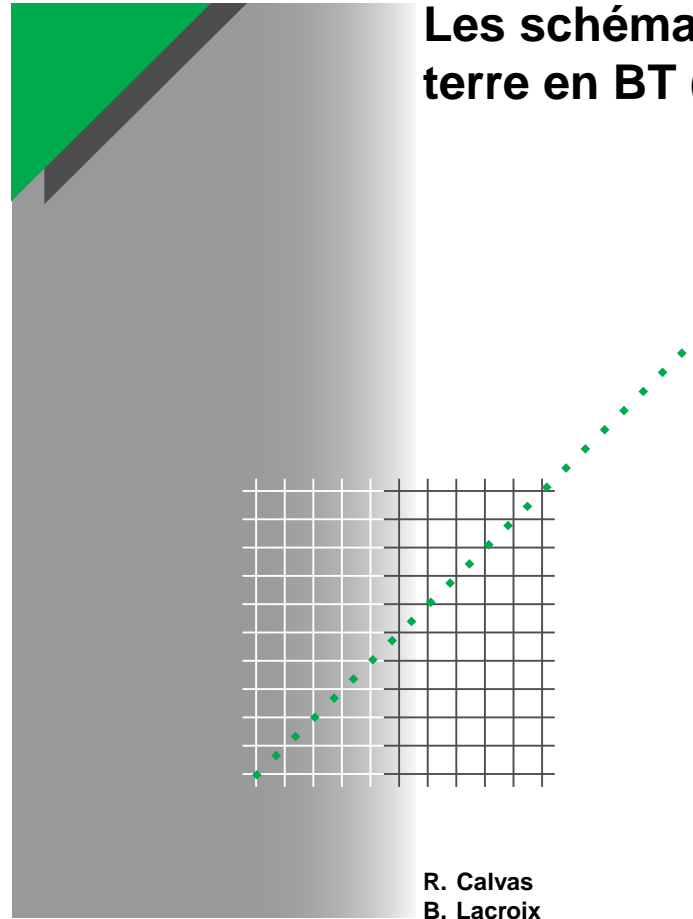


Cahier technique n° 172

Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes du neutre)



R. Calvas
B. Lacroix



Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Presse**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée avec la mention obligatoire :

« Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».



Direction Scientifique et Technique
Communication Technique

Cordialement.

Schneider Electric SA
Centre de Recherches A2
2, rue Volta
F- 38050 Grenoble Cedex 9
Tél. 33 (0)4 76 57 79 68
Fax 33 (0)4 76 57 98 60

Merlin Gerin

Square D

Telemecanique



n° 172

Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes du neutre)



Roland CALVAS

Ingénieur ENSERG 1964 (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Grenoble) et diplômé de l'Institut d'Administration des Entreprises, il est entré chez Merlin Gerin en 1966.

Lors de son parcours professionnel, il a été responsable commercial, responsable marketing de l'activité protection des personnes, puis du service Communication Technique de Schneider Electric.



Bernard LACROIX

Ingénieur ESPCI 74 (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de Paris), il a travaillé 5 ans chez Jeumont Schneider où il a participé, entre autre, au développement du variateur de vitesse à hacheur du TGV. Entré chez Merlin Gerin en 1981, il a été successivement technico-commercial dans l'activité onduleur, puis responsable commercial de l'activité protection des personnes.

Depuis 1991, il est en charge de la prescription dans le domaine de la distribution BT de puissance.



Lexique

CEM : Compatibilité Electro Magnétique

CPI : Contrôleur Permanent d'Isolément

CR : protection Court Retard, (protection contre les surintensités de court-circuit par disjoncteur avec déclencheur rapide)

DDR : Dispositif Différentiel Résiduel

DLD : Dispositif de Localisation de Défaut

DPCC : Dispositif de Protection contre les Courts-Circuits (disjoncteurs ou fusibles)

Electrisation : application d'une tension entre deux parties du corps

Electrocution : électrisation qui provoque la mort

GTB : Gestion Technique des Bâtiments

GTE : Gestion Technique de la distribution d'Energie électrique

I Δ n : seuil de fonctionnement d'un DDR

U_L : tension limite conventionnelle (tension de contact maximale admissible) dite de sécurité

MT/HTA : Moyenne Tension : 1 à 35 kV selon le CENELEC (circulaire du 27.07.92) - Haute Tension de classe A : 1 à 50 kV selon le décret français du 14.11.88



Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes du neutre)

Sommaire

1 Introduction	p. 4
1.1 Evolution des besoins	p. 4
1.2 Causes des défauts d'isolement	p. 4
1.3 Risques liés au défaut d'isolement	p. 5
2 Les SLT et la protection des personnes	p. 8
2.1 Mise au neutre ou schéma TN	p. 9
2.2 Neutre à la terre ou schéma TT	p. 10
2.3 Neutre isolé ou impédant, ou schéma IT	p. 11
3 Les SLT et les risques d'incendie et de non disponibilité de l'énergie	p. 15
3.1 Risque d'incendie	p. 15
3.2 Risque de non disponibilité de l'énergie	p. 15
4 Influences de la MT sur la BT, selon les SLT	p. 17
4.1 La foudre	p. 17
4.2 Les surtensions de manœuvre	p. 18
4.3 Un claquage MT-masse interne au transformateur	p. 18
4.4 Un claquage MT-BT interne au transformateur	p. 19
5 Appareillages liés au choix du SLT	p. 20
5.1 SLT -TN- « Mise au neutre »	p. 20
5.2 SLT -TT- « Neutre à la terre »	p. 21
5.3 SLT -IT- « Neutre isolé de la terre »	p. 21
5.4 Protection du neutre selon SLT	p. 23
6 Choix du SLT et conclusion	p. 25
6.1 Méthodologie pour choisir le SLT	p. 25
6.2 Conclusion	p. 26
Bibliographie	p. 27

Ce Cahier Technique rappelle les risques, liés aux défauts d'isolement, pour la sécurité des personnes et des biens. Il met l'accent sur l'influence du Schéma des Liaisons à la Terre - SLT- sur la disponibilité de l'énergie électrique. Il présente les trois SLT définis par la norme CEI 60364 et employés à des degrés différents dans tous les pays. Chaque SLT, encore appelé « régime du neutre » est examiné en terme de sûreté (sécurité, maintenabilité et disponibilité). Il n'y a pas de mauvais SLT, tous assurent la sécurité des personnes. Ils ont chacun des avantages et des inconvénients et c'est l'expression du besoin qui doit guider le choix, hors prescription ou interdiction normative ou législative. Le lecteur intéressé par les pratiques des différents pays et l'évolution des SLT est invité à lire le Cahier Technique n° 173.



1 Introduction

1.1 Evolution des besoins

Aujourd'hui les 3 SLT, longtemps appelés régimes du neutre tels que définis par les normes CEI 60364 et NF C 15-100, sont :

- la mise au neutre -TN- ;
- le neutre à la terre -TT- ;
- le neutre isolé (ou impédant) -IT-.

Ces trois schémas ont une même finalité en terme de protection des personnes et des biens : la maîtrise des effets des défauts d'isolement. Ils sont considérés comme équivalents sur le plan de la sécurité des personnes contre les contacts indirects.

Il n'en n'est pas nécessairement de même pour la sûreté de l'installation électrique BT en ce qui concerne :

- la disponibilité de l'énergie ;
- la maintenance de l'installation.

Ces grandeurs, chiffrables, font l'objet d'exigences de plus en plus fortes dans les usines et les immeubles tertiaires. Par ailleurs, les systèmes de contrôle-commande des bâtiments -GTB- et de gestion de la distribution d'énergie électrique -GTE- jouent un rôle de plus en plus important au niveau de la gestion et de la sûreté.

Cette évolution du besoin de sûreté n'est donc pas sans effet sur le choix du SLT.

Il faut rappeler que les considérations de continuité de service (garder un réseau sain en distribution publique en déconnectant les abonnés avec un défaut d'isolement) ont joué un rôle lors de l'émergence des SLT.

1.2 Causes des défauts d'isolement

Pour assurer la protection des personnes et la continuité d'exploitation, les conducteurs et les pièces sous tension d'une installation électrique sont « isolées » par rapport aux masses reliées à la terre.

L'isolement est réalisé par :

- l'utilisation de matériaux isolants ;
- l'éloignement qui nécessite des distances d'isolement dans les gaz (par exemple dans l'air) et des lignes de fuite (concernant l'appareillage, par exemple chemin de contournement d'un isolateur).

Un isolement est caractérisé par des tensions spécifiées qui, conformément aux normes, sont appliquées aux produits et aux équipements neufs :

- tension d'isolement (plus grande tension du réseau) ;
- tension de tenue au choc de foudre (onde 1,2 ; 50 μ s) ;
- tension de tenue à la fréquence industrielle (2 U + 1 000 V/1mn).

Exemple pour un tableau BT de type PRISMA :

- tension d'isolement : 1 000 V ;
- tension de choc : 12 kV.

Lors de la mise en service d'une installation neuve, réalisée selon les règles de l'art avec des produits fabriqués selon les normes, le

risque de défaut d'isolement est très faible ; l'installation vieillissant, ce risque augmente.

En effet, celle-ci est l'objet de diverses agressions qui sont à l'origine de défauts d'isolement, citons à titre d'exemple :

- durant l'installation :
 - la détérioration mécanique de l'isolant d'un câble ;
- pendant l'exploitation :
 - les poussières plus ou moins conductrices,
 - le vieillissement thermique des isolants dû à une température excessive ayant pour causes :
 - le climat,
 - un nombre de câbles trop important dans un conduit,
 - une armoire mal ventilée,
 - les harmoniques,
 - les surintensités...
 - les forces électrodynamiques développées lors d'un court-circuit qui peuvent blesser un câble ou diminuer une distance d'isolement,
 - les surtensions de manœuvre, de foudre,
 - les surtensions 50 Hz en retour résultant d'un défaut d'isolement en MT.



C'est généralement une combinaison de ces causes primaires qui conduit au défaut d'isolement. Celui-ci est :

- soit de mode différentiel (entre les conducteurs actifs) et devient un court-circuit ;
- soit de mode commun (entre conducteurs actifs et masse ou terre), un courant de défaut -dit de mode commun, ou

homopolaire (MT)- circule alors dans le conducteur de protection (PE) et/ou dans la terre.

Les SLT en BT sont essentiellement concernés par les défauts de mode commun dont l'occurrence la plus forte se situe au niveau des récepteurs et des câbles.

1.3 Risques liés au défaut d'isolement

Un défaut d'isolement, quelle que soit sa cause, présente des risques pour :

- la vie des personnes ;
- la conservation des biens ;
- la disponibilité de l'énergie électrique, tout ceci relevant de la sûreté.

Risque d'électrisation des personnes

Une personne (ou un animal) soumise à une tension électrique est électrisée. Selon l'importance de l'électrisation cette personne peut subir :

- une gêne ;
- une contraction musculaire ;
- une brûlure ;
- un arrêt cardiaque (c'est l'électrocution) (cf. **fig. 1**).

Protéger l'homme des effets dangereux du courant électrique est prioritaire, le risque d'électrisation est donc le premier à prendre en compte.

