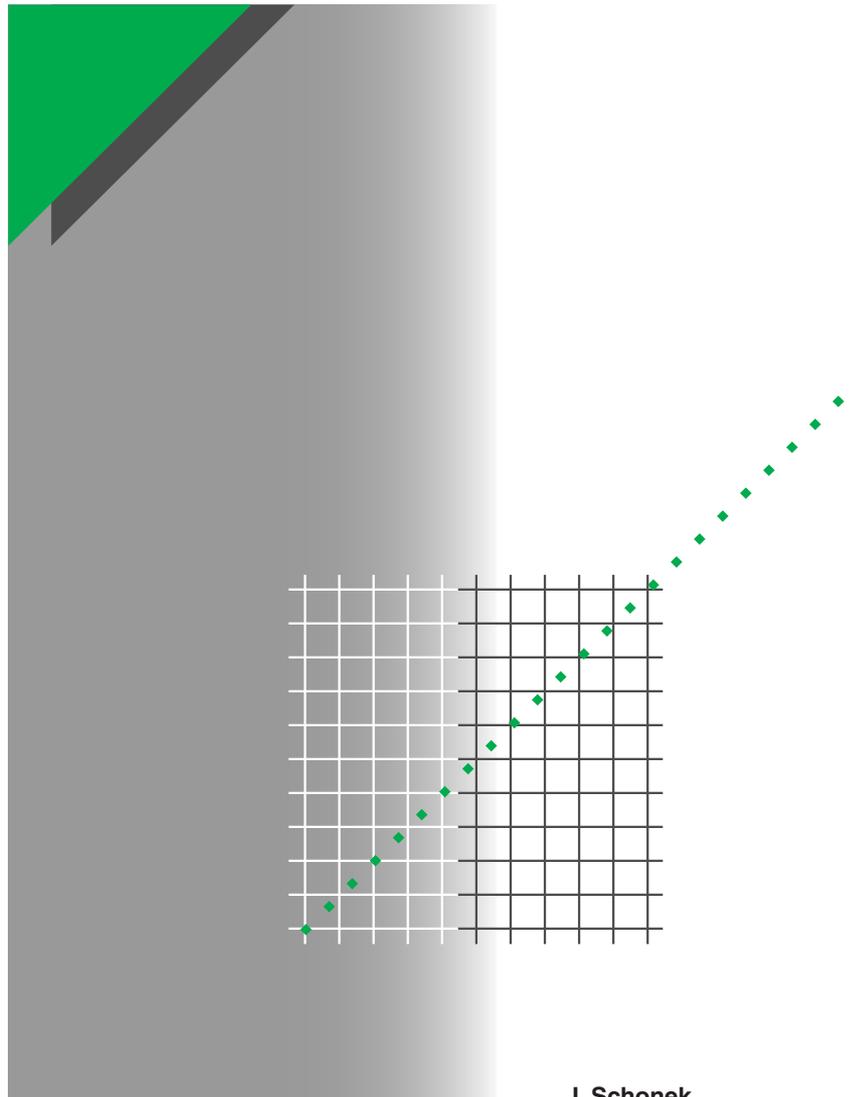


Cahier technique n° 114

Les protections différentielles en basse tension



J. Schonek

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.

Cette collection est disponible sur l'Internet avec ses nouveautés et mises à jour :

<http://www.cahiers-techniques.schneider-electric.com>

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) ».

n° 114

Les protections différentielles en basse tension



Jacques Schonek

Ingénieur ENSEEIHT et Docteur-Ingénieur de l'Université de Toulouse, il a participé de 1980 à 1995 à la conception des variateurs de vitesse de la marque Telemecanique.

Il a été ensuite gérant de l'activité Filtrage d'Harmoniques.

Il est rattaché actuellement au groupe « Architectures et Systèmes » de Schneider Electric, en tant qu'expert en Applications de Distribution Electrique.

Conducteurs actifs :

Ensemble des conducteurs affectés à la transmission de l'énergie électrique y compris le neutre en alternatif et le compensateur en continu, excepté le conducteur PEN dont la fonction « conducteur de protection » (PE) est prioritaire sur la fonction « neutre ».

Conducteur de protection (PE ou PEN) :

Conducteur qui, selon les prescriptions, relie les masses des matériels électriques et certains éléments conducteurs à la prise de terre.

Contact direct :

Contact d'une personne avec les parties actives des matériels électriques (conducteurs et pièces normalement sous tension).

Contact indirect :

Contact d'une personne avec des masses mises accidentellement sous tension (généralement suite à un défaut d'isolement).

Courant de défaut Id :

Courant résultant d'un défaut d'isolement.

Courant de fuite à la terre :

Courant qui s'écoule des parties actives à la terre, en l'absence de tout défaut d'isolement.

Courant de fuite « naturel » :

Courant qui, en l'absence de défaut, s'écoule à la terre à travers les isolants.

Courant de fuite « intentionnel » :

Courant qui, en l'absence de défaut, s'écoule à la terre à travers des composants disposés intentionnellement (résistances ou condensateurs).

Courant différentiel résiduel :

Somme algébrique des valeurs instantanées des courants parcourant les conducteurs actifs d'un circuit en un point de l'installation électrique.

Courant différentiel résiduel de fonctionnement : If

Valeur du courant différentiel résiduel provoquant le fonctionnement d'un dispositif différentiel.

Courant différentiel de fonctionnement assigné : IΔn

Valeur du courant différentiel de fonctionnement, attribué par le constructeur au dispositif, pour lequel celui-ci doit fonctionner dans des conditions spécifiées. D'après les normes de construction, à 20 °C, les dispositifs différentiels en basse tension doivent respecter :

$$\frac{I\Delta n}{2} < I_f < I\Delta n$$

Défaut d'isolement :

Rupture d'isolement qui provoque un courant de

défaut à la terre ou un court-circuit via le conducteur de protection.

Dispositif différentiel résiduel (DDR) :

Appareil dont la grandeur d'influence est le courant différentiel résiduel, il est généralement associé ou intégré à un appareil de coupure.

Electrisation :

Application d'une tension entre deux parties du corps d'un être vivant.

Electrocution :

Electrisation qui provoque la mort.

Fibrillation ventriculaire :

C'est un dysfonctionnement du cœur qui correspond à la perte de synchronisme de l'activité de ses parois (diastole et systole). Le passage du courant alternatif dans le corps peut en être la cause par l'excitation périodique qu'il provoque. La conséquence ultime est l'arrêt de la circulation sanguine.

Isolement :

Disposition qui empêche la transmission d'une tension (et le passage d'un courant) entre un élément normalement sous tension et une masse ou la terre.

Masse :

Partie conductrice susceptible d'être touchée et normalement isolée des parties actives mais pouvant être portée à une tension dangereuse suite à un défaut d'isolement.

Perturbation de mode commun :

Tout phénomène électromagnétique permanent ou transitoire s'appliquant entre une partie active d'un réseau et la terre. Ce phénomène peut être une surtension transitoire, une tension permanente, une surintensité, une décharge électrostatique.

Perturbation en mode différentiel :

C'est un phénomène s'appliquant entre différentes parties actives du réseau, comme par exemple une surtension.

Régime du neutre :

Voir schéma des liaisons à la terre.

Schéma des liaisons à la terre (SLT) :

Encore parfois appelé « régime de neutre ». La norme CEI 60364 officialise trois principaux schémas des liaisons à la terre qui définissent les raccordements possibles du neutre de la source et des masses, à la terre ou au neutre. Les protections électriques sont ensuite définies pour chacun d'eux.

Tension limite de sécurité (UL) :

Tension UL en dessous de laquelle il n'y a pas de risque d'électrocution.

Les protections différentielles en basse tension

Les protections différentielles ou Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR) sont aujourd'hui reconnus dans le monde entier comme le moyen le plus efficace pour assurer la protection des personnes et des biens contre les risques électriques en basse tension.

Leur choix et leur utilisation optimale nécessitent une bonne connaissance des règles d'installation électrique, notamment des schémas des liaisons à la terre, des technologies existantes et de leurs performances.

Tous ces aspects sont abordés dans ce Cahier Technique, complétés de nombreuses réponses apportées par les services techniques et de maintenance de Schneider-Electric aux interrogations qui leur sont régulièrement adressées.

Sommaire

1 Introduction		p. 4
2 Les risques liés aux courants électriques	2.1 Risques d'électrisation des personnes	p. 4
	2.2 Risques d'incendie	p. 6
	2.3 Destruction des récepteurs	p. 7
3 Les protections contre les risques liés aux courants électriques	3.1 Les règles d'installation	p. 8
	3.2 Détection d'un défaut d'isolement	p. 9
4 Les Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR)	4.1 Principe	p. 11
	4.2 Applications	p. 11
	4.3 Caractéristiques principales	p. 12
	4.4 Technologie	p. 13
	4.5 Contraintes liées au capteur de courant	p. 16
	4.6 Applications particulières	p. 17
5 Conclusion		p. 23
Annexe 1 : calcul des tensions de contact en cas de défaut		p. 24
Annexe 2 : types de convertisseurs et allure des courants de défaut		p. 26
Annexe 3 : courants de fuite pour différents SLT		p. 29
Annexe 4 : seuil des DDR en fonction de la tension réseau		p. 31
Bibliographie		p. 32

1 Introduction

Les nombreux avantages de l'énergie électrique ne doivent pas faire oublier les risques qui y sont attachés. L'électricité est utilisée de manière courante par le grand public, et des accidents encore trop nombreux se produisent avec comme conséquences électrocutions, brûlures, incendies.

De strictes règles d'installation ont été établies par des organismes internationaux (IEC, CENELEC) ou nationaux (NFPA aux USA, UTE en France, ...).

Des dispositifs de protection sûrs ont été conçus, grâce à l'analyse rigoureuse des risques et des conséquences de défaillance de matériel

ou de mauvaise utilisation. Parmi ces dispositifs, les protections différentielles ont été reconnues par la normalisation internationale comme un moyen efficace de protection des personnes et des biens.

Ce document présente donc le sujet en 3 étapes :

- un exposé des risques liés aux courants électriques,
- un panorama des moyens de protection mis en œuvre pour limiter ces risques,
- une description détaillée du fonctionnement des dispositifs différentiels résiduels.

2 Les risques liés aux courants électriques

2.1 Risques d'électrisation des personnes

Une personne soumise à une tension électrique est électrisée. Selon l'importance de l'électrisation, cette personne peut subir différents effets physiopathologiques :

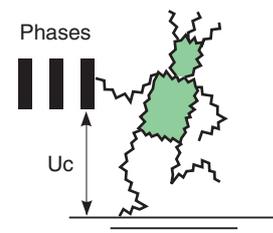
- une sensation désagréable,
- des contractures musculaires involontaires (tétanisation),
- des brûlures,
- un arrêt cardiaque (c'est l'électrocution).

Ces effets dépendent de différents facteurs : des caractéristiques physiologiques de l'être humain concerné, de l'environnement (humide ou sec par exemple) et aussi des caractéristiques du courant traversant le corps.

Une personne peut subir un choc électrique dans deux circonstances :

- soit par un contact direct : c'est le cas d'une personne qui touche un conducteur nu sous tension,
- soit par un contact indirect : c'est le cas d'une personne qui touche la carcasse métallique d'un récepteur électrique ayant un défaut d'isolement. Le danger provient du courant électrique, en valeur et en durée, traversant le corps humain et en particulier la région du cœur.

a) Contact direct



b) Contact indirect

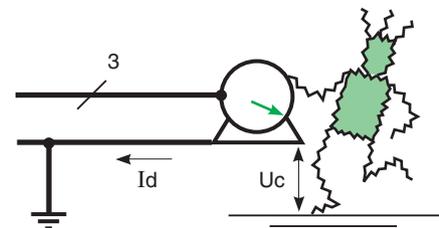


Fig. 1 : contacts direct et indirect.

La **figure 2** synthétise les résultats des travaux publiés par la Commission Electrotechnique Internationale sur ce sujet (Spécification Technique CEI 60479-1, Ed.4, 2005 : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1 : Aspects généraux). Elle indique les conséquences du passage d'un courant alternatif à travers le corps humain, de la main gauche aux pieds, en fonction de son intensité et de sa durée.

Il faut surtout distinguer les zones 3 et 4 dans lesquelles le danger est réel.

■ Zone AC-3 (située entre les courbes B et C₁)

Pour des personnes placées dans cette situation, il n'y a généralement aucun dommage organique, mais il y a une probabilité de contractions musculaires et de difficultés de respiration, de perturbations réversibles de la formation des impulsions dans le cœur et de leur propagation.

