, cause importante d'échauffement et de pertes d'énergie, la norme devrait plutôt promouvoir voire imposer les solutions d'élimination de ces perturbations à leur source plutôt que les admettre comme un « mal incontournable » et préconiser de doubler ou quadrupler les conducteurs de neutre.

Les chutes de tension sont maximales pour un facteur de puissance de l'ordre de 0,8, principalement pour les canalisations de fortes puissances. Là encore, plutôt que distribuer de fortes puissances réactives, il est préférable de redresser le $\cos \Phi$ au plus près des consommateurs. L'utilisateur – et aussi la planète – s'en porterait mieux, avec moins de consommation, moins de pertes et moins de cuivre installé. Toujours sur le thème des pertes Joule, l'idée d'augmenter les sections des câbles pour entraîner moins de pertes est sans doute une idée qui mérite attention. Mais si nous dépassons le simple calcul économique (achat des câbles comparé au gain de consommation d'énergie) pour nous projeter dans un calcul purement global en matière d'énergie, le raisonnement serait, compte tenu de tout le processus global de fabrication d'un câble, depuis la mine de cuivre, la fabrication des matières isolantes, la fabrication, l'installation, le transport des matières et des personnes..., combien faut-il dépenser de kWh pour gagner 1 kWh en pertes Joule en augmentant les sections ?

La question est ouverte, la ou les réponses ne sont pas évidentes.

En attendant, ainsi que nous l'avons évoqué au chapitre 11, § 11.3, les chutes de tension sont beaucoup plus critiques pour des sections faibles (nous dirons inférieures à 16 mm²). Il est alors rentable de disposer les tableaux de distributions terminales le plus proche possible des utilisations. Les longueurs de câbles devant s'approcher de 10 ou 20 mètres. Les sections, les chutes de tension ainsi que l'application des règles de protection des personnes sont alors optimales. Seulement il faut convaincre les architectes à ces concepts. D'où la nécessité de diffuser une telle information et peut-être de réhabiliter les ouvrages électriques dans la conception des bâtiments.

Suivant la même logique, les très grandes installations mettant en œuvre de très gros consommateurs, devraient plus souvent utiliser les réseaux 400/690 V. Les gains de sections de câbles et de perte d'énergie sont assez considérables. Beaucoup d'unités de production utilisent déjà ce type de réseau. Il pourrait être plus répandu.

Copyright © 2008 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Annexes

A.1 Définitions relatives aux courants

■ Courant thermique conventionnel à l'air libre I_{th}

(EN 60947-1 § 4.3.2.1)

C'est la valeur maximale du courant utilisé pour les essais d'échauffements à l'air libre, à la température ambiante conventionnelle (= 35 °C). Cette valeur doit être au moins égale à la valeur du courant assigné ininterrompu I_u .

■ Courant assigné ininterrompu I_u

Valeur fixée par le constructeur que le matériel peut supporter en service ininterrompu (des semaines, des mois ou même des années).

■ Courant thermique conventionnel sous enveloppe I_{the}

(EN 60947-1 § 4.3.2.2)

C'est la valeur maximale du courant utilisé pour les essais d'échauffements d'un matériel sous l'enveloppe définie par le constructeur, à la température ambiante conventionnelle (= 35 °C) à l'extérieur de l'enveloppe.

■ Service temporaire

(EN 60947-1 § 4.3.4.4)

Service dans lequel les contacts principaux d'un matériel demeurent fermés pendant des durées qui ne sont pas suffisamment longues pour permettre au matériel d'atteindre l'équilibre thermique, les durées de fonctionnement en charge étant séparées par des durées sans charge d'une valeur suffisante pour établir l'égalité de la température avec celle du milieu refroidissant. Ce service concerne par exemple les appareils utilisés uniquement durant les périodes de démarrage. Si les démarrages sont répétitifs, le service devient un service intermittent.

■ Service intermittent

(EN 60947-1 § 4.3.4.3)

Service avec des durées de fonctionnement en charge pendant lesquelles les contacts principaux d'un matériel demeurent fermés, et dont la relation avec les durées sans charges est définie, chacune des durées étant trop courte pour permettre au matériel d'atteindre l'équilibre thermique.