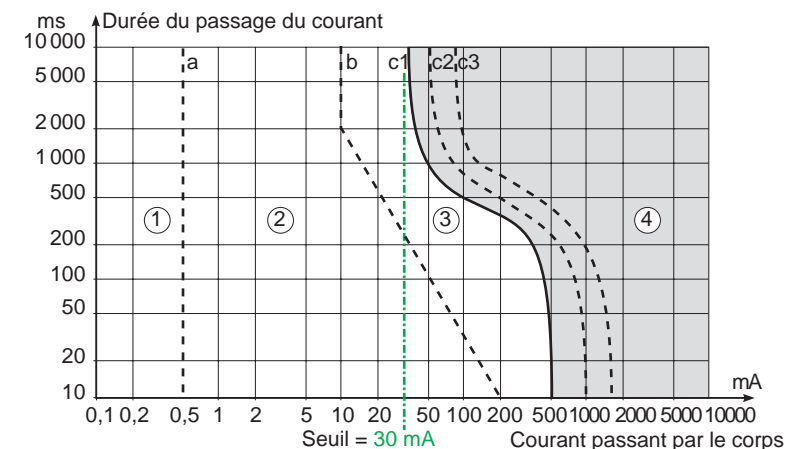
C'est le courant -en valeur et en durée-, traversant le corps humain (en particulier le cœur), qui est dangereux.

En BT la valeur de l'impédance du corps, (dont une composante importante est la résistance de la peau), n'évolue pratiquement qu'en fonction de l'environnement (locaux secs et humides, et locaux mouillés). Pour chacun des cas, une tension de sécurité (tension de contact maximale admissible pendant au moins 5 s) a été fixée à 50 V, anciennement dénommée U_L (norme CEI 60449).

Les normes CEI 60364 § 413.1.1.1 et NF C 15-100 précisent que si la tension de contact (U_c) risque de dépasser cette tension de 50 V, la durée d'application de la tension de défaut doit être limitée par l'intervention des dispositifs de protection (cf. **fig. 2**).

Risque d'incendie

Ce risque, lorsqu'il se matérialise, peut avoir des conséquences dramatiques pour les personnes et les biens.



- Zone 1 : Perception
- Zone 2 : Forte gêne
- Zone 3 : Contractions musculaires
- Zone 4 : Risque de fibrillation ventriculaire (arrêt cardiaque)
- c2 : Probabilité < 5%
- c3 : Probabilité ≥ 50%

Fig. 1 : zones temps/courant des effets du courant alternatif (15 Hz à 100 Hz) sur les personnes selon la norme CEI 60449-1.

■ Locaux ou emplacements secs ou humides : $U_L \leq 50$ V

Uc présumée (V)	< 50	50	75	90	120	150	220	280	350	500
Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	CA 5	5	0,60	0,45	0,34	0,27	0,17	0,12	0,08	0,04
	CC 5	5	5	5	5	1	0,40	0,30	0,20	0,10

■ Locaux ou emplacements mouillés : $U_L \leq 25$ V

Uc présumée (V)	25	50	75	90	110	150	220	280
Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	CA 5	0,48	0,30	0,25	0,18	0,10	0,05	0,02
	CC 5	5	2	0,80	0,50	0,25	0,06	0,02

Fig. 2 : durée maximale de maintien de la tension de contact selon la norme CEI 60364.



Bon nombre d'incendies ont pour origine un échauffement important et ponctuel ou un arc électrique provoqué par un défaut d'isolement.

Le risque est d'autant plus important que le courant de défaut est élevé. Il est également fonction du degré du risque incendie ou explosion, des locaux.

Risque de non disponibilité de l'énergie

La maîtrise de ce risque prend de plus en plus d'importance. En effet si, pour éliminer le défaut, la partie en défaut est déconnectée automatiquement, il en résulte :

- un risque pour les personnes, par exemple :
- manque subit d'éclairage,
- mise hors service d'équipements utiles à la sécurité ;
- un risque économique du fait de la perte de production. Ce risque doit être particulièrement maîtrisé dans les industries à process pour lesquelles le redémarrage peut être long et coûteux.

De plus, si le courant de défaut est élevé :

- les dégâts, dans l'installation ou dans les récepteurs, peuvent être importants et augmenter les coûts et les temps de réparation ;
- la circulation de forts courants de défaut en mode commun (entre réseau et terre) peut également perturber des équipements sensibles, surtout si ceux-ci font partie d'un système « courants faibles » géographiquement réparti avec des liaisons galvaniques.

Enfin, à la mise hors tension, l'apparition de surtensions et/ou de phénomènes de rayonnement électromagnétique peuvent entraîner des dysfonctionnements, voire des dégradations d'équipements sensibles.

Contacts direct et indirect

Avant de commencer l'étude des SLT, il est utile de faire un rappel sur l'électrisation par contacts direct et indirect.

■ Contact direct et mesures de protection

Il s'agit du contact accidentel de personnes avec un conducteur actif (phase ou neutre) ou une pièce conductrice habituellement sous tension (cf. **fig. 3a**).

Dans le cas où le risque est très important, la solution triviale consiste à distribuer l'électricité sous une tension non dangereuse, c'est-à-dire inférieure à la tension de sécurité. C'est l'emploi de la très basse tension de sécurité (TBTS ou TBTP).

En BT (230/400 V), les mesures de protection consistent à mettre ces parties actives hors de portée ou à les isoler par l'utilisation d'isolants, d'enveloppes, de barrières.

Une mesure complémentaire contre les contacts directs consiste à utiliser des Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR) instantanés à Haute Sensibilité ≤ 30 mA appelés DDR-HS.

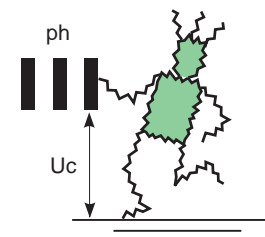
Le traitement de la protection contre les contacts directs est totalement indépendant du SLT, mais cette mesure est nécessaire dans tous les cas d'alimentation de circuits où la mise en œuvre du SLT en aval n'est pas maîtrisée ; en France le décret du 14.11.88 et la norme NF C 15-100 § 532-2-6 rend obligatoire cette mesure au niveau :

- des prises de courant de calibre ≤ 32 A,
- dans certains types d'installations (temporaire, de chantier...).

■ Contact indirect, mesures de protection et de prévention

Le contact d'une personne avec des masses métalliques mises accidentellement sous tension est appelé contact indirect (cf. **fig. 3b**). Cette mise sous tension accidentelle résulte d'un défaut d'isolement.

a) Contact direct



■) Contact indirect

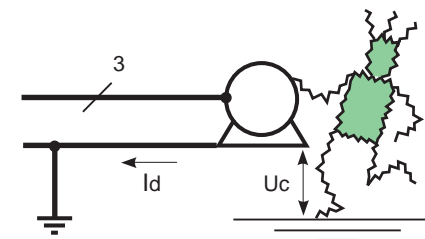


Fig. 3 : contacts directs et indirects.



Un courant de défaut circule et provoque une élévation de potentiel entre la masse du récepteur électrique et la terre : il y a donc apparition d'une tension de défaut qui est dangereuse si elle est supérieure à la tension U_L .

Vis-à-vis de ce risque, les normes d'installation -CEI 60364 au niveau international, NF C 15-100 au niveau français- (ces normes sont similaires dans le fond et la forme), ont officialisé trois Schémas des Liaisons à la Terre -SLT- et définissent les règles d'installation et de protection correspondantes.

Les mesures de protection contre les contacts indirects reposent sur trois principes fondamentaux :

□ **la mise à la terre des masses des récepteurs et équipements électriques** pour éviter qu'un défaut d'isolement présente un risque équivalent d'un contact direct ;

□ **l'équipotentialité des masses simultanément accessibles**
L'interconnexion de ces masses contribue efficacement à la réduction de la tension de contact. Elle se fait par le conducteur de protection (PE) qui relie les masses des matériels électriques pour l'ensemble d'un bâtiment, éventuellement complété de liaisons équipotentialités supplémentaires (cf. **fig. 4**).

Rappel : l'équipotentialité ne peut pas être totale en tous lieux, (notamment dans les locaux à un seul niveau), aussi pour l'étude des SLT et des protections associées, l'hypothèse retenue par les normalisateurs $U_c = U_d$ est appliquée car U_c est au plus égale à U_d .

- U_d = tension, dite de défaut, par rapport à la terre profonde, de la masse d'un appareil électrique ayant un défaut d'isolement,
- U_c = tension de contact dépendant du potentiel U_d et de la référence de potentiel de la personne exposée au risque, généralement le sol.

□ **la gestion du risque électrique** :

- cette gestion est optimisée par **la prévention**. Par exemple, en mesurant l'isolement d'un équipement avant sa mise sous tension, ou par la prédiction de défaut basée sur le suivi sous tension de l'évolution de l'isolement d'une installation isolée de la terre (schéma IT),

- si le défaut d'isolement se produit et génère une tension de défaut dangereuse, il faut l'éliminer par déconnexion automatique de la partie de l'installation où s'est produit le défaut. La façon de supprimer le risque dépend alors du SLT.

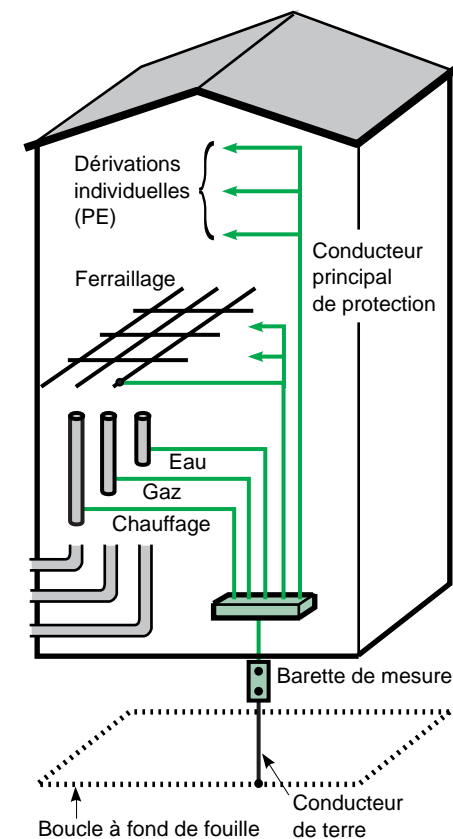


Fig. 4 : équipotentialité dans un immeuble.



2 Les SLT et la protection des personnes

Les risques d'électrisation, voire d'électrocution sont, dans ce chapitre, précisés pour les différents schémas des liaisons à la terre, tels que définis par le Comité Électrotechnique International dans la norme CEI 60364.

Un SLT en BT caractérise le mode de raccordement à la terre du secondaire du transformateur MT/BT et les manières de mettre à la terre les masses de l'installation.

L'identification des types de schémas est ainsi définie au moyen de 2 lettres (cf. **fig. 5**) :

■ la première pour le raccordement du neutre du transformateur (2 cas possibles) :

- T pour « raccordé » à la terre,
- I pour « isolé » de la terre ;

■ la deuxième pour le type de raccordement des masses d'utilisation (2 cas possibles) :

- T pour « raccordées directement » à la terre,
- N pour « raccordées au neutre » à l'origine de l'installation, lequel est raccordé à la terre.