■ Zone AC-4 (située à droite de la courbe C₁)

En plus des effets de la zone AC-3, la probabilité

de la fibrillation ventriculaire :

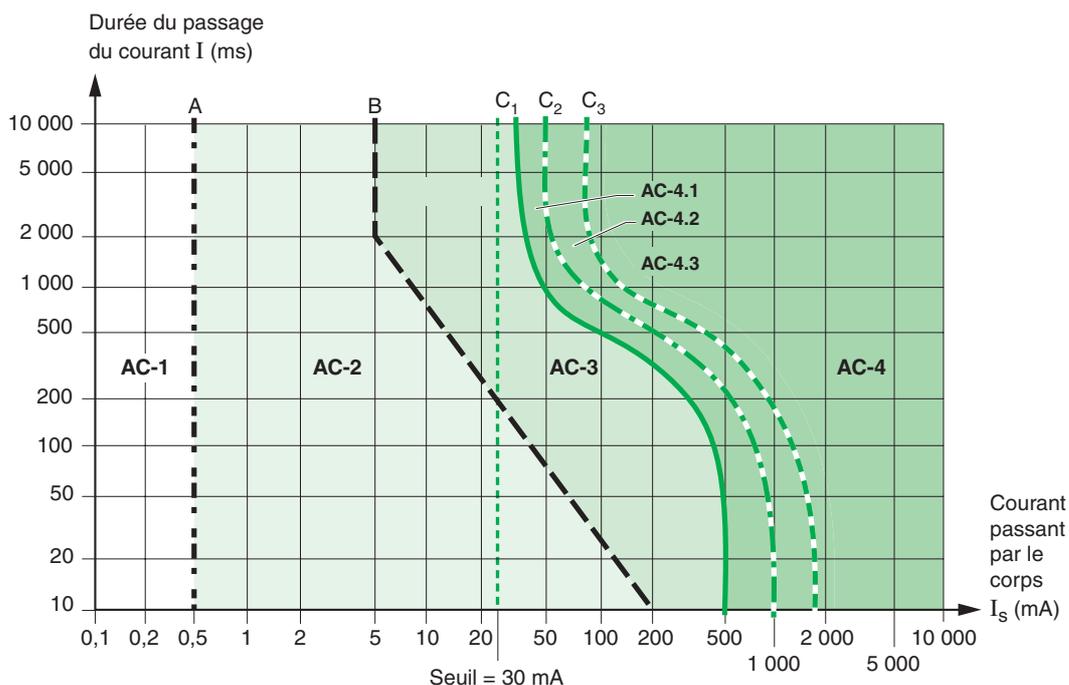
- peut atteindre 5 %, entre les courbes C₁ et C₂,
- est inférieure à 50 % entre les courbes C₂ et C₃,
- dépasse 50 % au-delà de la courbe C₃.

Les effets physiopathologiques tels que : arrêt du cœur, arrêt de la respiration et brûlures graves augmentent avec la valeur de l'intensité et le temps d'exposition.

A noter qu'une personne en contact avec une tension de 230 V peut être parcourue par un courant de l'ordre de 150 mA dans des conditions d'exposition défavorables.

Compte tenu des valeurs de courant considérées comme dangereuses, une valeur maximale admissible de 30 mA est considérée comme sûre.

En BT, la composante prépondérante de l'impédance du corps humain est la résistance de la peau, qui est essentiellement fonction de l'environnement (locaux secs, humides, mouillés).



Zone AC-1 : Perception

Zone AC-2 : Contractions musculaires involontaires

Zone AC-3 : Difficultés de respiration

Zone AC-4 : Effets pathophysiologiques graves

AC-4.1 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 5 %

AC-4.2 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 50 %

AC-4.3 : risque de fibrillation ventriculaire supérieur à 50 %

Fig. 2 : zones temps/courant des effets des courants alternatifs (15 Hz à 100 Hz) sur des personnes.

La CEI a défini la « tension limite conventionnelle de contact », notée U_L , comme la valeur maximale de la tension de contact pouvant être maintenue indéfiniment dans les conditions d'environnement spécifiées.

La valeur retenue pour cette tension est de 50 V efficace en courant alternatif.

Cette valeur est en cohérence avec une valeur moyenne d'impédance de 1700 Ω et un courant maximal de 30 mA.

Les effets en fonction de la tension et de la fréquence

La CEI 60479-1 fournit les courbes de variation de l'impédance du corps en fonction de la tension et de la fréquence.

La **figure 3** montre que l'impédance du corps décroît de façon inverse de la fréquence. Toutefois, la CEI 60479-2 (Effets du courant passant par le corps humain, aspects particuliers) qui traite des effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz, indique qu'à niveau de risque égal, un courant à 1000 Hz est environ 14 fois plus élevé qu'un courant à 50/60 Hz.

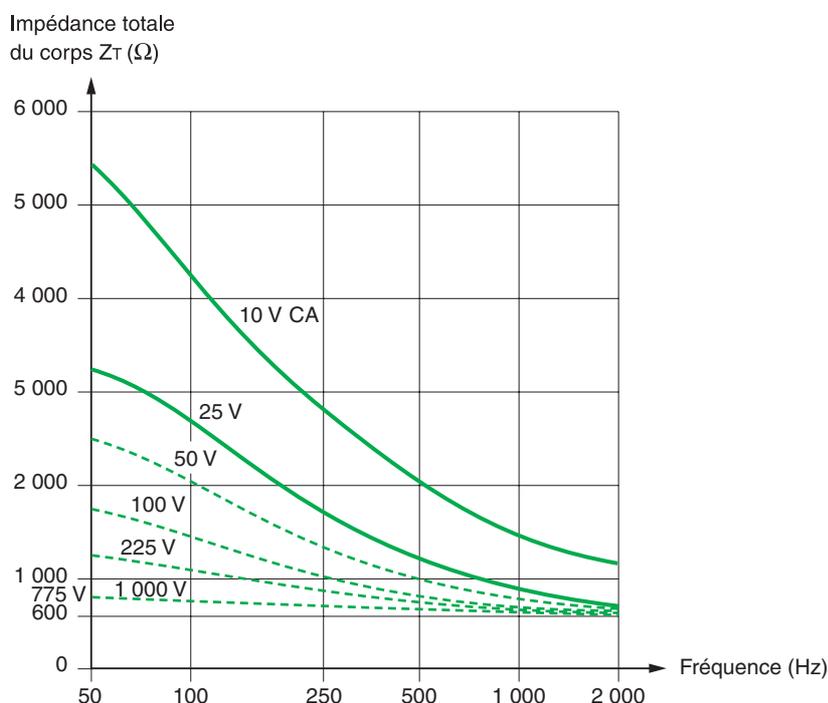


Fig. 3 : valeurs de l'impédance totale du corps Z_T en fonction de la fréquence et de la tension de contact.

2.2 Risque d'incendie

Une étude réalisée dans les années 80-90 en Allemagne par une compagnie d'assurance sur des incendies en milieu industriel et de bureaux, a révélé que l'électricité était à l'origine de plus de 40 % des sinistres.

Bon nombre d'incendies d'origine électrique 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 de risque d'incendie ou d'explosion propre au local (stockage de matériau inflammable, présence d'hydrocarbures volatils, ...).

A l'origine de nombreux incendies d'origine électrique, on trouve la combinaison de plusieurs facteurs :

- une installation ancienne,
- la dégradation des isolants,
- une accumulation de poussière et d'humidité.

L'augmentation progressive des courants de cheminement à la surface des isolants pollués et en présence d'humidité produit des étincelages à l'origine de dépôts de carbone en surface. L'évolution de ce phénomène lié à des cycles de condensation en surface et de séchage est très lente. Lorsque le courant de cheminement dépasse 300mA un phénomène d'avalanche se

produit, capable d'enflammer les dépôts de carbone qui, à leur tour, pourront provoquer l'inflammation des isolants et des appareils. Il existe un risque réel d'inflammation pour un courant de fuite de 300 mA. Le courant de fuite circule de la source vers les armatures métalliques et ne revient pas à la source par le conducteur de retour.

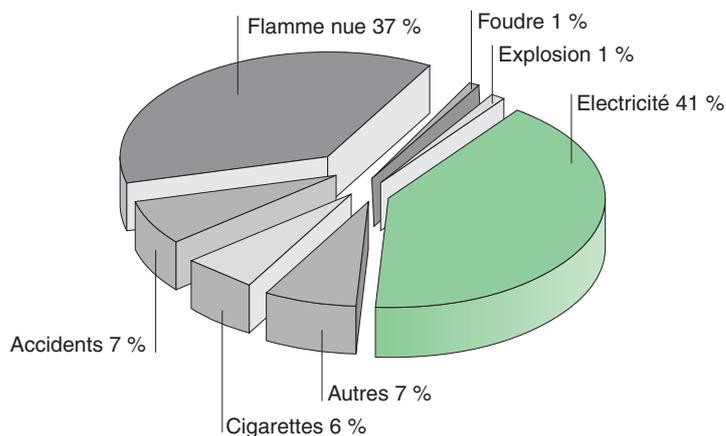


Fig. 4 : origine des incendies dans les bâtiments.

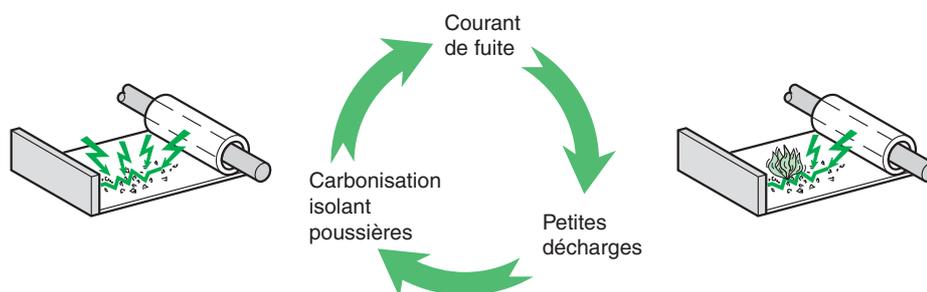


Fig. 5 : processus pouvant conduire à un incendie.

2.3 Destruction des récepteurs

Certains récepteurs peuvent être détériorés ou détruits par la circulation d'un courant électrique de forte intensité. C'est le cas par exemple des moteurs lors d'un fonctionnement prolongé au delà de la charge nominale, ou des câbles, en cas de raccordement d'un nombre excessif d'équipements.

La surintensité va provoquer la surchauffe des conducteurs et peut conduire à la perforation des isolants et à la circulation d'un courant de défaut. Celui-ci peut se maintenir à une valeur faible, difficilement détectable, ou dégénérer rapidement en court-circuit et provoquer une dégradation importante.

3 Les protections contre les risques liés aux courants électriques

3.1 Les règles d'installation

La norme internationale de référence est la CEI 60364 : « Installations électriques des bâtiments », et en particulier la partie 4-41 : Protection pour assurer la sécurité – Protection contre les chocs électriques.

Elle établit les règles d'installation pour que les parties actives dangereuses ne soient pas accessibles, et que les parties conductrices accessibles ne présentent pas de danger en conditions normales et en cas de défaut.

Cette norme internationale a été adoptée par de très nombreux pays, en l'état ou avec des adaptations locales. En France, par exemple, les installations doivent être conformes à la NF C 15-100 :

« Installations électriques à basse tension ».

Règles générales

Les installations doivent être conçues de manière à fournir une protection principale en fonctionnement normal (protection contre les contacts directs) et une protection en cas de défaut (protection contre les contacts indirects).

■ La protection principale est assurée par l'isolation des parties actives, la présence de barrières, ou d'enveloppes.

La protection en cas de défaut est assurée par une ou plusieurs des mesures suivantes :

- une coupure automatique de l'alimentation,
- une isolation double ou renforcée,
- une séparation électrique (utilisation d'un transformateur d'isolement),
- l'utilisation d'une très basse tension.

La coupure automatique de l'alimentation est le plus souvent utilisée. Certaines exigences y sont associées :

- mise à la terre des masses métalliques et liaison équipotentielle de protection,
- spécification d'un temps de coupure maximum en cas de défaut (par exemple : 0,4 s en 230 V)

Un dispositif de protection doit séparer automatiquement un circuit ou un matériel de son alimentation de telle façon que, à la suite d'un défaut entre une partie active et une masse dans le circuit ou le matériel, une tension de contact supérieure à la tension limite conventionnelle ne puisse pas se maintenir pendant un temps suffisant pour créer un danger pour une personne en contact avec des parties conductrices simultanément accessibles.

■ Une protection complémentaire doit être mise en œuvre pour parer à toute défaillance des mesures de protection contre les contacts directs.

En particulier, la norme CEI 60364-4-41 impose en courant alternatif qu'un dispositif de protection contre les contacts directs soit mis en œuvre pour les circuits de prises de courant pour un usage général jusqu'à 20 A, et pour les appareils portatifs de courant jusqu'à 32 A destinés à être utilisés à l'extérieur. Le seuil de fonctionnement de ce dispositif doit être de 30 mA.

Schémas de Liaison à la Terre

La norme CEI 60364 définit notamment trois principaux schémas de raccordement du réseau électrique à la terre : les schémas des liaisons à la terre ou SLT, encore parfois appelés « régimes de neutre » (cf. **figure 6** ci-contre), diversement utilisés selon les pays. (cf. Cahiers Techniques n° 172 et 173).

Ils diffèrent par la mise à la terre ou non du point neutre de la source de tension et le mode de raccordement des masses. Le choix du régime de neutre dépend des caractéristiques de l'installation et des conditions et impératifs d'exploitation (environnement, dispositifs de surveillance, continuité de service).