Le service intermittent est caractérisé par la valeur du courant, la durée du passage et le facteur de marche.

■ Facteur de marche F_m

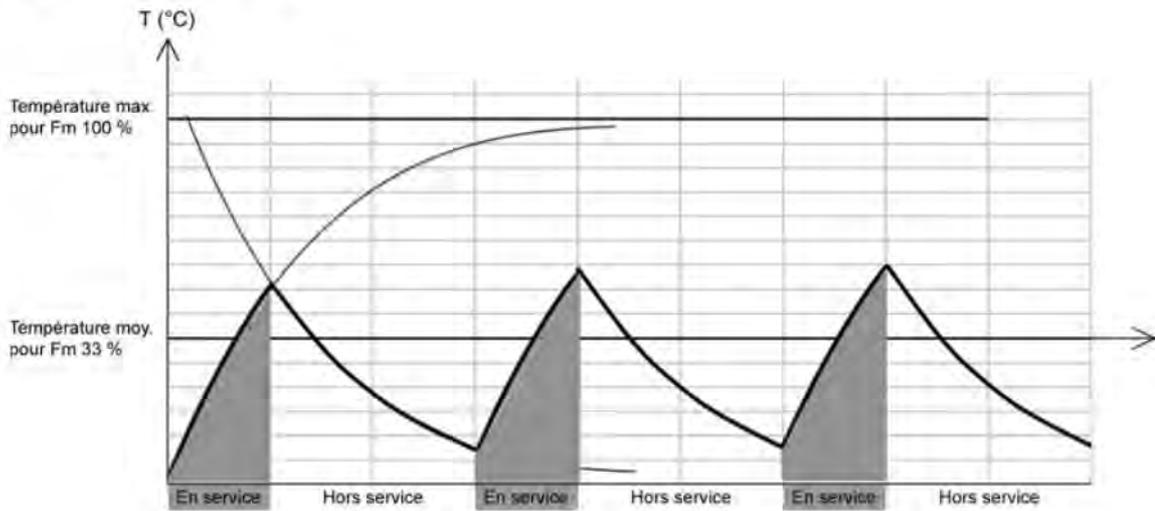


Figure A.1 – Représentation d'un cycle de fonctionnement régulier.

Un circuit ou un récepteur peut être utilisé pour un temps limité t selon un cycle donné T_0 . Exemple d'une durée d'utilisation 10 min pour un cycle de 30 min. Ce circuit ou ce récepteur recevra une énergie Joule de I^2 pendant le temps t , puis aucune pendant le reste ($T_0 - t$). Ramenée au temps T_0 , l'énergie résultante est de $I^2 \cdot (t/T_0)$ par seconde. On nomme *facteur de marche* le rapport du temps de marche à un temps de cycle, soit, dans notre exemple $F_m = t/T_0$. On imagine très vite que le facteur de marche ne suffit pas pour en déduire ce qu'on peut appeler une « puissance moyenne d'échauffement ». En effet si le facteur de marche est de 33 % pour un cycle d'une journée, le temps de marche est de 8 heures. Pendant cette durée l'appareil a atteint sa température maximale. Donc un facteur de marche doit toujours être associé à une durée de cycle.

■ Facteur assigné de diversité

(EN 60439-1 § 4.7)

Rapport de la somme maximale à n'importe quel instant des courants présumés des circuits d'une installation ou partie d'installation à la somme de leurs courants assignés.

La norme propose le tableau suivant de facteur de diversité (nommé aussi facteur de foisonnement) :

Tableau A.1

Nombre de circuits principaux	Facteur de diversité
2 et 3	0,9
4 et 5	0,8
6 à 9 inclus	0,7
10 et plus	0,6

■ Courant de défaut I_f

C'est la valeur du courant qui s'établit en cas de défaut d'isolement.

Le courant de défaut est égal à la tension génératrice divisée par l'impédance de la boucle de défaut. En général la tension génératrice est la tension simple phase-neutre. L'impédance de boucle est la somme des impédances de phase et du conducteur de protection, en parcourant le circuit présumé en court-circuit depuis la source, vers le défaut et retour à la source.