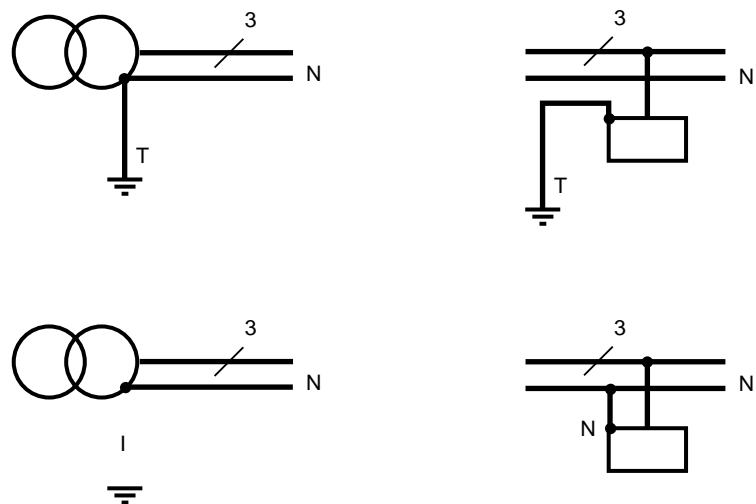


Fig. 5 : mode de raccordement, à la terre du neutre du transformateur, et des masses des récepteurs électriques.

La combinaison de ces deux lettres donne trois configurations possibles :

- TT : neutre du transformateur T et masse T,
- TN : neutre du transformateur T et masse N,
- IT : neutre du transformateur I et masse T.

Nota 1 :

Le schéma TN, selon les normes CEI 60364 et NF C 15-100, comporte plusieurs sous-schémas :

- TN-C : si les conducteurs du neutre N et du PE sont confondus (PEN) ;
- TN-S : si les conducteurs du neutre N et du PE sont distincts ;
- TN-C-S : utilisation d'un TN-S en aval d'un TN-C, (l'inverse est interdit).

A noter que le TN-S est obligatoire pour les réseaux ayant des conducteurs de section $\leq 10 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$.

Nota 2 :

Chaque SLT peut s'appliquer à l'ensemble d'une installation électrique BT ; mais plusieurs SLT peuvent coexister dans une même installation, voir à titre d'exemple la **figure 6**.

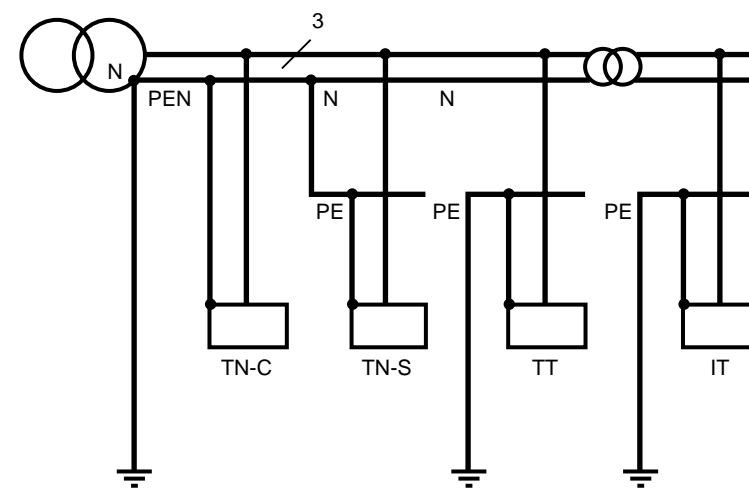


Fig. 6 : exemple de coexistence entre les divers SLT.



Nota 3 :

En France, selon la norme NF C 13-100 concernant les postes de livraison, pour appréhender les risques ayant leur origine en MT, le SLT en BT s'exprime à l'aide d'une lettre supplémentaire suivant l'interconnexion des différentes prises de terre (cf. **fig. 7**).

Examinons maintenant comment réaliser dans chacun des cas la protection des personnes.

Lettre supplémentaire	Terre du poste MT/BT	Terre du neutre BT	Terre des masses d'utilisation BT
R (reliées)	■	■	■
N (du neutre)	■	■	□
S (séparée)	□	□	□

(■ = interconnectée, □ = indépendante)

Fig. 7 : liaison des prises de terre BT avec celle du poste MT/BT.

2.1 Mise au neutre ou schéma TN

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut I_d n'est limité que par l'impédance des câbles de la boucle de défaut (cf. **fig. 8**) :

$$I_d = \frac{U_0}{R_{ph1} + R_d + R_{PE}}$$

Pour un départ et dès que $R_d \approx 0$:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{R_{ph1} + R_{PE}}$$

En effet, lors d'un court-circuit, il est admis que les impédances en amont du départ considéré provoquent une chute de tension de l'ordre de 20 % sur la tension simple U_0 , qui est la tension nominale entre phase et terre, d'où le coefficient de 0,8.

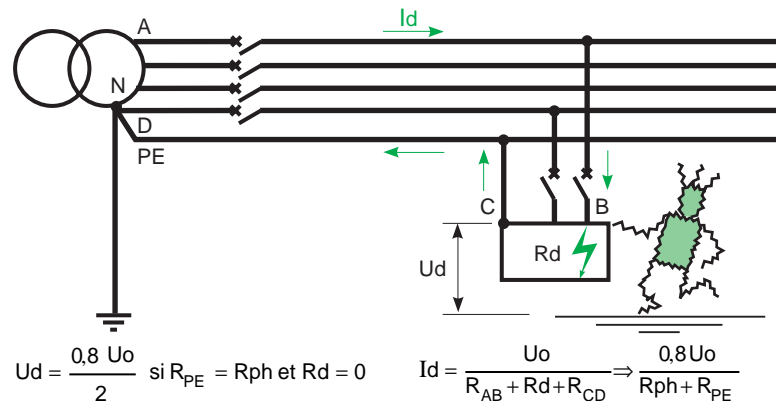


Fig. 8 : courant et tension de défaut en schéma TN.

I_d induit donc une tension de défaut, par rapport à la terre :

$$U_d = R_{PE} \cdot I_d$$

soit :

$$U_d = 0,8 U_0 \frac{R_{PE}}{R_{ph1} + R_{PE}}$$

Pour les réseaux 230/400 V, cette tension de l'ordre de $U_0/2$ (si $R_{PE} = R_{ph}$) est dangereuse car supérieure à la tension limite de sécurité, même en milieu sec ($U_L = 50$ V). Il est alors nécessaire d'assurer une mise hors tension automatique et immédiate de l'installation ou de la partie de l'installation (cf. **fig. 9**).

Le défaut d'isolement étant similaire à un court-circuit phase-neutre, la coupure est réalisée par le Dispositif de Protection contre les Courts-Circuits -DPCC- avec un temps maximal de coupure spécifié fonction de U_L .

Mise en œuvre

Pour être sûr que la protection est bien active il faut, quel que soit le lieu du défaut, que le courant I_d soit supérieur au seuil de fonctionnement de la protection I_a ($I_d > I_a$). Cette condition doit être vérifiée lors de la conception de l'installation par le

U_0 (volts) tension phase/neutre	Temps de coupure (secondes) $U_L = 50$ V	Temps de coupure (secondes) $U_L = 25$ V
127	0,8	0,35
230	0,4	0,2
400	0,2	0,05
> 400	0,1	0,02

Fig. 9 : temps de coupure en schéma TN (selon les normes CEI 60364 et NF C 15-100, tableaux 41 A et 48 A).



calcul des courants de défaut, ceci pour tous les circuits de la distribution.

Un même parcours du conducteur de protection -PE- et des conducteurs actifs facilite ce calcul et est recommandé par la norme (NF C 15-100 § 544-1).

Pour garantir cette condition, une autre approche consiste à imposer une valeur maximale d'impédance aux boucles de défaut en fonction du type et du calibre des DPCC choisis (cf. la norme anglaise BS 7671). Une telle démarche peut conduire à augmenter la section des conducteurs actifs et/ou de protection.

Une autre façon de vérifier que le DPCC assurera la protection des personnes est de calculer la longueur maximale que chaque départ ne devra pas dépasser pour un seuil de protection I_a donné.

Pour calculer I_d et L_{max} , trois méthodes simples peuvent être utilisées (voir Cahier Technique n° 158 ou le guide NF C 15-105) :

- la méthode des impédances ;
- la méthode de composition ;
- la méthode conventionnelle (guide NF C 15-105, partie C).

Cette dernière donne l'équation :

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{Z} = \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}} = \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$$

Pour que la protection assure bien sa fonction, il faut $I_a < I_d$, d'où l'expression de L_{max} , longueur maximale autorisée par la protection ayant pour seuil I_a :

$$L_{max} = \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$$

- L_{max} : longueur maximale en m ;
- U_0 : tension simple 230 V pour un réseau triphasé 400 V ;
- ρ : résistivité à la température de fonctionnement normal ;
- I_a : courant de coupure automatique :
 - pour un disjoncteur $I_a = I_m$ (I_m courant de fonctionnement du déclencheur magnétique ou court-retard),
 - pour un fusible, courant tel que le temps total de coupure du fusible (temps de préarc + temps d'arc) soit conforme à la norme (cf. **fig. 9**),

$$m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$$

Si la ligne est d'une longueur supérieure à L_{max} , il faut soit diminuer I_a , soit augmenter S_{PE} , soit mettre en œuvre un Dispositif Différentiel Résiduel (DDR).

2.2 Neutre à la terre ou schéma TT

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut I_d (cf. **fig. 10**), est essentiellement limité par les résistances de terre (si la prise de terre des masses et la prise de terre du neutre ne sont pas confondues).

Toujours avec l'hypothèse $R_d = 0$, le courant de défaut est :

$$I_d \approx \frac{U_0}{R_a + R_b}$$

Ce courant de défaut induit une tension de défaut dans la résistance de terre des utilisations :

$$U_d = R_a I_d, \text{ ou } U_d = \frac{U_0 R_a}{R_a + R_b}$$

Les résistances de terre étant généralement faibles et de même ordre de grandeur ($\approx 10 \Omega$), cette tension de l'ordre de $U_0/2$ est

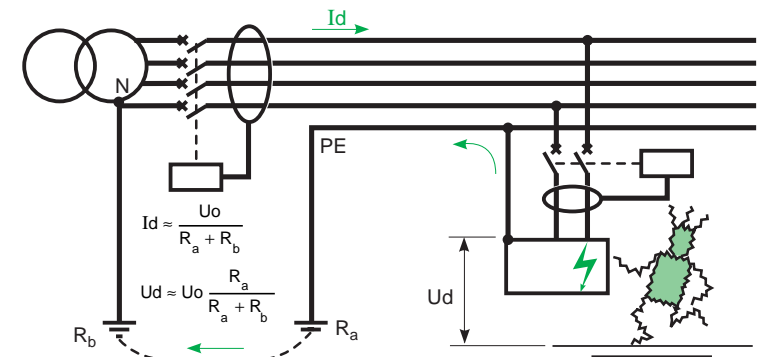


Fig. 10 : courant et tension de défaut en schéma TT.



$I\Delta n \leq \frac{U_L}{R_a}$	Résistance maximale (Ω) de la prise de terre R_a pour $U_L =$	
	50 V	25 V
3 A	16	8
1 A	50	25
500 mA	100	50
300 mA	166	83
30 mA	1660	833

Fig. 11 : limite supérieure de la résistance de la prise de terre des masses à ne pas dépasser en fonction de la sensibilité des DDR et de la tension limite U_L , [$I\Delta n = f(R_a)$].

dangereuse ; il est donc obligatoire de prévoir une déconnexion automatique de la partie de l'installation concernée par le défaut (cf. **fig. 11**).