■ Schéma TT

Dans ce type de schéma, dit de « neutre à la terre » :

- le neutre de la source est relié à une prise de terre distincte de celle des masses,
- toutes les masses doivent être reliées à un même système de mise à la terre dédié à l'installation.

■ Schéma TN

Le principe de ce schéma dit de « mise au neutre » est de transformer tout défaut d'isolement en court-circuit monophasé phase – neutre. Dans ce type de schéma :

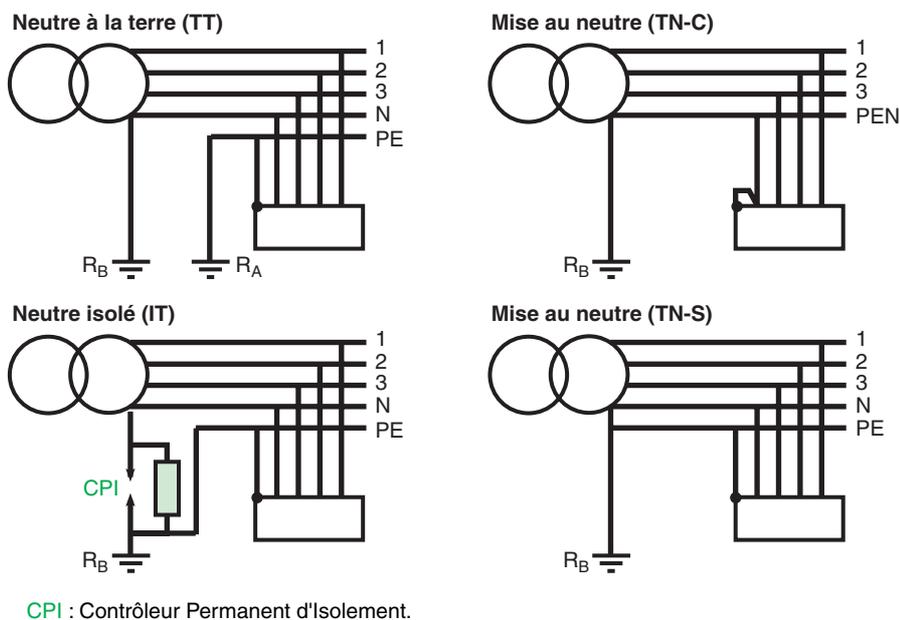
- le point neutre BT de chaque source est relié directement à la terre,
- toutes les masses de l'installation sont reliées à la terre et donc au neutre par le conducteur de protection PE (avec conducteur de neutre distinct, TN-S) ou PEN (conducteur de neutre commun, TN-C).

■ Schéma IT

Dans ce type de schéma dit « à neutre isolé », le neutre du transformateur est :

□ soit isolé de la terre (neutre isolé),

□ soit relié à la terre par une impédance élevée (neutre impédant), toutes les masses de l'installation sont reliées à la terre.



CPI : Contrôleur Permanent d'Isolément.

Fig. 6 : les trois principaux schémas des liaisons à la terre ou SLT sont les schémas TT, TN et IT, définis par la CEI 60364-1. Le TN peut être soit TN-C (neutre et PE confondus) soit TN-S (neutre et PE distincts).

3.2 Détection d'un défaut d'isolement

Un défaut d'isolement peut être la conséquence de la détérioration du matériau isolant :

- entre deux conducteurs actifs,
- entre un conducteur et la masse ou le conducteur de protection,
- d'un seul conducteur actif, rendant le conducteur accessible au toucher.

Un défaut d'isolement entre les conducteurs actifs devient un court-circuit.

Dans les autres cas, le défaut (de mode commun) occasionne un courant qui s'écoule à la terre. Ce courant qui ne se reboucle pas par les conducteurs actifs est appelé courant de « défaut à la terre ».

Il est la somme algébrique des courants circulant à tout instant dans les conducteurs actifs, d'où l'appellation : « courant différentiel résiduel ».

Remarque : si les courants sont sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation vectorielle de Fresnel et parler de « somme vectorielle » des courants.

Cette représentation n'est pas pertinente en présence de courants harmoniques, et l'appellation « somme algébrique » est donc plus générale.

Ce courant peut provenir d'un défaut d'isolement entre un conducteur actif et la carcasse d'un appareil (présentant alors un risque de contact indirect) ou de la défaillance des mesures d'isolement des parties actives (présentant alors un risque de contact direct).

Ces situations sont illustrées par la **figure 7** page suivante.

La valeur du courant de défaut d'isolement entre phase et terre (en mode commun) dépend de la nature du défaut et aussi du schéma de liaison à la terre.

Ce courant peut créer une tension de contact dangereuse, qui nécessite la déconnexion du circuit en défaut.

Voir en annexe 1 un résumé des calculs de courant de défaut et de tension de contact en fonction des SLT.

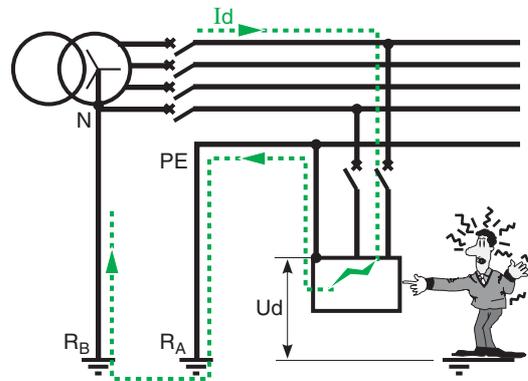
Dans le cas d'un schéma TN, le courant de défaut s'apparente à un court-circuit. Sa valeur est donc élevée, et la déconnexion du circuit peut être effectuée grâce à un dispositif de protection contre les surintensités.

Par contre, en TT, sa valeur est trop faible pour qu'il soit détecté et éliminé par les protections de surintensités conventionnelles (protection thermique ou magnétique d'un disjoncteur, fusible).

De même, dans tous les cas de contact direct, le courant de défaut est de faible valeur et ne peut pas être détecté et éliminé par les protections de surintensités conventionnelles. C'est également le cas d'un courant de fuite présentant un risque d'incendie.

Dans ces conditions, le courant de défaut doit donc être détecté et éliminé par un appareil spécifique : le Dispositif Différentiel Résiduel (DDR), qui fait l'objet du chapitre suivant.

a) Contact indirect



b) Contact direct

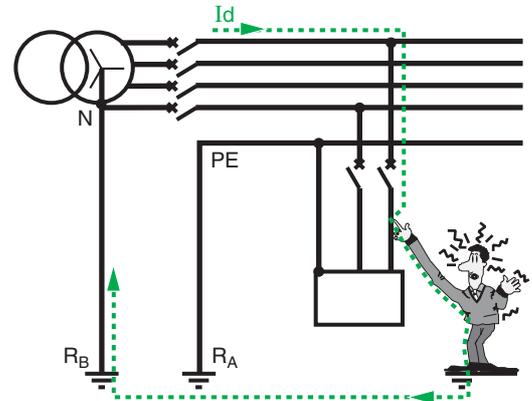


Fig. 7 : courant de défaut I_d = « courant différentiel résiduel ».

4 Les Dispositifs Différentiels Résiduels (DDR)

4.1 Principe

Le principe du DDR est illustré sur la **figure 8**. La détection de la somme algébrique des courants dans les conducteurs actifs (phases et neutre) est effectuée par un capteur constitué d'un tore qui entoure tous les conducteurs actifs. Un bobinage est réalisé autour du tore de manière à détecter les variations de flux induites par le courant différentiel résiduel. En l'absence de défaut d'isolement, la somme algébrique des courants dans les conducteurs actifs est nulle et le tore n'est soumis à aucun flux.

En cas de défaut d'isolement, cette somme n'est plus nulle et le courant de défaut induit dans le tore un flux qui génère un courant dans sa bobine.

Ce courant est redressé, filtré et amplifié.

Si le signal obtenu est supérieur à un certain seuil, une temporisation est lancée (elle peut être nulle pour une réaction instantanée).

Si le défaut est toujours présent à la fin de la temporisation, l'ouverture d'un dispositif de commande est déclenchée.

L'utilisation de DDR est totalement inadaptée en TN-C car le conducteur neutre n'est pas séparé du conducteur de protection, ce qui ne permet pas de discriminer le courant différentiel du courant dans le neutre.

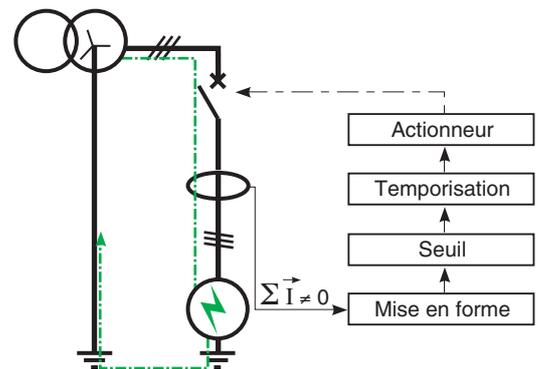


Fig. 8 : principe du DDR.

4.2 Applications

Protection complémentaire contre les contacts directs

Un DDR a la possibilité de détecter de faibles courants de fuite, susceptibles de traverser le corps d'une personne. Il permet donc d'assurer une protection complémentaire en cas de défaillance des moyens normaux de protection (par exemple : isolant vieilli ou blessé, imprudence, ...). Cette protection est aussi parfois appelée protection ultime car elle permet d'interrompre le courant alors que les autres dispositions sont défectueuses.

L'utilisation d'un DDR 30 mA sur tous les circuits de prise de courant jusqu'à 20 A, est désormais obligatoire, selon la CEI 60364-4-41 (Installations électriques à basse tension - Partie 4-41 : Protection pour assurer la sécurité - Protection contre les chocs électriques).

Il faut garder en mémoire qu'un DDR ne limite pas le courant instantané qui traverse le corps mais limite le temps pendant lequel le corps est traversé par le courant.

A noter également qu'en cas de contact direct avec un conducteur de phase en 230 V, le courant qui circulerait s'établirait au voisinage de 150 mA. Un DDR de sensibilité 10 ou 30 mA laisse passer le même courant.

Ces deux sensibilités apportent une protection équivalente. Le seuil de 30 mA permet de bénéficier d'un bon compromis économique entre sécurité et continuité de service : il est possible d'alimenter en aval d'un DDR plusieurs charges ou circuits tant que le courant de fuite ne fait pas déclencher le DDR. Pour un même courant de fuite, abaisser le seuil nécessite d'augmenter le nombre d'appareils de protection.

Protection contre les contacts indirects

L'utilisation d'un DDR est la seule solution pour assurer la protection contre les contacts indirects en TT, car le courant de défaut dangereux est trop faible pour être détecté par les dispositifs de protections de surintensité.

C'est également une solution de simplicité en TN-S ou IT. Par exemple, lorsque le câble d'alimentation est de grande longueur, la faible valeur du courant de défaut rend difficile le réglage des protections de surintensité.

A fortiori, lorsque le câble est de longueur inconnue, le calcul du courant de défaut est impossible et l'utilisation d'un DDR est la seule solution envisageable.

Dans ces conditions, le seuil de déclenchement du DDR sera ajusté à un seuil pouvant atteindre

quelques ampères ou dizaines d'ampères par exemple.

Protection contre les risques d'incendie

La norme CEI 60364-4-42 (Installations électriques des bâtiments –Partie 4-42 : Protection pour assurer la sécurité – Protection contre les effets thermiques) reconnaît

également l'efficacité des DDR pour assurer la protection contre les risques d'incendie, en imposant l'utilisation de tels dispositifs avec un seuil de déclenchement au plus égal à 500 mA. Ce seuil devrait dans un avenir proche être ramené à 300 mA, comme déjà préconisé par certaines normes nationales telle la NF C 15-100 en France.

4.3 Caractéristiques principales

Les DDR doivent être choisis en fonction du type de charge alimentée. Cette recommandation concerne en particulier les dispositifs à semi-conducteurs, pour lesquels les courants de défauts ne sont pas toujours sinusoïdaux.

Des exemples de convertisseurs à semi-conducteurs sont fournis en annexe 3, avec les formes d'onde des courants de défaut et le type de DDR qui doit leur être associé.

Types AC, A, B

La norme CEI 60755 (Règles générales pour les dispositifs de protection à courant différentiel résiduel) définit 3 types de DDR, suivant les caractéristiques des courants de défaut.

■ Type AC

Dispositifs différentiels pour lesquels le déclenchement est assuré pour des courants différentiels alternatifs sinusoïdaux.

■ Type A

Dispositif différentiel pour lequel le fonctionnement est assuré :

- pour des courants différentiels alternatifs sinusoïdaux,
- pour des courants différentiels continus pulsés,
- pour des courants différentiels continus pulsés avec une composante continue de 0,006 A avec ou sans contrôle de l'angle de phase, indépendamment de la polarité.