Dans le cas du schéma IT avec neutre, la boucle de défaut est celle qui met en jeu deux défauts, l'un sur une phase, l'autre sur le neutre. Dans le cas du schéma IT sans neutre, la tension génératrice est la tension entre phases, la boucle de défaut est celle qui met en jeu deux défauts sur deux phases différentes. L'évaluation du courant de défaut a pour objet essentiel de connaître le plus petit courant de court-circuit dû à un ou plusieurs défauts d'isolement.

La recherche vise donc une valeur maximale de l'impédance.

La connaissance de la valeur la plus faible d'un courant de court-circuit est essentielle pour connaître le temps maximum de fonctionnement du dispositif de protection contre les courts-circuits.

■ Pouvoir assigné de coupure en court-circuit I_{cn} , I_{cu} ou I_{cs}

C'est la valeur du courant assignée à un matériel par son constructeur définissant la valeur maximale de court-circuit que peut couper un disjoncteur (*voir chapitre 3, § 3.2, Protection contre les courts-circuits*).

■ Pouvoir assigné de fermeture en court-circuit I_{cm}

C'est la valeur du courant assignée à un matériel par son constructeur définissant la valeur maximale de court-circuit que peut fermer un interrupteur ou disjoncteur.

Il s'exprime par la valeur maximale de crête du courant présumé.

■ Courant assigné de courte durée admissible I_{cw}

C'est la valeur du courant assignée à un matériel par son constructeur définissant la valeur maximale de courant que peut supporter sans dommage un matériel pendant un temps défini, dans les conditions spécifiées par la norme correspondante de ce matériel.

Pour un interrupteur, après application du courant dans le temps spécifié, si l'appareil est apte au sectionnement, les essais de cette aptitude doivent être menés avec succès.

■ Courant assigné de court-circuit conditionnel I_q

C'est la valeur du courant assignée à un matériel par son constructeur définissant la valeur maximale de court-circuit que peut supporter de façon satisfaisante un matériel protégé par un dispositif de protection contre les courts-circuits spécifié par le constructeur, pendant la durée de fonctionnement de ce dispositif. Il s'exprime par la valeur efficace du courant de court-circuit présumé.

A.2 Définitions relatives aux fonctions des appareils

■ Interrupteur général

En tête d'installation un dispositif de coupure et de sectionnement doit être disposé afin de séparer le plus rapidement possible et en toutes circonstances l'installation de sa source.

■ Arrêt d'urgence

L'arrêt d'urgence s'applique à un processus ou un mouvement qu'il s'agit, en cas de danger, d'arrêter avec la plus grande sûreté.

La séquence d'arrêt d'urgence n'entraîne pas obligatoirement une coupure immédiate et totale de la tension. Toutefois la phase d'arrêt mécanique doit se terminer par l'ouverture du circuit de puissance par un contacteur (arrêt de type 1 ou 2, voir chapitre 4, § 4.5).

Les commandes d'arrêt d'urgence doivent obligatoirement être de couleur rouge sur fond orange.

Pour des ensembles mécaniques dangereux la manœuvre d'un arrêt d'urgence doit conduire à une situation visible et réversible uniquement avec des dispositifs demandant une clé ou un outil.

Le réarmement d'un arrêt d'urgence ne doit pas provoquer un redémarrage.

Les arrêts d'urgence doivent être à sécurité positive, c'est-à-dire indépendants de la tension de commande.

Pour les machines ou ensembles particulièrement dangereux, des dispositions doivent être prises pour assurer le fonctionnement de l'arrêt d'urgence même en cas de défaillance d'un matériel, de coupure d'un câblage ou de pontage de contacts (niveau de risque 3 ou 4, voir chapitre 4, § 4.4).

■ Coupure d'urgence

(NF C15-100 § 463) Cette fonction est demandée pour couper l'alimentation d'une installation ou une partie d'installation afin de supprimer un danger inattendu. Cette fonction peut être réalisée par un interrupteur, dans ce cas c'est bien souvent l'interrupteur général ; mais elle peut être réalisée par des commandes électriques : commande électrique motorisée, ou bobine à émission ou à manque de tension de disjoncteurs, ou par un contacteur. Il est nécessaire d'effectuer une opération manuelle afin de rétablir la tension.