Mise en œuvre

Le courant de défaut au delà duquel il y a risque $\left(I_{d_0} = \frac{U_L}{R_a} \right)$

étant très largement inférieur aux réglages des dispositifs de protection à maximum de courant, il est nécessaire de mettre en

œuvre, en tête d'installation, au moins un DDR. Pour améliorer la disponibilité de l'énergie électrique, l'emploi de plusieurs DDR permet de réaliser une sélectivité ampèremétrique et chronométrique au déclenchement. Tous ces DDR auront un seuil de courant assigné $I\Delta n$ inférieur à I_{d_0} .

La mise hors tension, par intervention des DDR, doit se faire d'après la norme en moins de 1 s.

A noter que la protection par DDR :

- est indépendante de la longueur des câbles ;
- autorise plusieurs prises de terre R_a séparées (disposition non souhaitable car le PE n'est plus une référence de potentiel unique pour l'ensemble de l'installation).

Le Cahier Technique n° 114 traite en détail de la technologie et de l'emploi des DDR.

2.3 Neutre isolé ou impédant, ou schéma IT

Le neutre est isolé, non relié à la terre. Les prises de terre des masses sont normalement interconnectées (comme pour le SLT TN ou TT).

■ En fonctionnement normal (sans défaut d'isolement) le réseau est mis à la terre par l'impédance de fuite du réseau.

Pour mémoire, l'impédance naturelle de fuite à la terre d'un câble triphasé, de longueur 1 km, est caractérisée par les valeurs typiques :

□ $C = 1 \mu F / km$,

□ $R = 1 M\Omega / km$,

qui donnent (en 50 Hz) :

□ $Z_{cf} = 1 / j C \omega = 3 200 \Omega$,

□ $Z_{rf} = R_f = 1 M\Omega$,

donc $Z_f \approx Z_{cf} = 3 200 \Omega$.

Pour bien fixer le potentiel d'un réseau en IT par rapport à la terre, il est conseillé, surtout s'il est court, de placer une

impédance ($Z_n \approx 1 500 \Omega$) entre le neutre du transformateur et la terre... c'est le schéma IT dit à neutre impédant.

■ Comportement au premier défaut

□ neutre isolé :

Le courant de défaut s'établit comme suit (valeur maximale en cas de défaut franc et neutre non distribué).

$I_f = I_{c_1} + I_{c_2}$, avec :

$I_{c_1} = j C_f \omega V_{13}$ et $I_{c_2} = j C_f \omega V_{23}$,

d'où : $I_d = U_0 3 C_f \omega$.

Pour 1 km de réseau 230/400 V, la tension de défaut sera égale à :

$U_c = R_b I_d$,

soit 0,7 V si $R_b = 10 \Omega$.

Cette tension est non dangereuse, donc l'installation peut être maintenue en service.

Si le neutre est distribué, le décalage du potentiel du neutre par



rapport à la terre ajoute un courant $I_{cn} = U_0 C_f \omega$ et $I_d = U_0 4 C_f \omega$ (cf. **fig. 12**).

□ neutre impédant :

Courant de premier défaut :

$$I_d = \frac{U}{Z_{\text{éq}}} \text{ avec } \frac{1}{Z_{\text{éq}}} = \frac{1}{Z_n} + 3j C_f \omega.$$

La tension de défaut correspondante reste faible et non dangereuse, l'installation peut être maintenue en service. Continuer l'exploitation, sans danger, est fort intéressant, mais il faut :

- savoir qu'il y a un défaut,
- le rechercher rapidement, et l'éliminer, ceci avant qu'un deuxième défaut ne survienne.

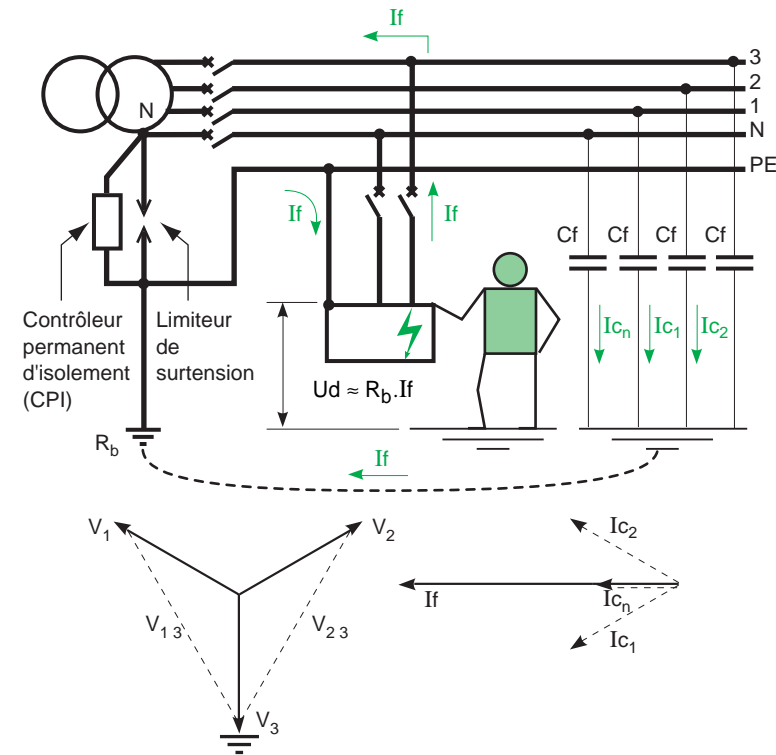


Fig. 12 : courant de premier défaut d'isolement en schéma IT.

Pour répondre à cette attente :

- l'information « défaut présent » est donnée par un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI) qui surveille tous les conducteurs actifs, y compris le neutre (il est obligatoire selon la norme NF C 15-100),
- la recherche est réalisée à l'aide de localisateurs de défaut.

■ Comportement au deuxième défaut

Lorsqu'un deuxième défaut apparaît et que le premier défaut n'a pas été éliminé, trois cas sont à examiner :

- le défaut concerne le même conducteur actif : rien ne se passe et l'exploitation peut continuer,
- le défaut concerne deux conducteurs actifs différents : si toutes les masses sont interconnectées, le défaut double est un court-circuit (via le PE).

Le risque d'électrisation est similaire à celui rencontré avec le SLT TN. Les conditions les plus défavorables pour les DPCC (I_d le plus faible) sont obtenues dans le cas où les deux défauts se produisent sur des départs ayant les mêmes caractéristiques (sections-longueurs) (cf. **fig. 13**).

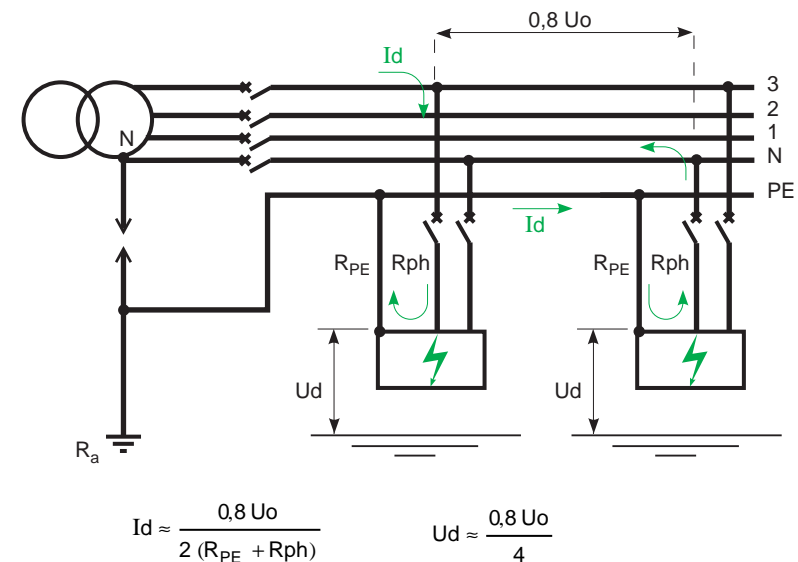


Fig. 13 : courant de 2^{ème} défaut en schéma IT (neutre distribué) et départs concernés de même section et même longueur.



Les DPCC doivent respecter les relations :

- si le neutre est distribué, l'un des deux conducteurs en défaut étant le neutre :

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0}{2 Z},$$

- ou si le neutre n'est pas distribué :

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0 \sqrt{3}}{2 Z}.$$

A noter que dans le cas où l'un des deux défauts est sur le neutre, le courant de défaut et la tension de défaut sont deux fois plus faibles qu'en schéma TN. Ceci a incité le normalisateur à autoriser des temps de fonctionnement des DPCC plus longs (cf. **fig. 14**).

Comme en SLT TN, la protection par DPCC n'est valable que pour des longueurs maxi de câbles :

- neutre distribué :

$$L_{\max} = \frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a},$$

- neutre non distribué :

$$L_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}.$$

Ceci à condition que le neutre soit protégé et que sa section soit égale à la section des phases... C'est essentiellement pour cette raison que la norme NF C 15-100 déconseille de distribuer le neutre.

□ le défaut concerne deux conducteurs actifs différents mais toutes les masses ne sont pas interconnectées.

Pour des masses mises à la terre individuellement ou par groupe, chaque circuit ou chaque groupe de circuits doit être protégé par un DDR.

En effet, en cas de défaut d'isolement au niveau des groupes raccordés à deux prises de terre différentes, le comportement du schéma des liaisons à la terre par rapport au défaut d'isolement (Id, Ud) est analogue à celui d'un schéma en TT (le courant de défaut passe par la terre).

La protection des personnes contre les contacts indirects est alors assurée de la même manière

$$I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_a} \text{ selon le tableau de la figure 11 .}$$

A noter que les temps prescrits par la norme permettent une sélectivité chronométrique horizontale pour privilégier la continuité de service sur certains départs.

Nota : pour protéger un réseau BT isolé de la terre (IT) contre les élévations de tension (amorçage dans le transformateur MT/BT, contact accidentel avec un réseau de tension plus élevée, foudre sur le réseau MT), en France la norme NF C 15-100 impose qu'un limiteur de surtension soit installé entre le point neutre du transformateur MT/BT et la terre (R_b).

Le lecteur désirant approfondir l'étude du SLT IT peut lire le Cahier Technique n° 178.

Afin d'avoir une vision synthétique des grandeurs qui caractérisent les différents SLT, vis-à-vis de la protection des

U ₀ /U (volts)	Temps de coupure (secondes)			
	U _L = 50 V		U _L = 25 V	
U ₀ : tension phase/neutre U : tension entre phases	Neutre non distribué	Neutre distribué	Neutre non distribué	Neutre distribué
127/220	0,8	5	0,4	1,00
230/400	0,4	0,8	0,2	0,5
400/690	0,2	0,4	0,06	0,2
580/1 000	0,1	0,2	0,02	0,08

Fig. 14 : temps de coupure maximaux spécifiés en schéma IT (selon les normes CEI 60364 et NF C 15-100, tableaux 41 B et 48 A).



personnes, les principales formules sont rassemblées dans le tableau de la **figure 15**.