■ Type B

Dispositif pour lequel le fonctionnement est assuré :

- comme dans le cas du type A,
- pour des courants différentiels sinusoïdaux jusqu'à 1000 Hz,
- pour des courants différentiels sinusoïdaux superposés à un courant continu pur,
- pour des courants continus pulsés superposés à un courant continu pur,
- pour des courants différentiels qui peuvent provenir de circuits redresseurs c'est-à-dire :
 - redresseur triphasé simple alternance ou pont redresseur triphasé double alternance,

- pont redresseur double alternance entre phases, avec ou sans contrôle de l'angle de phase, indépendamment de la polarité.

Certains dispositifs électroniques peuvent générer des courants de défaut dont la forme n'est pas décrite par les définitions précédentes.

Des exemples sont fournis à l'annexe 2.

Des travaux ont été initiés à la CEI afin de couvrir également ces cas particuliers.

Sensibilité

La sensibilité d'un DDR s'exprime par son « courant différentiel de fonctionnement assigné », noté $I\Delta n$.

Des valeurs préférentielles ont été définies par la CEI, ce qui permet de répartir les DDR en 3 groupes suivant leur valeur de $I\Delta n$:

- haute sensibilité (HS) : 6 – 10 – 30 mA,
- moyenne sensibilité (MS) : 0,1 – 0,3 – 0,5 – 1 A,
- basse sensibilité (BS) : 3 – 10 – 30 A.

Les DDR à usage domestique ou analogue sont uniquement à haute ou moyenne sensibilité.

Il est évident que la Haute Sensibilité (HS) est utilisée le plus souvent en protection contre les contacts directs et que la MS et en particulier les valeurs 300 et 500 mA sont indispensables pour la protection incendie. Les autres sensibilités (MS et BS) permettent de répondre à d'autres besoins tels que la protection contre les contacts indirects (obligatoire en schéma TT), ou la protection des machines.

Temps de déclenchement

Comme indiqué au chapitre 1, les effets des courants électriques sont fonctions de leur amplitude et de leur durée. Les temps de réaction des DDR ont donc été précisés dans les normes dites « de produits » :

- CEI 61008 : « Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel pour usages domestiques et analogues sans dispositif de protection contre les surintensités incorporé (ID) »,

- CEI 61009 « Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel avec protection contre les surintensités incorporée pour installations domestiques et analogues (DD) »,
 - CEI 60947-2, annexe B : « Appareillage à basse tension – Disjoncteurs à protection incorporée par courant différentiel résiduel »,
 - CEI 60947-2, annexe M : « Appareillage à basse tension – Dispositifs modulaires à courant différentiel résiduel – MRCD (non intégrés à un dispositif de coupure de courant) ».
- Les valeurs normalisées des temps de fonctionnement sont indiquées dans le tableau de la **figure 9** et sur les courbes de la **figure 10**, pour des appareils de type G et S :
- G (général) pour les DDR instantanés,
 - pour les DDR dits « sélectifs » avec un niveau de temporisation le plus faible (par exemple employé en France pour les disjoncteurs de branchement).

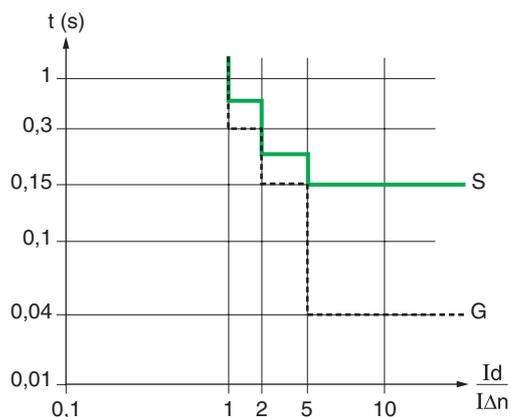


Fig. 10 : courbes de temps de fonctionnement maximal pour disjoncteur ou interrupteur différentiel « S » et pour usage général instantané « G ».

Type	I_n A	$I_{\Delta n}$ A	Valeurs normalisées du temps de fonctionnement (en s) et du temps de non réponse (en s) pour un courant résiduel (I_{Δ}) égal à :				
			$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	5 A, 10 A 5 $I_{\Delta n}$	20 A, 50 A 100 A, 200 A 500 A	
Général	N'importe quelle valeur	N'importe quelle valeur	0,3	0,15	0,04	0,04	Temps de fonctionnement maximal
S	≥ 25	$> 0,030$	0,5	0,2	0,15	0,15	Temps de fonctionnement maximal
			0,13	0,06	0,05	0,04	Temps de non-réponse minimal

Fig. 9 : valeurs normalisées du temps de fonctionnement maximal et du temps de non fonctionnement selon la CEI 61008.

4.4 Technologie

Classification des DDR selon leur mode d'alimentation :

« **A propre courant** », ou : « fonctionnellement indépendant de la tension d'alimentation ».

C'est un appareil dont l'énergie de déclenchement est fournie par le courant de défaut.

Ce mode d'alimentation très sûr est préconisé en secteur résidentiel ou pour des applications similaires lorsque l'utilisateur du circuit n'est pas averti ou conscient des dangers de l'électricité.

De nombreux pays, et notamment en Europe, reconnaissent l'efficacité de ces dispositifs pour les installations résidentielles et analogues (normes EN 61008 et 61009).

« **A source auxiliaire** » ou : « fonctionnellement dépendant de la tension d'alimentation ».

C'est un appareil dont l'énergie de déclenchement nécessite un apport d'énergie indépendant du courant de défaut. La source est généralement le circuit contrôlé. Ainsi, lorsque ce circuit est sous tension le DDR est alimenté.

En absence de tension, le DDR n'est pas actif mais il n'y a pas de danger.

Les appareils sont conçus de manière à fonctionner malgré les baisses de tension tant que la tension de contact a la possibilité de dépasser 50 V (tension limite de sécurité). Cette condition est remplie si un appareil fonctionne toujours en étant seulement alimenté par 2 phases, avec une baisse de tension jusqu'à 85 V entre phases. C'est le cas avec les blocs Vigi, DDR associés aux disjoncteurs « Compact » de la marque Merlin Gerin.

Les DDR font l'objet d'une distinction complémentaire vis-à-vis de leur alimentation selon que leur fonctionnement est, ou non « à sécurité positive ».

Sont considérés comme des appareils à sécurité positive deux types d'appareils :

- Ceux dont le déclenchement ne dépend que du courant de défaut : tous les appareils « à propre courant » sont des appareils à sécurité positive,
- Et ceux, plus rarement utilisés, qui se placent automatiquement en position de déclenchement (position de sécurité) lorsque les conditions ne sont plus réunies pour garantir le déclenchement en présence du courant de défaut (par exemple une baisse de tension jusqu'à 25 V).

Remarques :

La CEI 60364, § 531-2-2-2 indique pour les dispositifs avec source auxiliaire qui ne sont pas à sécurité positive : « Leur utilisation est permise s'ils sont installés dans les installations exploitées, essayées et vérifiées par des personnes averties ou qualifiées ».

La norme NF C 15-100 § 531.2.2.2 précise encore qu'ils ne doivent pas être utilisés dans les installations des locaux d'habitation ou dans des utilisations analogues.

La technologie « à propre courant », dont le fonctionnement est indépendant des conditions d'alimentation du circuit protégé, est particulièrement adaptée et performante pour la construction des DDR à haute sensibilité en milieu domestique ou pour les circuits terminaux pour lesquels le réarmement est destiné aux personnes non averties pour les raisons suivantes :

- Les circuits terminaux sont exploités et parfois installés par des personnes non averties (sans connaissance de l'installation, sans connaissance des risques encourus),

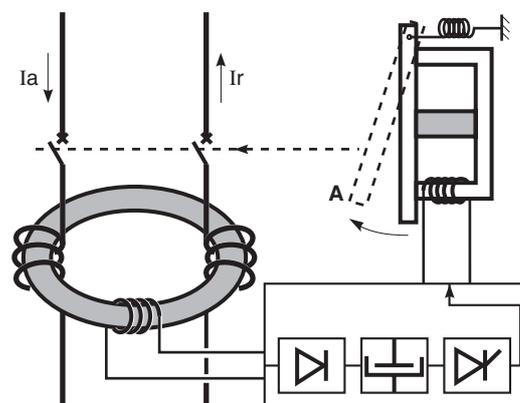


Fig. 11 : le courant de défaut, par l'intermédiaire du tore, fournit l'énergie d'un signal transmis à un électro-aimant dont la partie mobile est maintenue « collée » par un aimant permanent. Lorsque le seuil de fonctionnement est atteint l'électro-aimant annihile l'attraction de l'aimant permanent, la partie mobile tirée par un ressort ouvre alors le circuit magnétique et commande mécaniquement l'ouverture du disjoncteur.

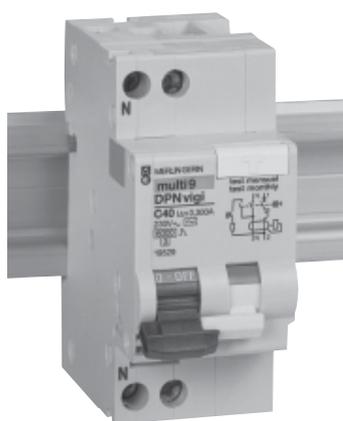


Fig. 12 : exemples de DDR « à propre courant » et « à source auxiliaire ».

- Les circuits terminaux sont généralement des circuits monophasés phase + neutre (on trouve parfois des circuits biphasés),
- Cette technologie permet de continuer d'assurer la protection, même en cas de coupure du neutre ou d'un conducteur de phase en amont du DDR,
- Les appareils fonctionnent même en cas de baisse de tension jusqu'à 0 V,
- Pour la protection complémentaire contre les contacts directs, le DDR haute sensibilité est reconnu efficace en cas de défaillance du PE (PE inexistant, non relié ou rompu). Cette technologie offre un avantage supplémentaire en cas d'élévation significative de la résistance de terre au-dessus de 500 Ω (installation vieillissante, période de sécheresse, corrosion au niveau de la prise de terre...) car certains DDR « à source auxiliaire » alimentés entre phase et PE ne fonctionnent pas correctement dans ce cas,
- Cette technologie est particulièrement robuste car aucun composant électronique n'est connecté en permanence sur le réseau. Il en résulte une excellente insensibilité aux surtensions et au vieillissement des composants. (Les composants électroniques quand il y en a, sont connectés au secondaire du capteur de courant homopolaire et ne sont donc sollicités qu'en cas de défaut et sous très basse tension),
- Cette robustesse s'avère bien adaptée aux installations non surveillées comme c'est généralement le cas en domestique.

Test de bon fonctionnement

Un DDR est un appareil de sécurité. Quelque soit la technologie utilisée, il est donc important qu'il dispose d'un dispositif de test. Si les dispositifs à propre courant apparaissent comme les plus sûrs, la mise en œuvre de la sécurité positive avec les autres sources d'énergie à « source auxiliaire » confère aux DDR une sécurité accrue qui ne doit cependant pas faire oublier la pratique du test périodique.

■ Pourquoi tester périodiquement des DDR ?

Dans les faits, la sécurité positive parfaite, notamment sur le plan du défaut interne n'existe pas. C'est pourquoi, en France, les DDR utilisant une source auxiliaire sont réservés aux installations industrielles et grand tertiaire et les DDR à propre courant aux installations domestiques et analogues, ce qui est bien en accord avec leurs possibilités intrinsèques évoquées ci-dessus.

Dans tous les cas, le test périodique est à préconiser pour mettre en évidence un éventuel défaut interne.

■ Principe

Il consiste à générer un courant qui ne va circuler que dans un seul des conducteurs actifs entourés par le tore, comme illustré sur la **figure 13**. La résistance est déterminée de manière à faire circuler un courant suffisant pour faire déclencher le DDR, en tenant compte d'éventuels courants de fuite qui pourraient se soustraire à ce courant. La valeur maximale admise est de 2,5 fois $I\Delta n$ (pour un appareil à seuil réglable, $I\Delta n$ est la plus petite valeur possible).

Ce principe de test est très répandu, car il permet de vérifier l'ensemble de la chaîne : tore – relais – appareil de coupure. Le principe de test évoqué ci-dessus est utilisé sur les prises de courant différentielles, les interrupteurs et disjoncteurs différentiels.

En ce qui concerne les relais différentiels à tore séparé le même principe est parfois retenu. Les relais Vigirex de la marque Merlin Gerin par exemple, ont la fonction test incorporée et, de plus, contrôlent en permanence la continuité du circuit de détection (liaison tore – relais et bobinage du tore).

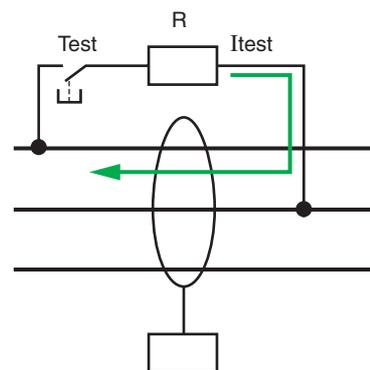


Fig. 13 : schéma de principe du circuit de test périodique.

4.5 Contraintes liées au capteur de courant

Le capteur est de type transformateur – tore. Il englobe la totalité des conducteurs actifs et de ce fait il est excité par le champ magnétique correspondant à la somme algébrique des courants circulant dans les phases et le neutre. L'induction dans le tore et le signal électrique disponible aux bornes de l'enroulement secondaire sont donc l'image du courant différentiel résiduel.