Dans un tableau de distribution d'énergie on n'utilise pas de dispositif à manque de tension, bien qu'il soit à « sécurité positive », car dès la moindre coupure de tension, les dispositifs s'ouvriront automatiquement, ce qui rend l'installation inexploitable.

■ Contacteur

(EN 60947-1 § 2.2.12) Appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharge en service.

■ Démarreurs de moteurs

(EN 60947-1 § 1.1.2) Appareils ou ensemble d'appareils destinés à provoquer le démarrage des moteurs et à les amener à leur vitesse normale, à en assurer le fonctionnement continu, à interrompre leur alimentation et à assurer leur protection contre les surcharges ainsi que celle des circuits associés.

A.3 Définitions relatives à la protection des personnes

■ Schémas de liaison à la terre SLT

Définition de la norme NF C15-100 § 312.2. Les schémas de liaison à la terre, longtemps nommés « régimes de neutre », décrivent de quelle manière le réseau et les masses sont reliés à la terre. Ils sont désignés par des symboles formés de deux à trois groupes de lettres.

Les symboles utilisés ont la signification suivante :

□ Première lettre

Situation de l'alimentation par rapport à la terre.

T = liaison directe d'un point avec la terre ;

I = soit isolation de toutes les parties actives par rapport à la terre, soit liaison d'un point avec la terre à travers une impédance.

□ Deuxième lettre

Situation des masses de l'installation électrique par rapport à la terre.

T = masses reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle d'un point de l'alimentation ;

N = liaison électrique directe des masses au point de l'alimentation mis à la terre (en courant alternatif, le point mis à la terre est normalement le point neutre ou, si un point neutre n'est pas disponible, un conducteur de phase).

□ Autres lettres (éventuelles)

Disposition du conducteur neutre et du conducteur de protection.

S = fonction de protection assurée par un conducteur distinct depuis le neutre ou depuis le conducteur actif mis à la terre (en courant alternatif, un conducteur de phase mis à la terre) ;

C = fonctions de neutre et de protection combinées en un seul conducteur (conducteur PEN).

■ Masse

Définition de la norme NF C15-100 § 232.8 : « Partie conductrice d'un matériel, susceptible d'être touchée, et qui n'est pas normalement sous tension, mais peut le devenir lorsque l'isolation principale est défailante. »

NOTE

Une partie conductrice d'un matériel qui ne peut être mise sous tension en cas de défaut que par l'intermédiaire d'une masse n'est pas considérée comme une masse.

Les points importants dans la définition sont :

- **partie conductrice** (en principe métallique) ;
- **accessible** (si cette partie est éloignée de plus de 2,5 m, augmentés de la longueur des objets normalement transportés, elle n'est plus considérée comme une masse) ;
- **située au voisinage de conducteurs sous tension dont l'isolation risque d'être défaillante**. Si les conducteurs sont à isolation renforcée, la partie conductrice ne constitue plus une masse.

Une partie conductrice qui ne répond pas à la définition d'une masse est un élément conducteur.

■ Élément conducteur

Définition de la norme NF C15-100 § 232.9, *Élément conducteur (étranger à l'installation électrique)* – 826-03-11 : « Partie conductrice ne faisant pas partie de l'installation électrique et susceptible d'introduire un potentiel électrique, généralement celui d'une terre locale. » Peuvent être des éléments conducteurs :

- les éléments métalliques utilisés dans la construction des bâtiments ;
- les canalisations métalliques de gaz, eau, chauffage, etc., et les appareils non électriques qui leur sont reliés (radiateurs, cuisinières non électriques, éviers métalliques, etc.) ;
- les sols et parois non isolants (§ 235.2).

■ Tension de contact

Définition de la norme NF C15-100 § 234.2, *Tension de contact (effective)* : « Tension entre des parties conductrices quand elles sont touchées par une personne ou un animal domestique ou d'élevage. »

NOTE

La valeur de la tension de contact effective peut être sensiblement influencée par l'impédance de la personne ou de l'animal domestique ou d'élevage en contact électrique avec ces parties conductrices.