	Id	Ud	Lmax	Continuité de service	
TN	$\frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	Sélectivité verticale	
TT	$\frac{U_0}{R_a + R_b}$	$\frac{U_0 R_a}{R_a + R_b}$	pas de contrainte	Sélectivité verticale	
IT	1 ^{er} défaut	$< 1 A$	$\ll U_L$	Non déclenchement	
	Défaut double avec neutre distribué	$\leq \frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\leq \frac{m}{2} \frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	Sélectivité verticale et possibilité de sélectivité horizontale au profit des départs de forte intensité
	Défaut double avec neutre non distribué	$\leq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\leq \frac{m\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	

Rappelons que :

■ $\rho = 22 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ pour Cu (36 pour Al) à 75 °C ;

■ $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$;

■ la section du PE, généralement égale à la section des phases, peut être égale à la moitié de la section des phases lorsque celle-ci dépasse 35 mm²... ce qui augmente Ud en TN et IT.

Fig. 15 : grandeurs caractéristiques des SLT.



3 Les SLT et les risques d'incendie et de non disponibilité de l'énergie

3.1 Risque d'incendie

Il a été démontré, puis accepté par les normalisateurs, qu'un contact ponctuel entre un conducteur et une pièce métallique peut provoquer, dans les locaux particulièrement sensibles, un incendie lorsque le courant de défaut dépasse 300 mA.

A titre d'exemple :

- locaux à risque important : usines pétrochimiques, fermes ;
- locaux à risque moyen, mais où les conséquences peuvent être très graves : immeubles de grande hauteur recevant du public...

En neutre isolé, le risque « incendie » :

- est très faible au premier défaut,
- est aussi important qu'en TN au deuxième défaut.

Pour les SLT TT et surtout TN, le courant de défaut est dangereux vu la puissance développée ($P = Rd I^2$) :

- en TT = 5 A < Id < 50 A ;
- en TN = 1 kA < Id < 100 kA.

La puissance mise en jeu au point de défaut est, surtout en schéma TN, considérable et il convient d'agir dès les plus bas niveaux de courant et le plus vite possible pour limiter l'énergie dissipée ($\int Rd i^2 dt$).

Cette protection, prescrite par la norme CEI et exigée par les normes françaises (NF C 15-100 § 482-2-10), est réalisée par un DDR instantané à seuil ≤ 300 mA et ce, quel que soit le SLT. Lorsque des risques d'incendie sont particulièrement importants (fabrication/stockage de matière inflammable, ...), il est nécessaire, voire obligatoire, d'utiliser un SLT à masses à la terre minimisant naturellement ce risque (TT ou IT).

A noter que le TN-C est interdit en France par la norme NF C 15-100 lorsqu'il y a un risque d'incendie (conditions BE2) et/ou d'explosion (conditions BE3) : les conducteurs PE et de neutre étant confondus, il n'est pas possible de mettre en œuvre des DDR.

3.2 Risque de non disponibilité de l'énergie

Ce risque est important pour l'exploitant, car il conduit à des coûts de non production et de réparation qui peuvent être importants.

Il est différent selon le SLT choisi.

Rappelons que la disponibilité (D) est une grandeur statistique (cf. **fig. 16**) égale au rapport entre deux durées :

- temps pendant lequel le secteur est présent ;
- durée de référence égale au temps « secteur présent + secteur absent ».

Le temps de bon fonctionnement (MUT) dépend de l'état général de l'isolement du réseau. Or l'isolement se dégrade dans le temps

D = Disponibilité $D = \frac{MUT}{MDT + MUT}$

MUT = Mean Up Time
= durée moyenne de bon fonctionnement après réparation

MDT = Mean Down Time
= durée moyenne de la panne
(détection + intervention + réparation + remise en service)

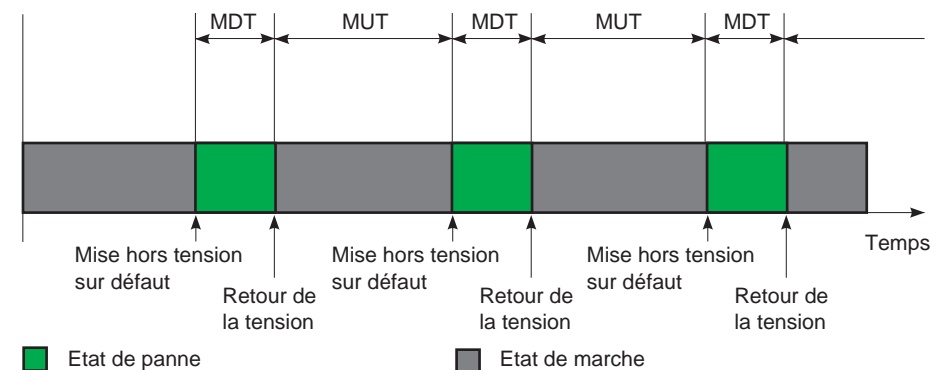


Fig. 16 : disponibilité de l'énergie électrique.



avec les agressions thermiques et les efforts électrodynamiques dus en particulier aux courants de défaut.

Le temps de panne (MDT) dépend lui aussi du courant de défaut et notamment de son intensité qui, selon sa valeur, peut provoquer :

- des dégâts plus ou moins importants dans les récepteurs, les câbles... ;
- des incendies ;
- des dysfonctionnements sur les équipements courant faible du contrôle-commande.

Vis-à-vis de la disponibilité de l'énergie électrique, il convient donc d'étudier chaque SLT. Le SLT IT mérite un approfondissement particulier puisqu'il est le seul à autoriser le non déclenchement en présence d'un défaut.

■ Le SLT IT

Pour conserver tout l'avantage du SLT IT qui est de ne pas interrompre la distribution électrique dès le premier défaut, il faut éviter le deuxième défaut qui présente alors les mêmes risques importants que le SLT TN. Pour ce faire, il faut supprimer ce premier défaut avant qu'un deuxième ne survienne.

L'emploi de moyens de détection et de localisation efficaces par un personnel de maintenance réactif réduit très fortement la probabilité du « défaut double ».

De plus il existe actuellement des dispositifs de contrôle qui permettent de suivre dans le temps l'évolution de l'isolement des différents départs, de faire de la prédiction de défaut et donc d'anticiper la maintenance du premier défaut. D'où une disponibilité maximale possible avec le SLT IT.

■ Les SLT TN et TT

Ils font appel à la sélectivité au déclenchement. En TN, celle-ci est acquise avec les protections de court-circuit si le plan de protection de l'installation est bien étudié (sélectivité ampèremétrique et chronométrique).

En TT, elle est facile à mettre en œuvre grâce aux DDR qui permettent de réaliser une sélectivité ampèremétrique et chronométrique.

Rappelons qu'avec le TN, le temps de réparation, vu le $\int i^2 dt$, risque d'être plus important qu'en TT, ce qui joue aussi sur la disponibilité.

■ Pour tous les SLT

Il est toujours intéressant de prévenir les défauts d'isolement, en particulier les défauts d'isolement de certains moteurs avant leur démarrage. Il faut savoir que 20 % des pannes moteur sont dues à un défaut d'isolement, lequel se manifeste à la mise sous tension.

En effet, une perte d'isolement, même faible, sur un moteur chaud qui se refroidit dans une ambiance humide (condensation) dégénère en défaut franc lors du redémarrage, entraînant d'une part des dégâts importants au niveau des bobinages, d'autre part une perte d'exploitation voire des risques majeurs s'il s'agit d'un moteur à vocation sécuritaire (moteur de pompe d'exhaure, d'incendie, de ventilateur,...).

La prévention de ce type d'incident peut être faite, quel que soit le SLT, par un Contrôleur Permanent d'Isolement surveillant le récepteur hors tension. En présence d'un défaut, le démarrage est alors empêché.

En conclusion de ce paragraphe il est clair que, pour une bonne disponibilité de l'énergie, les SLT se classent dans l'ordre de préférence : IT, TT, TN.

Nota :

Si pour des impératifs de continuité de service l'installation comporte un groupe électrogène ou une ASI -Alimentation Sans Interruption- (onduleur), lors du passage sur la source de remplacement, il y a un risque de non fonctionnement ou de fonctionnement tardif des DPCC (Icc plus faible - cf. **fig. 17**).

En TN et IT, pour la sécurité des personnes et des biens, il est donc indispensable de vérifier que les conditions de protection sont toujours respectées (seuil et temps de fonctionnement), surtout pour les départs de grande longueur.

Si ce n'est pas le cas, il convient de mettre en œuvre des DDR.

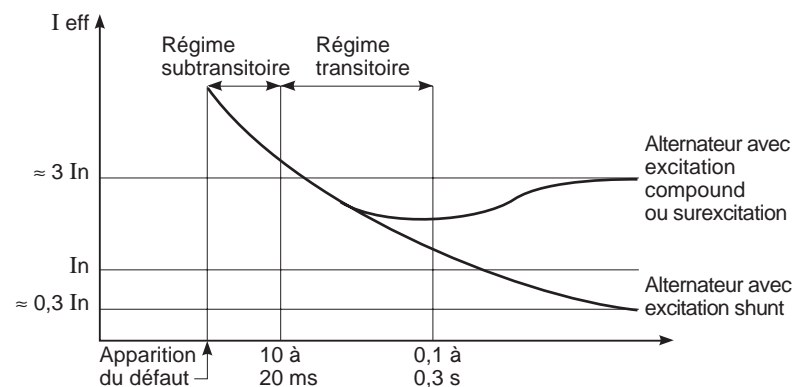


Fig. 17 : établissement d'un courant de court-circuit dans un réseau alimenté par un groupe de secours « diesel/alternateur ».



4 Influences de la MT sur la BT, selon les SLT

Les réseaux BT, sauf utilisation d'une alimentation de remplacement sans coupure (avec isolement galvanique) ou d'un transformateur BT/BT, sont sous influence de la MT.

Cette influence se fait :

- par couplage capacitif : transmission de surtensions des enroulements MT aux enroulements BT ;
- par couplage galvanique en cas de claquage entre les enroulements MT et BT ;
- par impédance commune si les diverses prises de terre sont reliées et qu'un courant d'origine MT s'écoule à la terre.

Elle se traduit par des perturbations en BT, souvent des surtensions, dont les phénomènes générateurs sont des incidents en MT :

- la foudre ;
- les surtensions de manœuvre ;
- un claquage MT-masse interne au transformateur ;
- un claquage MT-BT interne au transformateur.

Leur conséquence la plus fréquente est la destruction des isolants BT avec pour corollaire les risques d'électrisation des personnes et de destruction de matériel.

4.1 La foudre

Si le réseau MT est aérien, pour limiter les conséquences d'un coup de foudre direct ou indirect, le distributeur installe des parafoudres ZnO.

Placés sur le dernier pylône avant le poste MT/BT, ces parafoudres limitent la surtension et écoulent le courant de foudre à la terre (cf. Cahiers Techniques n° 151 et 168).

Une onde de foudre est cependant transmise, par effet capacitif entre les bobinages du transformateur, aux conducteurs actifs BT. Elle peut atteindre 10 kV crête. Bien qu'elle soit progressivement atténuée par les capacités parasites du

réseau par rapport à la terre, il est sage de placer des limiteurs de surtension (parafoudres) ZnO à l'origine du réseau BT, quel que soit son SLT (cf. **fig. 18**).

De même, pour éviter un couplage par impédance commune, il est prudent de ne jamais relier à la prise de terre du neutre BT :

- les parafoudres MT ;
- les paratonnerres placés sur le toit des immeubles.