Ce type de capteur permet de détecter des courants différentiels de quelques milliampères à quelques dizaines d'ampères.

Câble avec PE

Suivant le principe même d'un DDR, le capteur ne doit englober que les conducteurs actifs. Le conducteur de protection PE doit donc être séparé des autres conducteurs, suivant les dispositions présentées sur la **figure 14**.

Conducteurs de forte section

Il existe des cadres sommateurs de grandes dimensions permettant de mesurer le courant différentiel, même avec des conducteurs de forte section. La sommation des courants à l'aide de plusieurs tores est à proscrire (cf. **fig. 15**).

Si la difficulté est présente dans un tableau général en aval du transformateur, on peut mettre en place un tore en tête d'installation, sur la liaison à la terre du neutre BT du transformateur (cf. **fig. 16**).

En effet, selon la loi des nœuds de Kirchhoff, le courant différentiel vu par (N) est strictement le même que celui vu par (G) pour un défaut se produisant dans la distribution BT.

Départs de forte intensité

Pour que la « réponse » du tore soit fidèle et linéaire, il faut placer les conducteurs actifs dans le tore le plus près possible de son centre pour que leurs actions magnétiques se compensent parfaitement en l'absence de courant résiduel.

En effet, le champ magnétique développé par un conducteur diminue proportionnellement à la distance ; ainsi sur la **figure 17** (ci-contre), la phase 3 provoque au point A une saturation magnétique locale et n'a donc plus une action proportionnelle. Il en est de même si le tore est placé à proximité ou dans un coude des câbles qu'il entoure (cf. **fig. 18** ci-contre). L'apparition d'une induction résiduelle parasite va, pour les intensités importantes, faire apparaître au secondaire du tore un signal qui peut entraîner un déclenchement indésirable.

Le risque est d'autant plus important que le seuil du DDR est faible par rapport au courant des phases, notamment lors d'un court-circuit. Dans les cas difficiles, ($I_{\text{phase max.}} / I_{\Delta n}$) élevé, deux solutions permettent de faire face au risque de

déclenchement indésirable :

- Utiliser un tore bien plus grand que nécessaire, par exemple d'un diamètre double de celui qui convient juste pour le passage des conducteurs,
- Placer un manchon dans le tore. Ce manchon doit être en matériau magnétique pour homogénéiser le champ magnétique (fer doux, tôle magnétique), (cf. **fig. 19**).

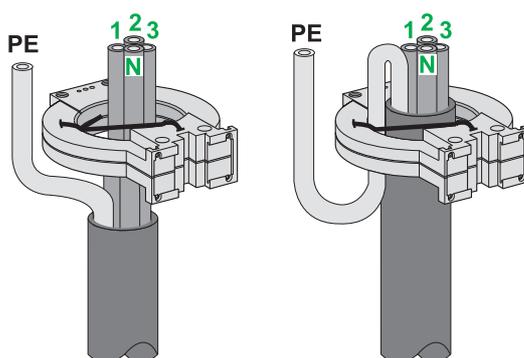


Fig. 14 : agencement et passage des câbles avec PE.

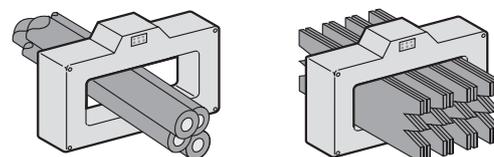


Fig. 15 : cadres sommateurs pour câbles ou barres de forte section.

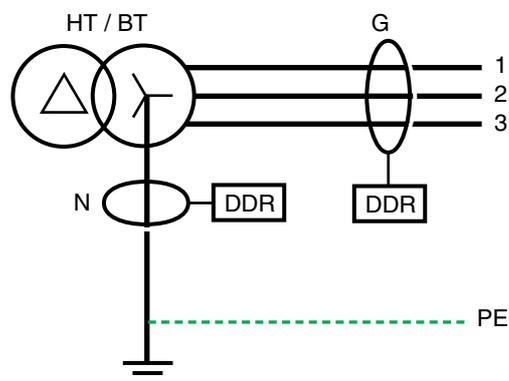


Fig. 16 : le tore N délivre la même information que le tore G.

Lorsque toutes ces précautions sont prises :

- centrage des conducteurs,
- tore de grande dimension,
- et manchon magnétique,

le rapport ($I_{\text{phase max.}} / I\Delta n$) peut atteindre 50 000.

Il faut souligner que les DDR à tore incorporé apportent une solution toute faite aux installateurs et exploitants puisque c'est le constructeur qui étudie et met au point les réponses techniques, car :

- Il maîtrise le problème du centrage des conducteurs actifs, et pour les faibles intensités peut prévoir et bien répartir plusieurs spires primaires autour du tore,
- Il peut faire « travailler » le tore à induction plus élevée pour maximiser l'énergie captée et minimiser la sensibilité aux inductions parasites due aux forts courants.

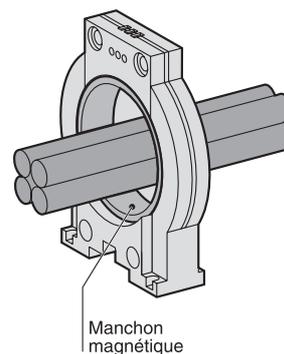


Fig. 19 : un manchon en matériau magnétique placé autour des conducteurs, dans le tore, réduit le risque de déclenchements dus aux effets magnétiques des pointes de courant.

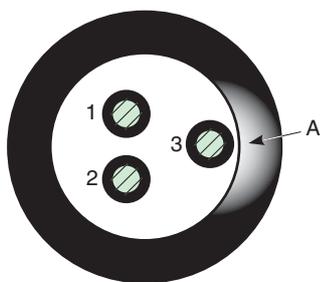


Fig. 17 : un mauvais centrage des conducteurs dans le tore est à l'origine de sa saturation magnétique locale au point A qui peut être la cause de déclenchements indésirables.

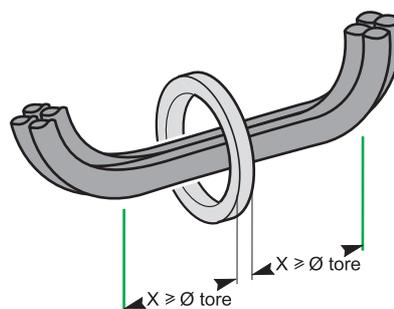


Fig. 18 : le tore doit être suffisamment éloigné des coudes des câbles pour éviter les déclenchements indésirables.

4.6 Applications particulières

Sélectivité

Le but de la sélectivité et de la coordination des protections est de faire en sorte que seul le départ concerné par un défaut soit mis hors tension par le fonctionnement de sa protection.

■ Sélectivité « verticale »

Ce type de sélectivité est celui qui concerne le fonctionnement de deux protections placées en série sur un circuit (cf. **fig. 20**). Compte tenu des tolérances sur les seuils et les temps de déclenchement des DDR, la sélectivité doit être ampèremétrique et chronométrique :

- Ampèremétrique, car selon les normes, un DDR doit fonctionner pour un courant de défaut compris entre $I\Delta n / 2$ et $I\Delta n$. En pratique, un rapport 3 est requis entre les seuils de deux DDR pour éviter un déclenchement simultané des 2 appareils : $I\Delta n$ (amont) > 3 $I\Delta n$ (aval),

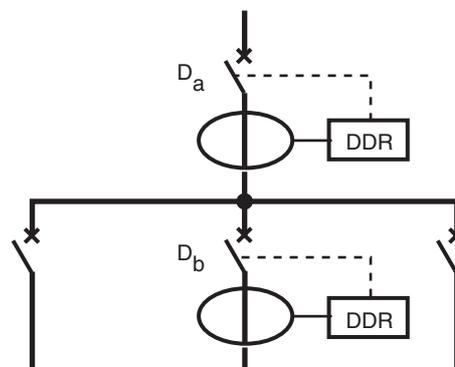


Fig. 20 : sélectivité verticale.

□ Chronométrique, dans le cas où le courant de défaut franchit brusquement les deux seuils de déclenchement. En effet, il faut tenir compte du temps de réaction, même minime, de tout mécanisme, auquel il faut parfois ajouter une temporisation ou un retard volontaire.

La double condition de non déclenchement de D_a pour un défaut en aval de D_b est donc :

$$I\Delta n(D_a) > 3 I\Delta n(D_b) \text{ et } tr(D_a) > tr(D_b) + tc(D_b) \\ \text{ou } tr(D_a) > tf(D_b)$$

avec :

- tr = retard au déclenchement = temps de non fonctionnement,
- tc = temps séparant l'instant où l'ordre de coupure a été donné par le relais de mesure de celui de la coupure (temps d'arc compris),
- tf = temps de fonctionnement, de la détection du défaut à l'interruption totale du courant de défaut ; $tf = tr + tc$.

Les relais électroniques peuvent présenter un phénomène de « mémorisation » du défaut par leur circuit détecteur de seuil. Il faut alors tenir compte d'un « temps de mémoire », assimilable

à un allongement virtuel du temps de passage du courant, pour qu'ils ne déclenchent pas, même après l'ouverture de l'appareil aval.

Nota :

Une attention particulière doit être apportée dans la mise en œuvre de la sélectivité lorsqu'il faut panacher des disjoncteurs différentiels et des relais différentiels (cf. **fig. 22** ci contre). En effet :

- le disjoncteur différentiel est défini en temps de retard - tr -,
- le relais différentiel est défini en temps de fonctionnement propre ou temporisé (correspondant au temps qui s'écoule entre l'apparition du défaut et la transmission de l'ordre d'ouverture à l'organe de coupure), auquel il faut ajouter le temps de réaction de l'organe de coupure. Il faut alors calculer les temps tf et tr successifs (à $2 I\Delta n$, niveau de courant conventionnel pour le test de non- fonctionnement des DDR temporisés), pour chaque DDR, en remontant de la distribution terminale vers l'origine de l'installation.

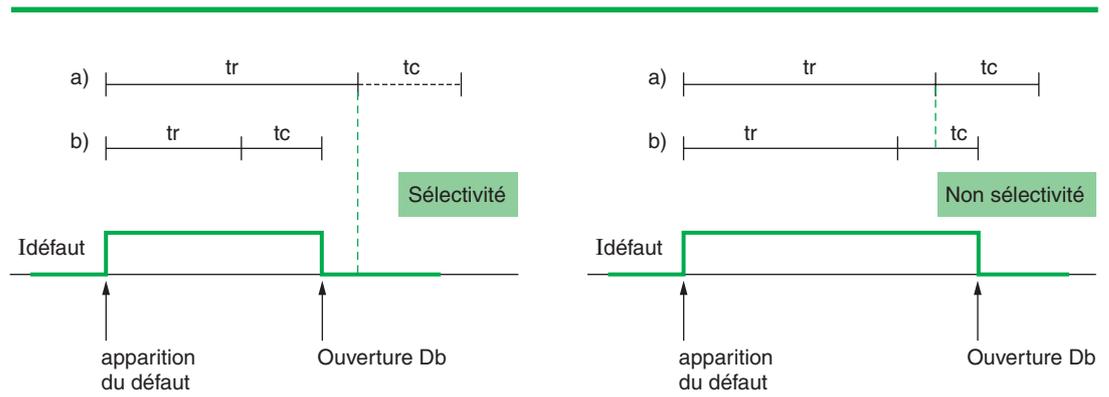


Fig. 21 : la temporisation d'un DDR (a) amont doit tenir compte du temps de retard et du temps de coupure du DDR (b) aval.

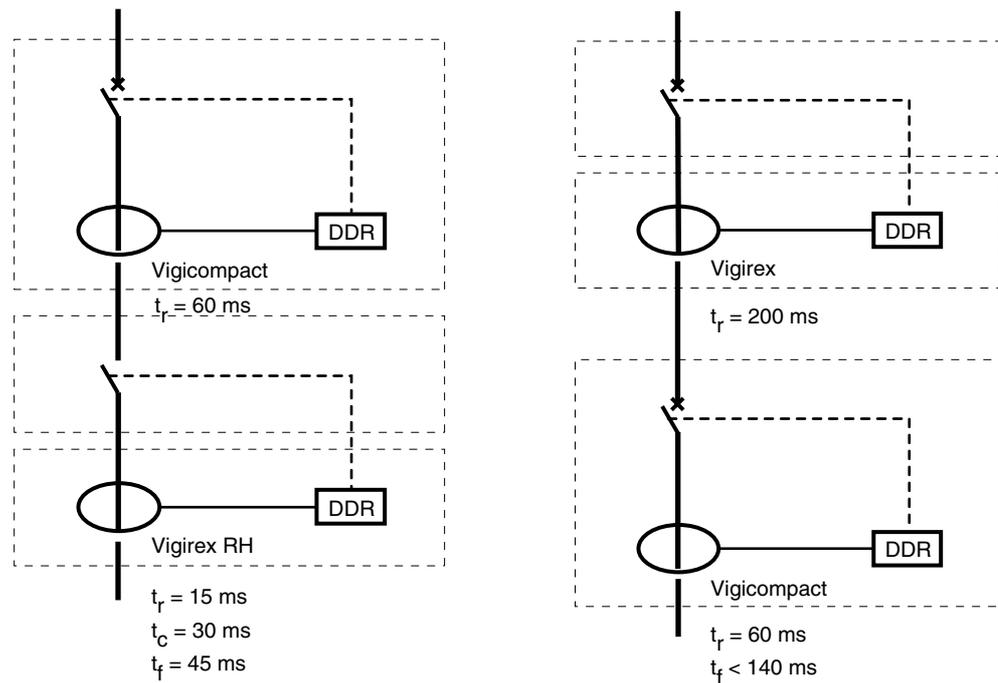


Fig. 22 : deux exemples de sélectivité chronométrique, associant un disjoncteur différentiel de type Vigicomact et un relais Vigirex (Merlin Gerin). A noter que ces temps sont bien inférieurs aux temps de déclenchement autorisés de la figure 9.