§ 234.4, *Tension limite conventionnelle de contact (UL)* : valeur maximale de la tension de contact présumée qu'il est admis de pouvoir maintenir indéfiniment dans des conditions d'influences externes spécifiées.

Dans certains textes réglementaires, cette tension est dénommée *tension limite de sécurité*. Dans des conditions d'environnement normales, la tension limite de sécurité est fixée à 50 V, en courant alternatif et à 120 V en courant continu (§ 411.1).

A.4 Parafoudres

■ Niveau de protection U_p

C'est la valeur maximale de tension, exprimée en kV, aux bornes du parafoudre dans les conditions normales de son fonctionnement. C'est le paramètre qui caractérise les performances de protection du parafoudre.

■ Tension maximale de service permanent U_c

C'est la tension maximale que le parafoudre peut supporter en permanence (en valeur efficace).

■ Surtensions temporaires dues aux défauts BT (UT)

La norme NF EN 61643-11 (C 61-740) prévoit deux possibilités pour la tenue des parafoudres aux surtensions temporaires (UT) générées par le réseau BT.

□ Tenue au court-circuit

Valeur maximale, définie par le constructeur, du courant de défaut 50 Hz qui peut transiter dans une branche du parafoudre lors d'un défaut interne au parafoudre. Cette valeur doit être supérieure au courant maximal de court-circuit présumé au point d'installation.

□ Valeur assignée d'interruption du courant de suite

Cette notion s'applique uniquement aux parafoudres ayant un courant de suite (exemple : parafoudre à éclateur).

C'est le courant de court-circuit que le parafoudre est capable d'interrompre par lui-même sans l'aide de son dispositif de protection associé. Dans ce cas, cette valeur doit être supérieure au courant maximal de court-circuit présumé au point d'installation.

■ Courant nominal de décharge I_n

C'est la valeur de crête du courant de forme d'onde 8/20 pour lequel sont testés et caractérisés les parafoudres.

I_n caractérise le courant que peut écouler plusieurs fois le parafoudre sans dommage. Pour les parafoudres installés à l'origine d'une installation alimentée par le réseau public, le courant nominal de décharge recommandé est 5 kA.

■ Courant maximal de décharge I_{max}

C'est la valeur maximale du courant de forme d'onde 8/20 que peut écouler le parafoudre de type 2 sans modification de ses caractéristiques mais sans assurer nécessairement le niveau de protection U_p .

■ Courant de choc I_{imp}

C'est le courant de choc, généralement de forme d'onde 10/350, pour lequel sont testés et caractérisés les parafoudres de type 1. Les parafoudres de type 1 sont exclusivement destinés à être installés dans les bâtiments équipés de paratonnerre. La valeur minimale de I_{imp} est 12,5 kA.

B • CRITÈRES DE SÉLECTION

Cette annexe propose une check-list des différents critères de sélection des principaux appareillages et ensembles. Des renvois aux explications sont indiqués.

B.1 Interrupteur-sectionneur

- Tension d'emploi U_n ;
- vérifier l'aptitude à la fonction de sectionnement ; § 3.1.1
- vérifier la tenue aux chocs électriques U_{imp} ; tableau 3.3
- définir la catégorie d'emploi ; tableau 4.1
- définir l'intensité d'emploi I_e selon la catégorie d'emploi ;
- vérifier si I_e reste inférieure ou égale à I_{th} pour la température ambiante, ou à I_{th} , pour la température environnante à l'intérieur de l'équipement ;
- vérifier la protection contre les surcharges ;
- vérifier la protection contre les courts-circuits ; § 6.1.3
- si l'interrupteur est doté d'une commande électrique, évaluer le nombre de manœuvres et vérifier la durabilité.