En effet, le courant de foudre provoquerait une montée en potentiel du PE et/ou du neutre BT (risque de claquage en retour) et la perte d'efficacité de la prise de terre par vitrification.

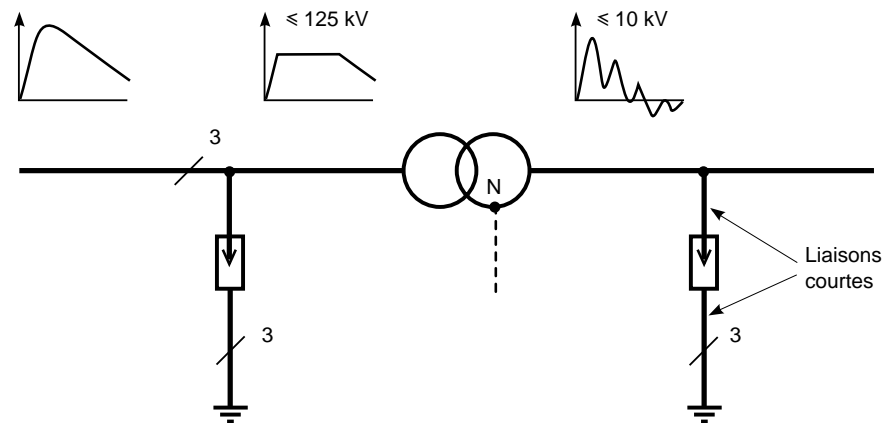


Fig. 18 : limitation et transmission des surtensions de foudre (que le neutre soit à la terre ou non, il y a des surtensions de mode commun sur les phases).



4.2 Les surtensions de manœuvre

Certains appareillages MT (par exemple les disjoncteurs à vide) provoquent lors de leur manœuvre des surtensions importantes (cf. Cahier Technique n°143).

Contrairement à la foudre qui est une perturbation de mode commun (entre réseau et terre), ces surtensions sont, en BT, des perturbations de mode différentiel (entre conducteurs actifs).

Elles sont transmises au réseau BT par couplage capacitif et magnétique.

Comme tout phénomène de mode différentiel, les surtensions de manœuvre n'interfèrent pas, ou très peu, avec les SLT, quels qu'ils soient.

4.3 Un claquage MT-masse interne au transformateur

Lors d'un claquage MT-masse interne au transformateur, et quand la masse du transformateur et le neutre de l'installation BT sont reliés à une même prise de terre, un courant

« homopolaire » MT (dont l'intensité est fonction du SLT-MT) peut porter la masse du transformateur et du neutre de l'installation BT à un potentiel dangereux.

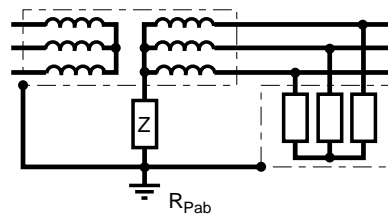
En effet, la valeur de la prise de terre du transformateur conditionne directement la tension de toucher (= tension de contact) dans le poste $U_t \leq R_p I_{h_{MT}}$ et la tension de tenue

diélectrique des matériels BT du poste $U_{tp} = R_p I_{h_{MT}}$ (si la terre du neutre BT est séparée de celle du poste).

La prise de terre du poste et celle du neutre BT ne sont généralement pas reliées. Si elles le sont, une limite est donnée à la valeur de la prise de terre commune pour éviter la montée en potentiel du réseau BT par rapport à la terre profonde.

La **figure 19** donne les valeurs de la prise de terre commune pour les valeurs de $I_{h_{MT}}$ des réseaux publics français, le

TNR ou ITR (1)

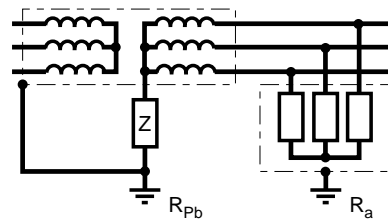


$I_{h_{MT}}$ (A)	R_{Pab} (Ω)
300	3 à 20
1 000	1 à 10

Z : liaison directe ($Z = 0$) dans les schémas TN et TT ou liaison par impédance ou isolée dans les schémas IT

$I_{h_{MT}}$: intensité maximale du courant de premier défaut monophasé à la terre du réseau à haute tension alimentant le poste

TTN ou ITN (1)



$I_{h_{MT}}$ (A)	R_{Pb} (Ω)
300	3
1 000	1

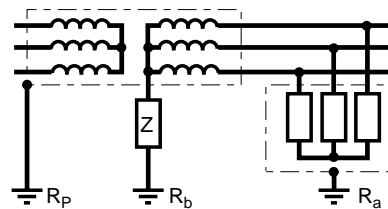
U_{tp} : tension de tenue à la fréquence industrielle des matériels à basse tension du poste

(1) la troisième lettre des schémas des liaisons à la terre signifie selon la norme NF C-13100 que :

- toutes les masses sont Reliées : R ;
- la masse du poste est reliée à celle du Neutre : N ;
- les prises de terre sont Séparées : S.

Nota : Il n'y a pas de valeur prescrite mais ces valeurs permettent d'éviter une montée excessive en potentiel de l'ensemble.

TTS ou ITS (1)



U_{tp} (kV)	2	4	10
$I_{h_{MT}}$ (A)	R_p (Ω)		
300	4	8	20
1 000	1	3	10

Fig. 19 : résistance maximale de la prise de terre des masses du poste en fonction du schéma des liaisons à la terre du réseau.



lecteur intéressé peut consulter la norme CEI 60384-4-442 qui explicite les risques en fonction des SLT BT. Toujours pour les réseaux publics (hormis l'Australie et les USA où le courant de défaut peut être très élevé) les valeurs rencontrées vont de 10 A en Irlande (une impédance compense le courant capacitif) à 1 000 A en France (réseaux souterrains) et en Grande Bretagne.

4.4 Un claquage MT-BT interne au transformateur

Pour éviter que le niveau du potentiel par rapport à la terre du réseau BT s'élève à celui de la tension simple du réseau MT lors d'un claquage MT-BT interne au transformateur, il faut relier le réseau BT à la terre.

Un tel défaut a pour conséquences :

- en TN

Tout le réseau BT, y compris le PE, est soumis à la tension $I_{h_{MT}} R_{Pab}$ ou $I_{h_{MT}} R_{ab}$.

Si cette surtension dépasse la tenue diélectrique du réseau BT, (en pratique de l'ordre de 1 500 V) des claquages en BT sont possibles si l'équipotentialité de toutes les masses, électriques ou non, du bâtiment n'est pas totale ;

- en TT

Alors que les masses des récepteurs sont au potentiel de la terre profonde, tout le réseau BT est soumis à $I_{h_{MT}} R_{Pb}$ ou $I_{h_{MT}} R_b$: il y a un risque de claquage « en retour » des récepteurs si la tension développée dans R_{Pb} ou R_b dépasse leur tenue diélectrique ;

- en IT

Le fonctionnement d'un éclateur/court-circuiteur (appelé limiteur de surtension en France), qui se met en court-circuit dès que sa tension d'amorçage est atteinte ramène alors le problème à celui du réseau TN (ou TT si plusieurs prises de terre des utilisations).

Dans tous les cas, les claquages MT/BT occasionnent des contraintes qui peuvent être sévères, pour l'installation et les récepteurs BT, si la valeur de la prise de terre du neutre BT n'est pas maîtrisée. Le lecteur intéressé peut consulter la norme CEI 60364 qui explicite les risques en fonction des SLT.

L'exemple de la distribution publique, en aérien, en France donne une réponse à une situation où les risques de foudre, de surtension de manœuvre, de claquages MT-masse du transformateur et MT-BT sont présents (cf. **fig. 20**).

Les réseaux MT industriels sont généralement exploités en IT impédant, ils ont un courant homopolaire $I_{h_{MT}}$ de quelques dizaines d'ampères (cf. Cahier Technique n° 62). La valeur maximale autorisée de la prise de terre dépend des conditions d'équipotentialité des masses du réseau BT, donc de son SLT.

Il montre que l'équipotentialité de toute la distribution (toutes les masses MT, les neutres et les masses d'utilisation reliés) n'est pas indispensable : chaque risque est traité séparément. Dans ce chapitre l'influence du réseau MT a été décrite, il en résulte :

- l'intérêt de l'emploi de parafoudres à l'origine de l'installation BT, quel que soit le type de SLT, ceci si l'alimentation MT, et a fortiori BT, est aérienne ;

- que le fait de relier la prise de terre du poste avec la prise de terre du neutre BT, voire avec celles des masses des utilisations, impose des contraintes variables sur le réseau BT en fonction du SLT MT (valeur du I_h).

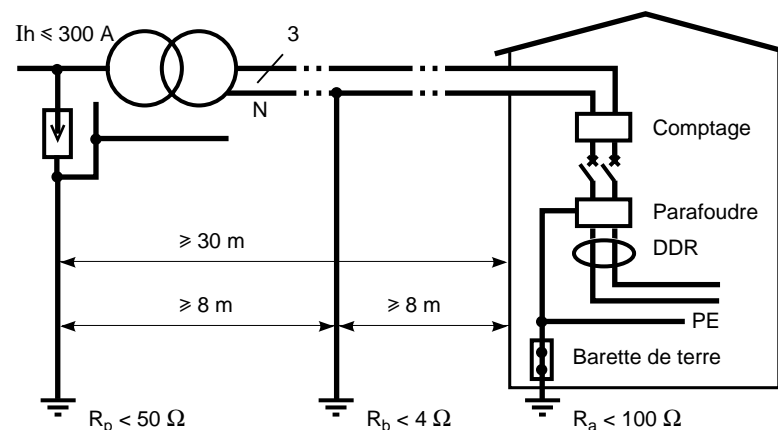


Fig. 20 : distribution publique aérienne rurale en France.



5 Appareillages liés au choix du SLT

Le choix d'un SLT a des conséquences en terme de **sûreté** (au sens large), mais aussi en terme d'installation, particulièrement en ce qui concerne l'appareillage à mettre en œuvre.

5.1 SLT -TN- « Mise au neutre »

Dans ce schéma, ce sont les DPCC (disjoncteur ou fusibles) qui assurent en général la protection contre les défauts d'isolement, avec un déclenchement automatique suivant un temps de coupure maximal spécifié (fonction de la tension simple U_0 : cf. **fig. 9**).

■ Avec disjoncteur

Le déclenchement du disjoncteur se fait dans un seuil déterminé par le type de déclencheur (cf. **fig. 21**). Dès que le courant de défaut dépasse le seuil du déclencheur de protection contre les courts-circuits (en général « instantané »), il y a ouverture dans un temps nettement inférieur au temps de coupure maximal spécifié, par exemple 5 s pour les circuits de distribution (norme NF C 15-100 § 413.1.3.3) et 0,4 s pour les circuits terminaux. Quand l'impédance de la source et des câbles a une valeur élevée, il faut utiliser des déclencheurs à seuil bas, sinon associer des DDR aux DPCC. Ces DDR peuvent être des relais différentiels séparés ou associés aux disjoncteurs (disjoncteurs différentiels) de basse sensibilité. Leur seuil doit être :

$$I_{\Delta n} < \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}}$$

L'emploi de DDR présente l'avantage de rendre inutile la vérification de l'impédance de boucle, avantage particulièrement intéressant lorsque l'installation est modifiée ou fait l'objet d'extensions.