■ Sélectivité « horizontale »

Parfois appelée « sélection des circuits », prévue par la norme NF C 15-100 § 535.4.2, elle permet l'économie en tête d'installation d'un dispositif différentiel placé dans une armoire lorsque tous les départs de cette armoire sont protégés par des disjoncteurs différentiels. Seul le départ en défaut est mis hors tension, les dispositifs différentiels placés sur les autres départs (parallèles au départ défectueux) ne voient pas le courant de défaut (cf. **fig. 23**). Les dispositifs différentiels peuvent être alors à tr identiques.

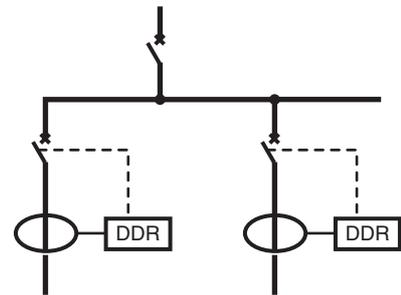


Fig. 23 : exemple d'une sélectivité horizontale.

Dans la pratique, la sélectivité horizontale peut être prise en défaut. Ainsi il a été observé des déclenchements indésirables appelés « déclenchements par sympathie » notamment en schéma IT, sur des réseaux comportant des départs de grande longueur (capacités parasites des câbles) ou des filtres capacitifs (ordinateur, dispositifs électroniques...). Le déclenchement peut survenir sur un départ sain, comme illustré sur la **figure 24**.

Parafoudres

Selon les obligations locales des Distributeurs d'énergie, les DDR sont raccordés en amont ou en aval des parafoudres. Si le DDR est placé en amont du parafoudre, il se trouve sur le chemin d'écoulement du courant généré par la foudre et il y a risque de déclenchement.

Un DDR à immunité renforcée ou temporisé est recommandé. Si le DDR est placé en aval du parafoudre, l'utilisation d'un DDR standard est possible.

Courants de fuite perturbateurs

Il existe plusieurs sortes de courants de fuite, susceptibles de perturber le fonctionnement des DDR :

- Courants de fuite à la fréquence du réseau,
- Courants de fuite transitoires,
- Courants de fuite Haute Fréquence.

Ces courants peuvent être « naturels », circulant à travers les capacités réparties des câbles dans l'installation, ou « intentionnels », circulant à travers de composants disposés intentionnellement : filtres capacitifs installés sur

les circuits d'alimentation des appareils électroniques (ordinateurs, variateurs de vitesse...).

Les filtres ont pour objet de rendre les appareils conformes aux normes d'émission et d'immunité, rendues obligatoires par les directives européennes sur la CEM.

■ Courants de fuite à la fréquence du réseau (50 ou 60 Hz) (cf. **fig. 25**)

Ces courants sont générés par la source d'alimentation et circulent à travers les capacités naturelles ou intentionnelles.

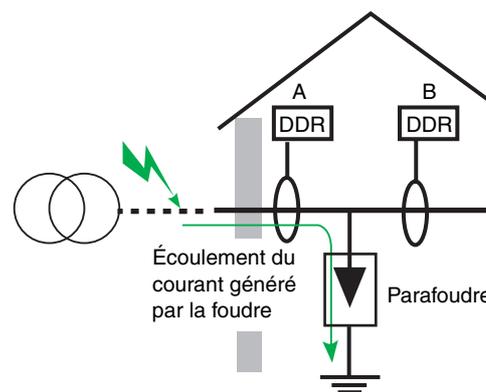


Fig. 25 : dans une installation comportant un parafoudre, selon les obligations locales, le DDR peut être placé différemment : en A un DDR immunisé ou de type « S », en B un DDR standard.

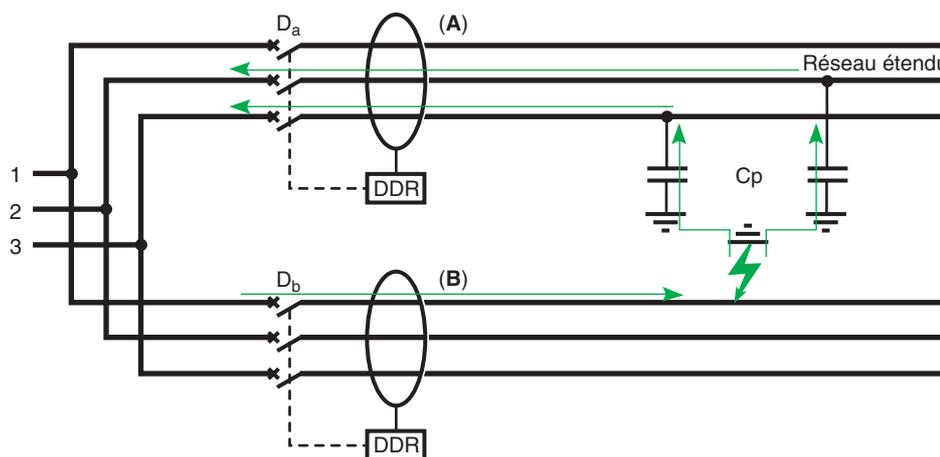


Fig. 24 : en présence d'un défaut en schéma IT, D_a peut ouvrir à la place de D_b .

Pour un appareil monophasé, on mesure des courants de fuite permanents à 50 Hz de l'ordre de 0,5 à 1,5 mA. Les courants de fuite s'additionnent si les appareils sont branchés sur une même phase. Si les appareils sont branchés sur les trois phases, ces courants se compensent lorsqu'ils sont équilibrés (la somme algébrique est nulle).

Du fait de ces courants de fuite, le nombre d'appareils pouvant être raccordés en aval d'un DDR doit donc être limité.

On trouvera en annexe 3 une comparaison des courants de fuite suivant le SLT (TT/TN ou IT), qui justifie que le nombre possible d'appareils soit plus faible en IT qu'en TT ou TN.

Le seuil de fonctionnement d'un DDR pouvant être égal à $0,5 I\Delta n$, il est recommandé, pour ne pas craindre de déclenchements indésirables, de limiter le courant de fuite permanent à $0,3 I\Delta n$ en schéma TT ou TN, et à $0,17 I\Delta n$ en schéma IT.

L'utilisation de DDR avec un seuil de fonctionnement dans une plage réduite ($0,7 I\Delta n$ à $I\Delta n$) permet d'assouplir cette règle.

Les DDR « si » ou Vigirex de la marque Merlin Gerin sont dans ce cas.

■ Courants de fuite transitoires

Ces courants se manifestent à la mise sous tension d'un circuit ayant un déséquilibre capacitif ou lors d'une surtension de mode commun (cf. **fig. 26**).

A titre indicatif, une mesure effectuée à la mise sous tension d'une station de travail comportant un filtre antiparasite a révélé un courant de fuite transitoire dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Amplitude de la première crête : 40 A,
- Fréquence d'oscillation : 11,5 kHz,
- Durée d'amortissement (66 %) : 5 périodes.

Les DDR ayant un certain temps de non-fonctionnement évitent les déclenchements indésirables qui pourraient être causés par ce type d'onde.

Par exemple : DDR de type « si » ($I\Delta n = 30$ mA et 300 mA), Vigirex ainsi que les DDR type S ($I\Delta n \geq 300$ mA).

■ Courants de fuite Haute Fréquence

Les courants de fuite Haute Fréquence (de quelques kHz à quelques MHz) ont pour origine la technique de découpage utilisée dans les variateurs de vitesse ou les ballasts électroniques pour éclairage fluorescent.

Certains conducteurs sont soumis à de forts gradients de tension (de l'ordre de $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$),

ce qui génère des pointes de courant importantes à travers les capacités parasites des circuits.

Des courants de fuite de quelques dizaines ou centaines de mA peuvent circuler en mode commun et traverser le capteur de courant du DDR, comme illustré sur la **figure 27**, dans le cas d'un variateur de vitesse.

Contrairement aux courants de fuite à 50 Hz - 60 Hz dont la somme algébrique est nulle, ces courants HF ne sont pas synchrones sur les trois phases et leur somme constitue un courant de fuite non négligeable.

Pour éviter les déclenchements indésirables, les DDR doivent être insensibilisés à ces courants HF (équipés de filtre passe-bas). C'est le cas des DDR industriels de la gamme Vigirex et des DDR de type « S », « A si » et « B » de la marque Merlin Gerin.

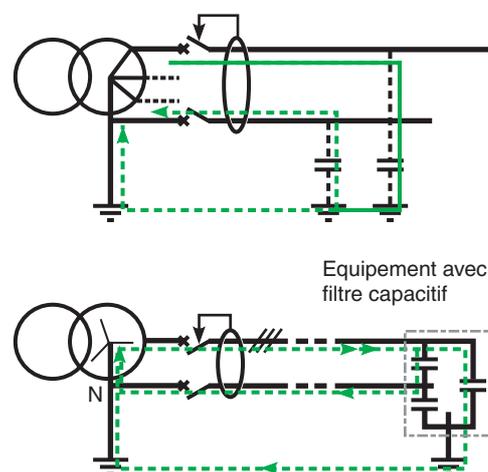


Fig. 26 : courant de fuite parcourant les capacités réparties des câbles ou les condensateurs d'entrée des équipements (en pointillés).

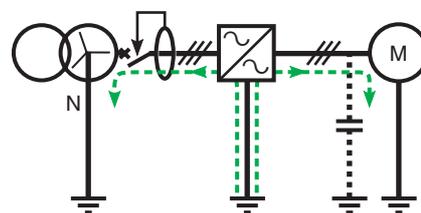


Fig. 27 : perturbation d'un DDR par les courants de fuite Haute Fréquence.

Variateurs de vitesse

L'association des protections différentielles et des variateurs de vitesse de type « convertisseur de fréquence » requiert beaucoup d'attention pour tenir compte simultanément de plusieurs contraintes :

- courant de fuite à la mise sous tension,
- courant de fuite permanent à 50/60 Hz,
- courant de fuite permanent HF,
- forme particulière du courant en cas de défaut en sortie de variateur,
- courant à composante continue en cas de défaut sur le bus DC.

L'analyse des phénomènes et les solutions à ces contraintes sont présentées en détail dans le Cahier Technique n° 204 : Protections BT et variateurs de vitesse.

Voir également l'annexe 2 : Types de convertisseurs et allure des courants de défaut.

Onduleurs

Dans les installations comportant des sources de remplacement comme des onduleurs, la mise en œuvre des protections doit tenir compte des différentes configurations possibles.

En particulier : fonctionnement avec réseau ou sur batteries, interrupteur de transfert (by-pass) enclenché ou non, ...

Dans l'exemple de la **figure 29**, l'installation en schéma TT comporte une Alimentation Sans Interruption. En cas d'absence de tension réseau, une mise à la terre du neutre en aval de l'ASI est nécessaire pour le bon fonctionnement des DDR (fermeture du contacteur K).

Toutefois, cette mise à la terre ne serait pas indispensable pour la protection des personnes car :

- L'installation est alors en schéma IT et le premier défaut n'est pas dangereux,
- La probabilité d'avoir un deuxième défaut d'isolement pendant la durée de fonctionnement limitée par l'autonomie des batteries de l'ASI est très réduite.



Version modulaire



Version tableau

Fig. 28 : DDR intégrant un filtrage des courants HF (Vigirex RH99M et RH99P - marque Merlin Gerin).