■ Fonctions spécifiques

- Interrupteur en tête de tableau de distribution : § 4.1.3
 - fonction de coupure d'urgence : accessibilité, poignée rouge ;
 - fonction de consignation :
 - condamnation par clé ou cadenas,
 - ouverture de porte en position consignée.
- Interrupteur en tête de tableau d'équipement de machine : § 4.1.3
 - poignée rouge si une fonction d'arrêt d'urgence est assignée, sinon la couleur est noire ou grise,
 - condamnation par trois cadenas,
 - vérifier les conditions d'ouverture de porte en position cadenassée (IP_{xx}B, porte ouverte, indispensable),
 - protection contre les courts-circuits, indispensable,
 - sens de manœuvre, § 5.1
 - évaluer le besoin d'un déclencheur à manque de tension ou à émission.
- Interrupteur local de proximité ou interrupteur pour entretien mécanique : § 4.1.7
 - consignation par trois cadenas,
 - infraudabilité absolue,

- coordination de protection et de fonctionnement (contacts de pré-coupage) avec le tableau MCC en tête.

B.2 Contacteurs et démarreurs

- Tension d'emploi U_n ;
- définir la catégorie d'emploi selon le être attentif aux courants de pointes à la fermeture ; tableau 4.5,
§ 3.4.4
- intensité d'emploi I_e selon la catégorie d'emploi ;
- évaluer l'intensité efficace moyenne en fonction du facteur de marche ;
- vérifier si I_e reste inférieure ou égale à I_{the} pour la température ambiante, ou à I_{th} , pour la température environnante à l'intérieur de l'équipement ;
- vérifier la protection du contacteur contre les surcharges, décider pour le mode de coordination, et vérifier la protection contre les courts-circuits ; § 6.1.1
- évaluer le nombre de manœuvres et vérifier la durabilité ; § 4.3.3
- évaluer le degré de sûreté nécessaire des contacts auxiliaires et n'utiliser que les contacts liés pour les fonctions de verrouillage ; § 4.6.3
- vérifier l'aptitude des contacts auxiliaires à commander des courants faibles. § 4.6.3

■ Fonctions spécifiques

- Commande de batteries de condensateurs figure 4.15
- Contacteurs utilisés en arrêt d'urgence § 4.4

B.3 Disjoncteurs

■ Bien définir la catégorie d'usage

- Installation domestique ou assimilée § 1.1 ; § 3.3.1 ; § 3.3.2
- Protection de lignes en milieu industriel ou grands immeubles § 3.4.3
- Protection de moteurs § 3.4.4 ; 4.3

■ Caractéristiques générales

- Tension d'emploi U_n ;
- vérifier l'aptitude à la fonction de sectionnement § 3.1.1
- U_{imp} conforme au tableau 3.3
- définir le nombre de pôles coupés et protégés ;
- définir le courant de court-circuit présumé ; § 10.6
- définir le pouvoir de coupure I_{cu} , I_{cs} , I_{cw} ou I_{cn} selon le type ; § 3.3.1 ; § 3.3.2
- définir les réglages des déclencheurs de surcharge et de courts-circuits, en fonction des courants de défaut minima et des conditions de sélectivité. § 6.3 ; § 11.8

■ Fonctions spécifiques

□ Fonction interrupteur-disjoncteur

- Catégorie d'emploi selon le tableau 4.5
- intensité d'emploi I_e selon la catégorie d'emploi ;

- vérifier si I_e reste inférieure ou égale à I_{the} pour la température ambiante, ou à I_{th} pour la température environnante à l'intérieur de l'équipement ;
- si le disjoncteur est doté d'une commande électrique, évaluer le nombre de manœuvres et vérifier la durabilité.

□ **Interrupteur-disjoncteur en tête de tableau de distribution**

- Évaluer le besoin de fonction de coupure d'urgence : accessibilité, poignée rouge, ou par bobine de déclenchement (manque ou émission de tension) ;
- évaluer le besoin de fonction de consignation :
 - condamnation par clé ou cadenas,
 - ouverture de porte en position consignée.

□ **Interrupteur-disjoncteur en tête de tableau d'équipement de machine**

- Poignée rouge si une fonction d'arrêt d'urgence est assignée, sinon la couleur est noir ou gris ;
- condamnation par trois cadenas ;
- vérifier les conditions d'ouverture de porte en position cadenassée (IPxxB, porte ouverte, indispensable) ;
- le disjoncteur doit protéger l'ensemble de l'équipement contre les courts-circuits (appareillage, jeux de barres, connexions) ;
- sens de manœuvre § 5.1
- évaluer le besoin d'un déclencheur à manque de tension ou à émission.