Cette dernière solution n'est évidemment pas applicable avec un SLT de type TN-C (le conducteur de protection étant confondu avec le conducteur de neutre).

■ Avec fusibles

Les fusibles employés pour la protection contre les courts-circuits sont de type gG, et leurs caractéristiques temps/courant (cf. **fig. 22**) sont définies par des normes (fusibles domestiques : CEI 60241, fusibles industriels : CEI 60269). Vérifier l'adéquation avec le temps de coupure maximal spécifié impose donc une validation individuelle des calibres prévus pour chaque protection. S'il n'y a pas adéquation il faut, soit diminuer l'impédance de la boucle de défaut (augmentation des sections), soit remplacer le fusible par un disjoncteur à seuil bas ou par un disjoncteur différentiel.

	Type de déclencheur	Seuil de fonctionnement
Domestique (EN 60898)	B	$3 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	C	$5 I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	D	$10 I_n \leq I_a \leq 20 I_n$
Industriel (CEI 60947-2)	G (seuil bas)	$2 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	D	$5 I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	MA (pour démarreur-moteur)	$6,3 I_n \leq I_a \leq 12,5 I_n$

Fig. 21 : courant de déclenchement (magnétique ou court retard) des disjoncteurs BT.

I_n gG (A)	$I_{min. 10 s}$	$I_{max. 5 s}$	$I_{min. 0,1 s}$	$I_{max. 0,1 s}$
63	160	320	450	820
80	215	425	610	110
100	290	580	820	1450

Fig. 22 : exemple des limites des seuils de fonctionnement des fusibles (selon la norme CEI 60269 § 5-6-3).



5.2 SLT -TT- « Neutre à la terre »

Avec ce schéma, la faible valeur des courants de défaut (cf. chapitre précédent) ne permet pas aux DPCC d'assurer la protection des personnes contre les contacts indirects. Il faut employer des DDR associés à des disjoncteurs (cf. **fig. 23** et **24**) ou à des interrupteurs (cf. CEI 60364 - § 413.1.4.2 et NF C 15-100).

Ces dispositifs doivent satisfaire à des normes, en particulier :

- CEI 60755 : règles générales ;
- CEI 61008 : interrupteurs différentiels « domestiques » ;
- CEI 61009 : DPCC différentiel « domestique » ;
- CEI 60947-2 : disjoncteurs différentiels « industriels ».

Leur mise en œuvre doit satisfaire aux objectifs :

- de protection des personnes soit :
 - seuil $I\Delta n \leq U_L/R_a$,
 - temps de coupure $\leq 1s$;
- de continuité de service avec seuils et temporisations permettant la sélectivité ampèremétrique et chronométrique ;
- de protection incendie avec $I\Delta n \leq 300\text{ mA}$.

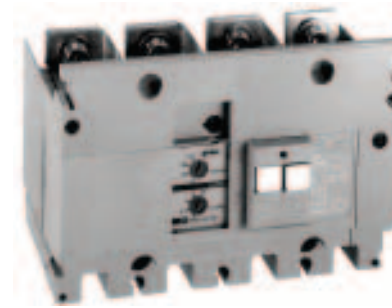


Fig. 23 : bloc Vigi adaptable aux disjoncteurs Compact NS (Merlin Gerin).

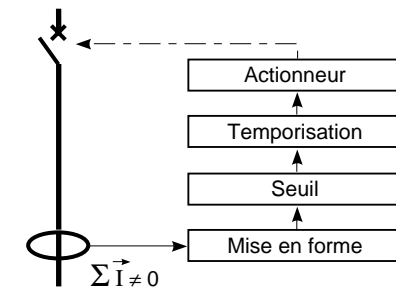


Fig. 24 : schéma fonctionnel d'un DDR.

5.3 SLT -IT- « Neutre isolé de la terre »

Rappelons qu'en cas de défaut double, la sécurité des personnes est assurée par les DPCC. Lors du premier défaut d'isolement, le calcul nous a montré qu'il n'y avait pas de danger (tension de contact bien inférieure à la tension limite de sécurité). La mise hors tension automatique n'est donc pas obligatoire : c'est l'avantage essentiel de ce schéma.

Pour conserver cet avantage, les normes préconisent (CEI 60364 - § 413.1.5.4) ou imposent (NF C 15 -100) la mise en œuvre d'un Contrôleur Permanent d'Isolément -CPI- et la recherche du premier défaut. En effet, si un deuxième défaut survient, la coupure automatique est indispensable puisqu'il y a le risque

d'électrisation, c'est alors le rôle des DPCC éventuellement complétés de DDR.

La recherche du premier défaut pour réparation (maintenance curative) est grandement facilitée par l'emploi d'un Dispositif de Localisation de Défaut -DLD-.

Une maintenance prédictive, basée sur le suivi (enregistrement) des variations des impédances d'isolement de chaque circuit, est également possible.

Les réseaux BT, exploités selon le schéma IT, qui prennent leur origine au niveau d'un transformateur MT/BT doivent être protégés contre les risques de défaut d'isolement entre la MT et la BT par un « limiteur de surtension ».



Enfin, pour fixer le potentiel du réseau BT, par rapport à la terre, (réseau court alimenté par un transformateur MT/BT), une impédance peut être installée entre le neutre du transformateur et la terre. Sa valeur en 50 Hz, de l'ordre de 1 500 Ω est très élevée en courant continu et en très basse fréquence pour ne pas gêner la mesure de l'isolement et la recherche des défauts.

■ Principe de fonctionnement des CPI

Un défaut sur un circuit, se traduit au niveau du réseau par une baisse d'isolement, plus exactement de résistance du réseau par rapport à la terre.

En France, les CPI et les DLD doivent répondre à la norme de fabrication UTE 63080.

Les CPI ont donc comme fonction de surveiller la valeur de cette résistance.

En général, ils fonctionnent sur le principe d'une injection, entre le réseau et la terre, d'un courant, alternatif ou continu, dont ils mesurent la valeur (cf. **fig. 25**).

L'injection d'un courant continu permet de connaître en permanence la résistance d'isolement du réseau. Si celle-ci passe en dessous d'un seuil préétabli, le CPI signale le défaut. L'injection de courant alternatif basse fréquence ($F \approx$ quelques hertz) permet le contrôle de la résistance de défaut, mais avec une distorsion due à la présence des capacités de fuite du réseau. Cet inconvénient mineur, vu la fréquence d'injection, est compensé par un avantage au niveau de la recherche du premier défaut (un seul dispositif d'injection).

Il existe maintenant des appareils, à injection de courant BF, capables d'indiquer séparément la résistance et la réactance d'isolement du réseau. Leur technique autorise en plus la recherche du premier défaut sans ouverture des circuits et sans la gêne due aux départs fortement capacitifs.

■ Principe de fonctionnement des DLD

La solution la plus fréquemment employée consiste à injecter un courant identifiable (de fréquence différente de celle du réseau). Le générateur peut être le CPI. Puis au moyen de capteurs magnétiques (transformateurs toriques et/ou pince ampèremétrique) associés à un amplificateur accordé à la fréquence du courant injecté, il est possible de suivre son parcours jusqu'au point de défaut (cf. **fig. 26**).

Enfin une autre solution est aussi exploitée. Elle consiste à comparer, en permanence et pour chaque départ, la valeur de sa résistance à une valeur de seuil prédéfinie ou programmable.

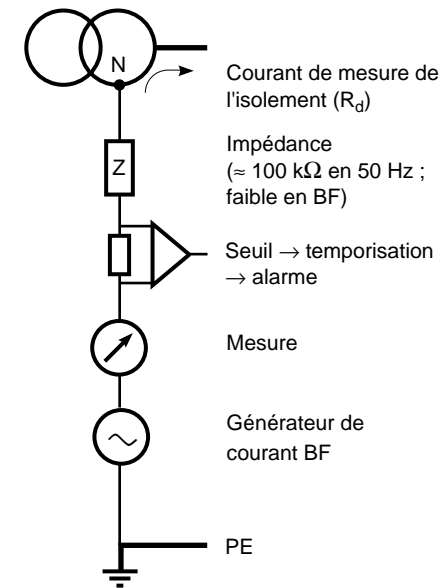


Fig. 25 : schéma fonctionnel d'un contrôleur permanent d'isolement (CPI).

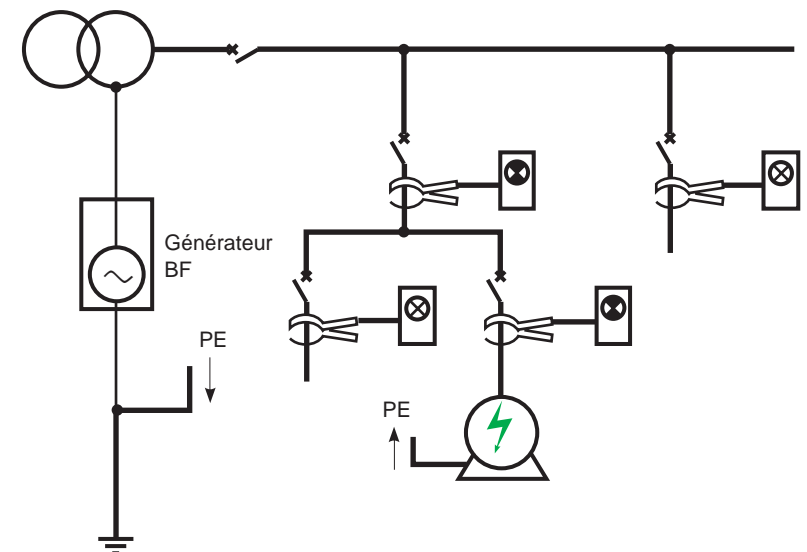


Fig. 26 : localisation du défaut d'isolement par suivi du trajet d'un courant basse fréquence injecté à l'origine de l'installation.



Cette dernière solution exploitée par des moyens informatiques permet tout à la fois, en local et à distance, de :

- signaler le premier défaut (CPI),
- puis de le repérer (DLD) pour réparation (maintenance curative) (cf. **fig. 27**),
- et de connaître l'évolution de l'isolement dans le temps, départ par départ, pour intervenir sur les départs dont l'isolement baisse anormalement (maintenance prédictive).

■ **Limiteurs de surtension (norme NF C 63-150)**

Ils sont raccordés entre un conducteur actif (neutre ou phase) de l'installation et la terre. Leur tension d'amorçage U_e doit donc être adaptée au montage prévu, ainsi pour un réseau 230/400 V - 50 Hz il existe deux modèles :

- 250 V, pour le raccordement au neutre ($400 \text{ V} < U_e \leq 750 \text{ V}$),
- 400 V, pour le raccordement à une phase ($700 \text{ V} < U_e \leq 1\,100 \text{ V}$).

Leur but est double :

- limiter la tension sur le réseau BT lors d'un claquage MT/BT dans le transformateur de distribution. Dans ce cas, le limiteur doit écouler à la terre le courant « résiduel » du réseau MT,
- limiter les surtensions de foudre.