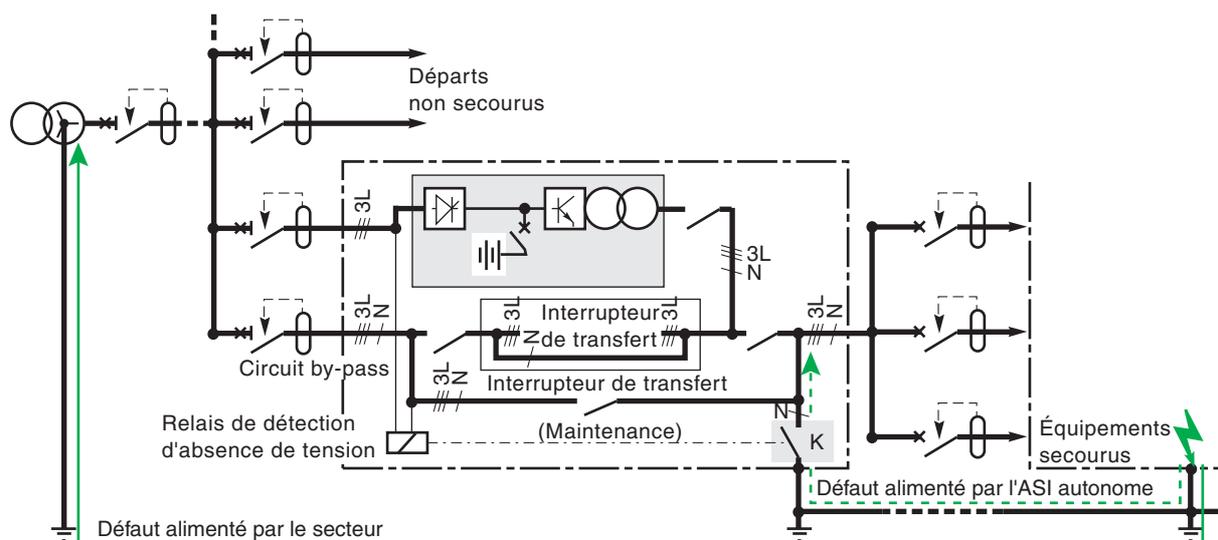


Fig. 29 : dès la détection de l'absence du réseau sur l'alimentation de l'ASI, le contacteur K reconstitue le schéma TT en aval de l'ASI.

5 Conclusion

A l'heure où l'électricité, en tant que source d'énergie, prend une part de plus en plus dominante, ceci dans le logement, le tertiaire et l'industrie, il était utile de rappeler le risque électrique, de le quantifier et de parfaire la connaissance des Dispositifs Différentiels Résiduels.

Ceux-ci ont, comme tous les matériels, leurs forces et leurs limites. Encore perfectibles, ces dispositifs jouent un rôle de plus en plus important dans la protection des personnes et des biens.

Tous les pays industrialisés utilisent massivement les DDR, et ceci avec des SLT différents, dans l'industrie comme dans le logement.

Globalement, voici ce qu'il y a lieu de retenir des normes et des pratiques d'installation.

■ Pour la protection des personnes contre les risques de contact direct, un DDR est non seulement très utile mais souvent une mesure complémentaire imposée par les normes, quel que soit le SLT. C'est la protection ultime des personnes.

■ Pour la protection des personnes contre les risques de contact indirect, un DDR est :

- obligatoire en schéma TT,
- nécessaire en schéma IT s'il y a plusieurs prises de terre,
- à prévoir dans le cas de départs de grande longueur en schéma TN et IT.

■ Les DDR participent aussi à la protection contre :

- les risques d'incendie d'origine électrique; ils constituent la seule mesure efficace pour limiter le risque incendie ayant pour origine les courants de cheminement quel que soit le schéma des liaisons à la terre,
- les destructions de machines en schéma TN.

Les DDR actuels continuent à progresser en termes de fiabilité et d'immunité aux phénomènes parasites qui ne correspondent pas à un défaut d'isolement.

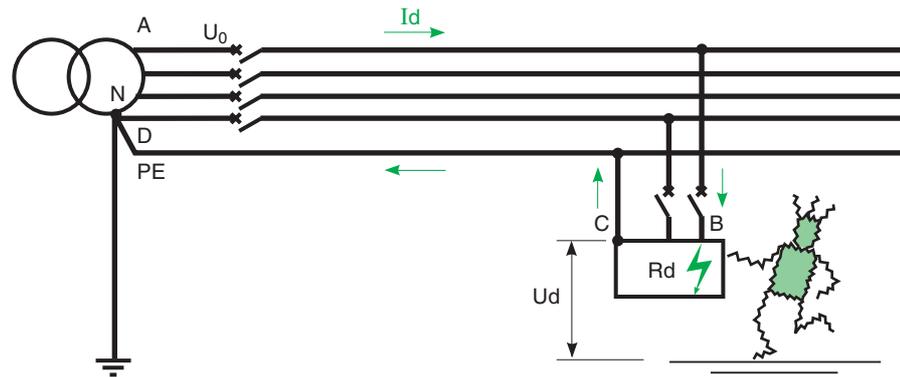
Ce document, en faisant mieux connaître les protections différentielles, doit contribuer à la sécurité de tous.

Annexe 1 : calcul des tensions de contact en cas de défaut

On résume ici le calcul des tensions de contact en cas de défaut d'isolement, suivant le type de SLT. Pour informations complémentaires, se

reporter au CT n°172 : Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes de neutre).

Schéma TN



$$U_d = \frac{0,8 U_o}{2} \text{ si } R_{PE} = R_{ph} \text{ et } R_d = 0$$

$$I_d = \frac{U_o}{R_{AB} + R_d + R_{CD}} \Rightarrow \frac{0,8 U_o}{R_{ph} + R_{PE}}$$

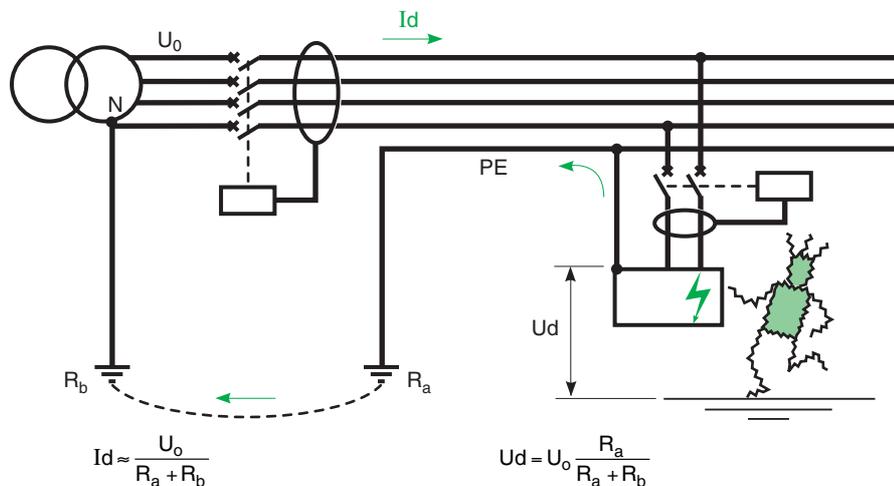
Pour une alimentation 230/400 V, la tension de contact U_d vaut donc 92 V. Cette tension (supérieure à la tension limite conventionnelle de contact U_L) présente un danger, ce qui impose l'ouverture du circuit.

En général, compte tenu de la valeur du courant de défaut I_d , cette ouverture peut être commandée par les dispositifs de détection de surintensité.

Lorsque les valeurs de résistance R_{ph} et R_{PE} sont élevées ou inconnues, la protection doit être assurée par un DDR.

Fig. 30 : tension de contact en cas de défaut d'isolement en schéma TN.

Schéma TT

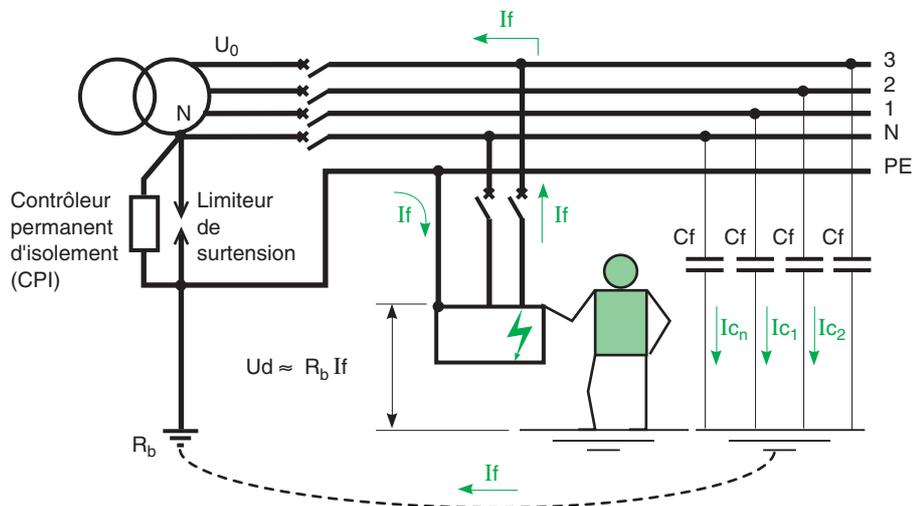


Pour une alimentation 230/400 V, la tension de contact est de l'ordre de 115 V (si $R_a=R_b$). Cette tension (supérieure à la tension limite conventionnelle de contact U_L) présente un danger, ce qui impose l'ouverture du circuit.

Pour des résistances de terre de l'ordre de 10Ω , le courant de défaut est voisin de 11 A. L'ouverture du circuit ne peut en général pas être commandée par les dispositifs de détection de surintensité. L'utilisation d'un DDR est donc obligatoire.

Fig. 31 : tension de contact en cas de défaut d'isolement en schéma TT.

Schéma IT



Même avec des capacités de fuite élevées de l'ordre de $1 \mu\text{F}$, le courant de fuite I_f au premier défaut est inférieur à 0,1 A. Il en résulte une tension de contact non dangereuse, de l'ordre du volt. La déconnexion n'est donc pas nécessaire au premier défaut.

Au deuxième défaut, on est ramené au cas TN.

Fig. 32 : tension de contact en cas de défaut d'isolement en schéma IT.

Annexe 2 : types de convertisseurs et allure des courants de défaut

La norme EN50178 (Équipement électronique utilisé dans les installations de puissance) précise les types de DDR à utiliser en

association avec différents montages à semi-conducteurs. Elle fournit également l'allure des courants de défaut correspondants.

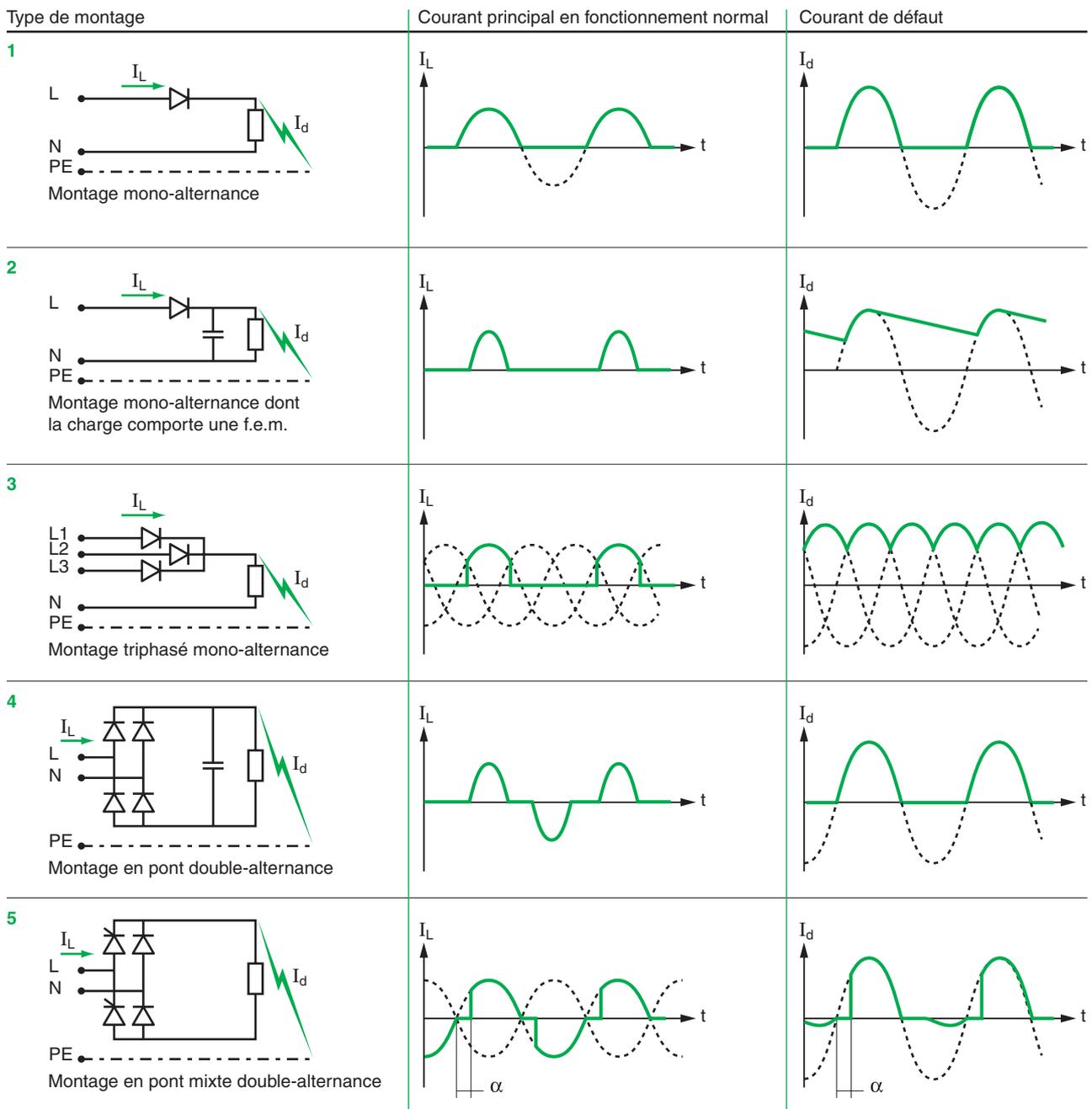


Fig. 33 : courant de défaut correspondant aux différents montages à semi-conducteurs (suite p. 27).