B.4 Jeux de barres

- Tension d'emploi U_n ;
- vérifier la tenue aux chocs électriques U_{imp} tableau 3.3
- évaluer le courant d'emploi tenant compte des facteurs d'utilisation, et de diversité, pour les besoins immédiats et futurs ;
- évaluer les courants de pointes lors de démarrages de moteurs ;
- tenir compte de la température environnante à leur position dans les tableaux ;
- tenir compte des conditions de ventilation, du fait de leur capotage de protection ;
- tenir compte de leur orientation (horizontale, verticale, barres à plat...) ;
- évaluer le courant de court-circuit au lieu d'installation et opter pour une protection conditionnelle (avec dispositif limiteur) ou inconditionnelle ; § 3.2.2
- choisir la technologie de raccordement des dérivations en fonction du service recherché, des conditions d'exploitation et des modifications ou extensions futures. chapitres 13 et 14

B.5 Enveloppes et tableaux

■ **Bien définir l'usage**

- 1) Tableau de processus automatique (par exemple manutention)
- 2) Armoire de commande de machine

- 3) Tableau de distribution pour un bâtiment
- 4) Tableau de processus industriel
- 5) Tableau général basse tension

Dans les deux premiers cas, un coffret ou armoire d'usage général conviendra.

Dans le cas 3, une solution de tableau « systèmes constructeurs » à éléments préfabriqués conviendra le plus utilement.

Pour les deux derniers cas, des tableaux construits selon la norme des ensembles de série (EN 60439-1) sera la règle.

■ Coffrets et armoires

- Réaliser un plan de disposition suffisamment aéré pour faciliter l'accès aux appareillages et aux raccordements. Définir les dimensions ;
- définir les conditions d'installation :
 - environnement : poussières, projections d'eau, chocs mécaniques,
 - montage : condition montage (contre un mur, encastré...) ;
- évaluer la température interne en fonction des dimensions, conditions de montage et la dissipation calorifique interne ; chapitre 11
- choisir l'enveloppe en fonction des codes IP et IK requis en fonction des conditions d'utilisation. Décider de disposer d'une ventilation naturelle ou forcée ;
- si des conditions extrêmes de corrosion sont prévisibles, envisager les solutions d'enveloppes en matières moulées. Envisager alors les conditions de ventilations, ainsi que l'application des règles des équipements de classe II ; § 13.2.5
- la technique utilisée pour la commande de l'interrupteur général, ainsi que les conditions souhaitées d'ouverture de porte en fonction de la situation de cet interrupteur (sous tension, ouvert, cadencé...) peut déterminer le type de technologie d'armoire ;
- d'autres fonctions peuvent modifier le choix.

■ Tableaux de process et TGBT

- Le principe d'utiliser les indices de service (IS) sera de grande utilité ; § 12.4
- il est utile de mieux préciser la technologie préférée :
 - indice de mobilité (fixe, déconnectable, débrochable), § 12.2.5
 - forme de séparation. § 12.3

B.6 Canalisations préfabriquées

■ Bien définir l'usage

- 1) Canalisation de transport de forte puissance
- 2) Canalisation de distribution de grands ateliers
- 3) Canalisation de distribution de petits ateliers
- 4) Canalisation de distribution d'éclairage
- 5) Colonne montante pour immeubles

- Les conditions d'environnement et de position de montage sont déterminantes pour le choix de la technologie (ventilée, étanche, moulée...) ;
- le nombre et les conditions de modification des éléments de dérivation influenceront sur le choix de la technologie ;
- la protection contre les courants de courts-circuits sera déterminée pour un défaut à l'endroit de la première dérivation ;
- les conditions de modifications de configuration peuvent favoriser vers le choix de raccords rapides des éléments préfabriqués.