D'où leurs caractéristiques, par exemple pour le modèle 250 V :

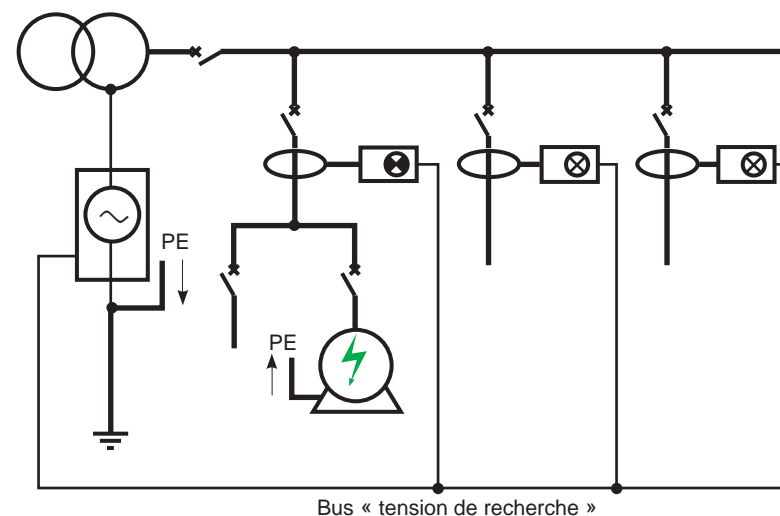
- U_n : 250 V,
- U claquage à 50 Hz : mini 400 V, maxi 750 V,
- U claquage selon l'onde 1,2/50 μs : $\hat{u} < 1\,570 \text{ V}$,
- \hat{i}_{foudre} : 20 fois 2 500 A (onde 8/20 μs) sans se mettre en court-circuit,
- $\hat{i}_{50 \text{ Hz}}$:

20 000 A	/	0,2 s,
5 000 A	/	5 s,
1 200 A	/	2 mn.

Cette tenue au courant de crête $\hat{i}_{50 \text{ Hz}}$ est bien supérieure à la valeur du courant « résiduel » du réseau MT. Elle s'explique par le

fait qu'un limiteur qui a été « amorcé » lors d'une très forte surtension peut rester en court-circuit, il doit être alors encore capable de supporter un courant de court-circuit BT faisant suite à un premier défaut d'isolement du réseau BT protégé.

Les limiteurs commercialisés sous la marque Merlin Gerin peuvent supporter 40 kA/0,2 s.



Le passage dans les conducteurs du courant de recherche est détecté par des capteurs magnétiques (tores). Chaque récepteur qui comporte un amplificateur sélectif (calé sur la fréquence et la phase du courant de recherche) calcule la résistance et la capacité du circuit (avec la tension et la phase dont il a la référence par un bus) et signale la présence du défaut.

Fig. 27 : principe de fonctionnement d'un DLD à mesure d'impédance en BF.

5.4 Protection du neutre selon le SLT

Le neutre doit être **coupé** par un dispositif omnipolaire :

- en régime TT et TN si la section du neutre est inférieure à la section des phases ;
- en distribution terminale vu le risque d'inversion neutre/phase.

Le neutre doit être **protégé et coupé** :

- en régime IT pour intervention de la protection au défaut double, l'un des défauts pouvant être sur le neutre ;
- en régime TT et TN-S si la section du neutre est inférieure à la section des phases ;

- quel que soit le SLT si l'installation génère des courants harmoniques de rang 3 et multiples (surtout si la section du neutre est réduite).

En TN-C le neutre, qui est aussi le PE, ne peut être coupé, ce qui est dangereux du fait de ses variations de potentiel, dus aux courants de charge et aux courants de défaut d'isolement. Pour éviter les risques, il est nécessaire d'avoir, pour chaque zone ou abonné, une équipotentialité locale et une prise de terre.



La **figure 28** montre quels sont les types de disjoncteurs à utiliser en fonction du SLT. Il est à remarquer que les SLT TT et TN peuvent utiliser les mêmes appareils (avec bloc différentiel en plus en TT)...

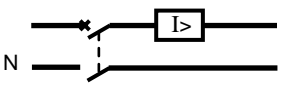
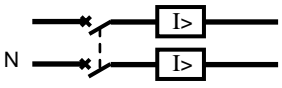
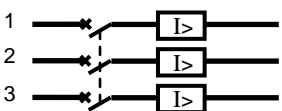
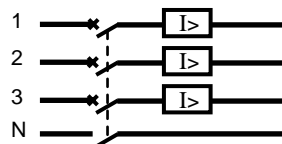
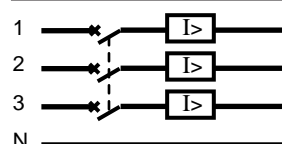
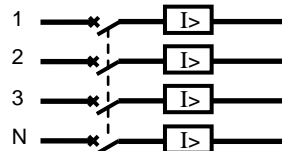
Circuits	Schémas			
	TN-C	TN-S	TT	IT
Circuits monophasés				
Circuits monophasés avec protection unipolaire	non	oui	oui	non
 Disjoncteur bipolaire (1 pôle protégé, 2 pôles coupés)				
Circuits monophasés avec protection bipolaire	non	oui	oui	oui
 Disjoncteur bipolaire (à 2 pôles protégés)				
Circuits triphasés sans neutre				
Avec protection bipolaire	oui	oui	oui	oui
 Disjoncteur tripolaire				
Circuit triphasé avec neutre				
Sans détection de surintensité sur le neutre	non	oui	oui	non
 Disjoncteur tétrapolaire à 3 pôles protégés				
 Disjoncteur tripolaire	oui	oui	oui	non
Avec détection de surintensité sur le neutre	non	oui	oui	oui
 Disjoncteur tétrapolaire à 4 pôles protégés				

Fig. 28 : emploi des disjoncteurs selon les SLT.



6 Choix du SLT et conclusion

Les trois SLT mondialement utilisés et normalisés par la CEI 60364 ont pour objectif commun la recherche de la meilleure **sûreté**.

Sur le plan de la protection des personnes, les 3 régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation.

Étant donné les caractéristiques spécifiques à chaque régime, il ne peut donc être question de faire un choix à priori.

Ce choix doit résulter d'une concertation entre l'utilisateur et le concepteur de réseau : (Bureaux d'études, installateur...) sur :

- les caractéristiques de l'installation,
- les conditions et impératifs d'exploitation.

Il est illusoire de vouloir exploiter un réseau à neutre isolé dans une partie d'installation qui, par nature, possède un niveau d'isolement faible (quelques milliers d'ohms) : installations anciennes, étendues, avec lignes extérieures... De même il serait contradictoire, dans une industrie où la continuité de service ou de productivité est impérative et les risques d'incendie importants, de choisir une exploitation en mise au neutre.

6.1 Méthodologie pour choisir le SLT

■ Tout d'abord **ne pas oublier que les trois SLT peuvent coexister** dans une même installation électrique ; ce qui est une garantie pour obtenir la meilleure réponse aux besoins de sécurité et de disponibilité.

■ Ensuite **s'assurer que le choix n'est pas recommandé ou imposé** par les normes ou la législation (décrets, arrêtés ministériels).

■ Puis **dialoguer avec l'utilisateur pour connaître ses exigences et ses moyens** :

- besoin de continuité de service,
- service entretien ou non,
- risque incendie.

Globalement :

- continuité de service et service entretien : la solution est l'IT,
- continuité de service et pas de service entretien : pas de solution totalement satisfaisante ; préférer le TT pour lequel la sélectivité au déclenchement est plus facile à mettre en œuvre et qui minimise les dégâts par rapport au TN. Les extensions sont simples à réaliser (pas de calcul).

□ continuité de service non impérative et service entretien compétent : préférer le TN-S (réparation et extensions rapides et exécutées selon les règles),

□ continuité de service non impérative et pas de service entretien : préférer le TT,

□ risque d'incendie : IT si service entretien et emploi de DDR 0,5 A ou TT.

■ Enfin, **tenir compte des spécificités du réseau et des récepteurs** :

□ réseau très étendu ou à fort courant de fuite : préférer le TN-S,

□ utilisation d'alimentations de remplacement ou de secours : préférer le TT,

□ récepteurs sensibles aux forts courants de défaut (moteurs) : préférer le TT ou l'IT,

□ récepteurs à faible isolement naturel (fours) ou avec filtre HF important (gros ordinateurs) : préférer le TN-S,

□ alimentation des systèmes de contrôle-commande : préférer l'IT (continuité de service) ou le TT (meilleure équipotentialité des appareils communicants).



6.2 Conclusion

Le meilleur choix, avec un seul SLT est rare, il convient donc, **dans beaucoup de cas** de mettre en œuvre plusieurs SLT dans une même installation.

En règle générale, une installation en râteau, en distinguant bien les prioritaires des non prioritaires, en utilisant des sources de secours ou des alimentations sans interruption, est préférable à une installation monolithique arborescente.

L'objet de ce Cahier Technique étant de parfaire votre connaissance des SLT, nous espérons qu'il va vous permettre d'optimiser la sûreté de vos installations.

Le Cahier Technique n° 173, qui apporte un éclairage sur l'emploi des SLT dans le monde et sur leur évolution, devrait compléter utilement votre information.

Signalons enfin le guide de l'installation électrique, réalisé en 2003 (Ed. CITEF S.A.S.), suite à la parution de la nouvelle norme NF C 15-100. Il peut être d'une grande utilité pour la mise en œuvre pratique des régimes du neutre.

Ce guide existe aussi en langue anglaise, il est cohérent avec la norme CEI 60364.



Bibliographie

Normes et décrets

- CEI 60241 : Coupe-circuit à fusibles pour usages domestiques ou analogues.
- CEI 60269 : Coupe-circuit à fusibles à basse tension.
- CEI 60364 : Installation électriques des bâtiments.
- CEI 60479 : Effets de courant passant par le corps humain.
- CEI 60755 : Règles générales pour les dispositifs de protection à courant différentiel résiduel.
- CEI 60947-2 : Appareillage à Basse Tension - 2^{ème} partie : Disjoncteurs.
- NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension.
- NF C 63-150 : Limiteurs de surtension : règles.
- Décret français du 14.11.88

Cahiers Techniques

- Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel HT, Cahier Technique n° 62
F. SAUTRIAU
- Les dispositifs différentiels résiduels en BT, Cahier Technique n° 114
R. CALVAS
- Protection des personnes et alimentations statiques, Cahier Technique n° 129
J.-N. FIORINA
- Les perturbations électriques en BT, Cahier Technique n° 141
R. CALVAS
- Introduction à la conception de la sûreté, Cahier Technique n° 144
P. BONNEFOI
- Surtensions et coordination de l'isolement en HT, Cahier Technique n° 151
D. FULCHIRON

- La foudre et les installations électriques HT, Cahier Technique n° 168
B. DE METZ NOBLAT
- Les schémas des liaisons à la terre dans le monde et évolutions, Cahier Technique n° 173
B. LACROIX et R. CALVAS
- Le schéma IT (à neutre isolé) des liaisons à la terre en BT, Cahier Technique n° 178, F. JULLIEN et I. HERITIER

Publications diverses

- Guide de l'installation électrique
Ed. CITEF S.A.S. Paris - 2003.
- Electrical installation guide
Ed. CITEF S.A.S. Paris - 2005.
- Guide de l'ingénierie électrique, Ed. ELECTRA 1986.
- Electrical Review
novembre 1991 - octobre 1992.
- La protection différentielle
Cahier Technique J3E - 02/90