BIBLIOGRAPHIE

■ Normes

- NF C15-100 : Installations électriques à basse tension.
UTE C15-500 : Guide pratique – Détermination des sections des conducteurs et choix des dispositifs de protection à l'aide de logiciels de calcul.
- NF EN 60947-1 à 7 : Appareillage à basse tension.
NF EN 60898 : Petit appareillage électrique.
NF EN 60269-2 : Fusibles basse tension – Partie 2 : Exigences supplémentaires pour les fusibles destinés à être utilisés par des personnes habilitées (fusibles pour usages essentiellement industriels).
- NF EN 60204-1 : Sécurité des machines – Équipement électrique des machines.
NF EN 60439-1 : Ensembles d'appareillage à basse tension – Partie 1 : Ensembles de série et ensembles dérivés de série.
NF EN 60439-2 : Ensembles d'appareillage à basse tension – Partie 2 : Règles particulières pour les canalisations préfabriquées.
- UTE C63-429 : Ensembles d'appareillage à basse tension, Indice de service (IS).
- NF EN 60529 : Degrés de protection procurés par les enveloppes (code IP).
NF EN 60664 : Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension.
- NF EN 60447 : Principes fondamentaux et de sécurité pour l'interface homme-machine, le marquage et l'identification – Principes de manœuvre.
- NF EN 50174-2 : Technologies de l'information – Installation de câblage – Partie 2 : Planification et pratiques d'installation à l'intérieur des bâtiments.
- UTE C15-443 : Guide pratique – Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphérique ou dues à des manœuvres. Choix et installation des parafoudres.
- EN 61643-1 et 11
EN 61643-12 et 21 : Parafoudres basse tension
NF EN 61557-8 : Sécurité électrique dans les réseaux de distribution basse tension de 1 000 Vca et 1 500 Vcc – Dispositifs de contrôle, de mesure ou de surveillance de mesures de protection – Partie 8 : Contrôleurs d'isolement pour réseaux IT.

- NF EN 61558-2-6 : Sécurité des transformateurs, blocs d'alimentation et analogues – Partie 2-6 : Règles particulières pour les transformateurs de sécurité pour usage général.
- NF EN 61009 : Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel avec protection contre les surintensités incorporée pour installations domestiques et analogues (DD) – Partie 1 : Règles générales.
- CEI 60909-1 : Rapport technique – Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif. Partie 1 : Facteurs pour le calcul des courants de court-circuit dans les réseaux alternatifs triphasés conformément à la norme CEI 60909-0.
- CEI 60890 : Rapport technique (TR) – Méthode de détermination par extrapolation des échauffements pour les ensembles d'appareillage à basse tension dérivés de série (EDS).
- CEI 61641 : Rapport technique – Ensembles d'appareillage à basse tension sous enveloppe – Guide pour l'essai en conditions d'arc dues à un défaut interne.
- NF EN 61140 : Protection contre les chocs électriques – Aspects communs aux installations et aux matériels.
- NF EN 61082-1 à 4 : Établissement des documents utilisés en électrotechnique.

■ Documents de constructeurs

Schneider Electric :

- Série Cahiers techniques
- Guides techniques InterSections
 - novembre 2005 : Eco-conception
 - juin 2000 : Les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence

Klöckner Moeller / Moeller Electric :

- Les organes de protection, parties 1 et 2 – ver 10+20-499
- Les contacteurs universels DIL ver 21-480
- VER 956EN : *Standard Compliant and Functionally Safe Engineering Design with Mechanical Auxiliary Contacts* (Application des règles de sécurité avec l'utilisation de contacts auxiliaires mécaniques)

Socomec : Cahier technique « La distribution B.T. »

■ Autres ouvrages

Alain CHAROY, *CEM – Parasites et perturbation des électroniques*, Dunod : Tome 1, *Sources, couplages, effets*, 2^e édition, 2006 – Tome 2, *Terres, masses, câblages*, 2^e édition, 2006 – Tome 3, *Blindages, Filtres, câbles blindés*, 2^e édition, 2007 – Tome 4, *Alimentation, foudre, remèdes*, 2^e édition, 2007

Christian PEUTOT, Éric FÉLICE et Alain KOHLER, *Guide de la mesure électrique : bâtiment et industrie*, Dunod, 2007