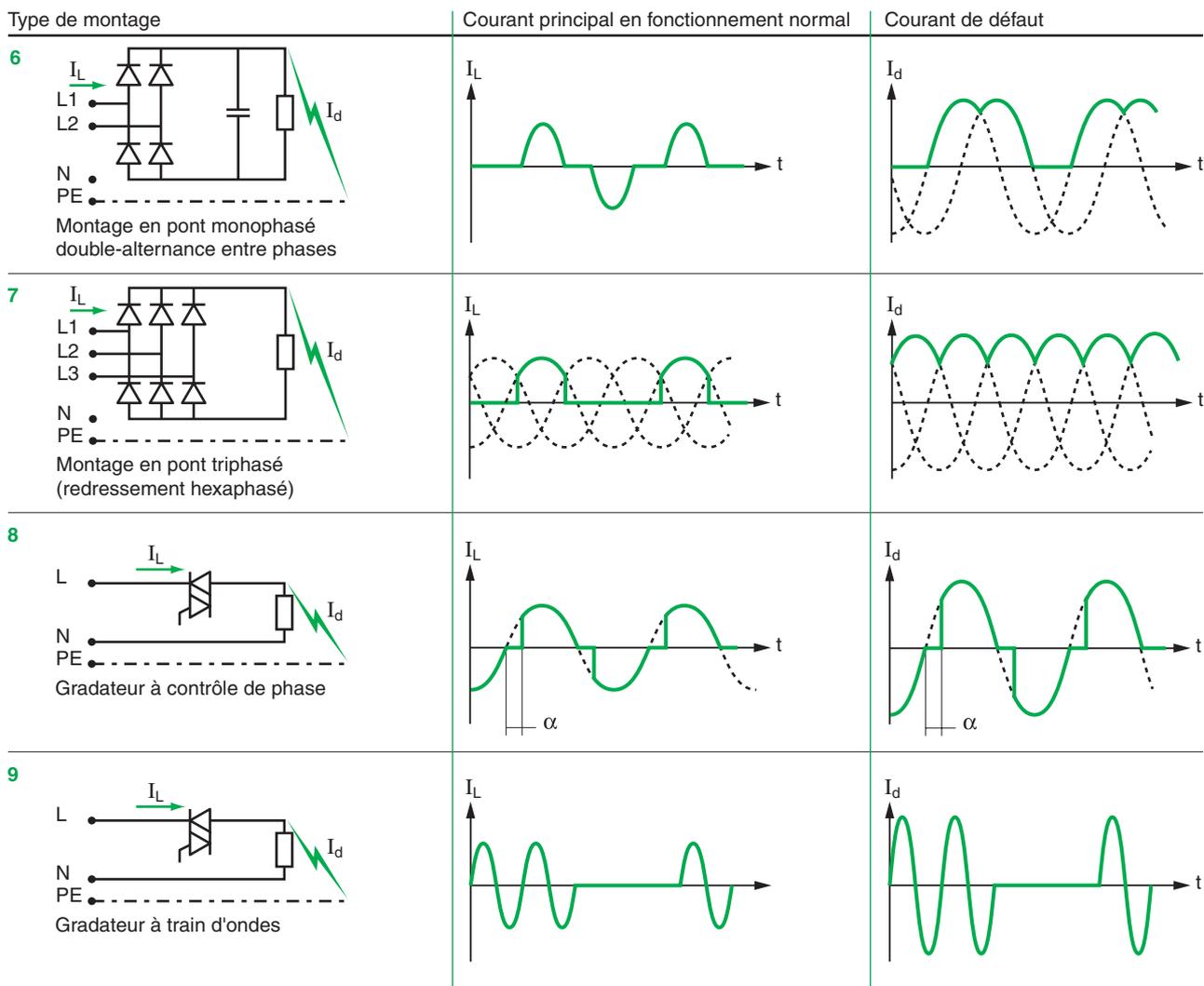


Fig. 33 (suite de la page 26) : courant de défaut correspondant aux différents montages à semi-conducteurs.

Les circuits de type 8 et 9 doivent être protégés par des DDR de type AC, A ou B.

Les circuits de type 1, 4 et 5 doivent être protégés par des DDR de type A ou B.

Les circuits de type 2, 3, 6 et 7 doivent être protégés par des DDR de type B.

Exemples de charges nécessitant le type A ou B :

■ Equipements avec redresseurs monophasés à diodes (circuit de type 4) :

□ Equipements avec variateurs de vitesse monophasés (type convertisseurs de fréquence)

Exemples : pompes, ventilateurs, climatiseurs, équipements de levage / manutention, ascenseurs, machines d'emballage, machines spéciales (textile, usinage, ...)

Puissance nominale : 0,37 à 2,2 kW en 230 V/50 Hz (pour les puissances supérieures : l'alimentation est en général triphasée)

Un défaut d'isolement est possible dans le cas d'utilisation d'une résistance de freinage raccordée au circuit à tension continue (bus DC). Un défaut d'isolement interne est très peu probable.

□ Alimentations pour circuits à courant continu
Exemples : équipements de soudure, chargeurs de batteries, alimentations de systèmes électroniques (automates, régulateurs, centraux téléphoniques, ...), enroulement d'excitation de moteurs à courant continu, bobine d'électro-aimant.

Puissance maximale : 3 kW (pour les puissances supérieures, l'alimentation est en général triphasée).

Remarque : La plupart du temps, les équipements intègrent un transformateur d'isolement en amont du redresseur. Un défaut d'isolement entre le circuit à tension continue et la terre ne provoque alors aucun courant de défaut. Cette disposition permet en particulier de fonctionner avec une polarité d'une batterie reliée à la terre par exemple.

□ Alimentation à découpage

Exemples : équipement informatique, Hifi, vidéo, ...

■ Equipements avec redresseur monophasé à thyristors (circuit de type 5)

□ Variateurs de vitesse pour moteur à courant continu

Cette technologie est largement supplantée par les convertisseurs de fréquence, mais toujours présente.

Puissance nominale : < 10 kW

□ Chargeurs de batteries

Ce type de redresseur est utilisé pour certains chargeurs de batteries, mais en général, un transformateur d'isolement est placé en amont du redresseur. Il n'y a donc pas de courant différentiel en cas de défaut en aval du redresseur.

Autres types d'équipements avec courants de défaut non sinusoïdaux :

■ Convertisseur de fréquence avec alimentation monophasée

L'étage d'entrée est un circuit de type 4. Pour un défaut sur le circuit à tension continue, un DDR type A convient.

Lors d'un défaut en sortie de variateur, l'allure du courant est représentée sur la **figure 34**.

Cette forme d'onde n'est pas décrite par les normes en vigueur. Des travaux ont été initiés à la CEI afin de couvrir également ces cas particuliers. Même si ce courant ne correspond pas à l'allure donnée dans la définition des DDR de type A, les DDR de type A de la marque Merlin Gerin permettent d'assurer la protection.

■ Convertisseur de fréquence avec alimentation triphasée

L'étage d'entrée est un circuit de type 7, et nécessite l'utilisation d'un DDR de type B.

Lors d'un défaut en sortie de variateur, l'allure du courant est représentée sur la **figure 35**.

Un DDR de type B assure parfaitement la protection.

En l'absence de risque de défaut sur le bus DC, un DDR de type A pourrait convenir, même si ce courant ne correspond pas à l'allure donnée dans la définition des DDR de type A.

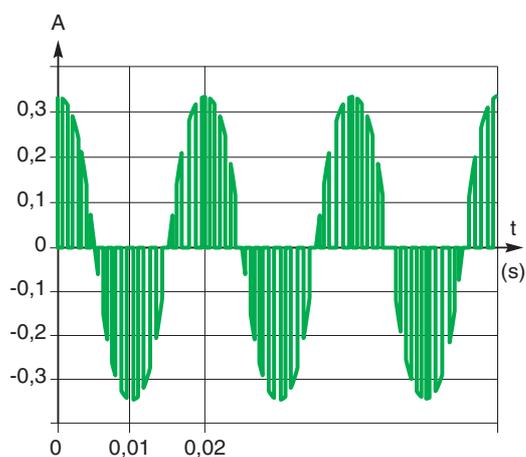


Fig. 34 : courant de défaut en sortie de convertisseur de fréquence monophasé.

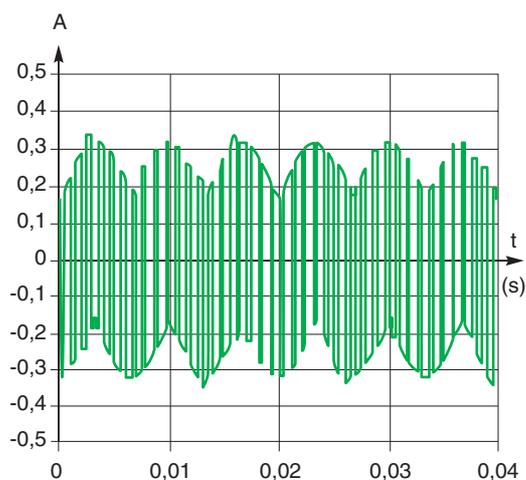


Fig. 35 : courant de défaut en sortie de convertisseur de fréquence triphasé.

Annexe 3 : courants de fuite pour différents SLT

Différence de courant homopolaire entre schémas TT/TN et IT

Considérons le schéma simplifié d'un appareil alimenté entre phase et neutre, en schéma TN. Les capacités C sont raccordées entre les conducteurs actifs et la terre pour assurer l'immunité de l'appareil aux perturbations du réseau.

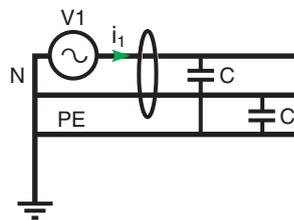


Fig. 36 : appareil raccordé en schéma TN.

Le courant mesuré par le DDR est égal à :

$$i_1 = V_1.C.\omega$$

Dans le cas d'un schéma IT, en supposant un premier défaut sur la phase 2, le schéma simplifié est le suivant :

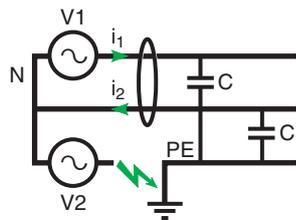


Fig. 37 : appareil raccordé en schéma IT.

Le courant mesuré par le DDR est égal à :

$$i_T = i_1 - i_2$$

$$\text{avec } i_1 = (V_1 - V_2).C.\omega$$

$$i_2 = V_2.C.\omega$$

Par ailleurs, nous avons :

$$V_1 = V.\sin \omega t$$

$$V_2 = V.\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

Calculons i_T :

$$i_T = i_1 - i_2 = (V_1 - 2V_2).C.\omega$$

$$i_T = V.C.\omega \left[\sin \omega t - 2 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$i_T = V.C.\omega \left[\sin \omega t - 2 \left(\sin \omega t \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - \sin \frac{2\pi}{3} \cdot \cos \omega t \right) \right]$$

$$i_T = V.C.\omega \cdot 2 \left(\sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega t \right)$$

Cette expression s'écrit aussi :

$$i_T = V.C.\omega \cdot 2.a.(\cos \alpha \cdot \sin \omega t + \sin \alpha \cdot \cos \omega t)$$

$$i_T = V.C.\omega \cdot 2.a.\sin(\omega t + \alpha)$$

avec par identification :

$$a.\cos \alpha = 1$$

$$a.\sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{d'où : } a^2(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = 1 + \frac{3}{4}$$

$$\text{On obtient : } a = \frac{\sqrt{7}}{2}$$

$$i_T = V.C.\omega \cdot \sqrt{7} \sin(\omega t + \alpha)$$

En module, le courant de fuite est $\sqrt{7} \approx 2,6$ fois plus élevé au premier défaut en IT qu'en TN.

Il y a donc un risque de déclenchement indésirable au premier défaut en IT, ce qui conduit à réduire le nombre d'appareils raccordés par DDR par rapport au nombre autorisé en TN. (Voir tableau récapitulatif ci-dessous).

Limitation du nombre d'appareils raccordés par DDR :

Alimentations de postes informatiques :

Nb. max de charges par DDR 30mA si	TT	TN-S	IT
Poste bureautique *	6	4	2
Station de travail **	3	2	1

* : comprend une unité centrale, un écran et une imprimante laser.

** : comprend une unité centrale avec extensions, un écran de grandes dimensions, et une imprimante laser.

Pour des configurations réduites, le nombre de postes peut être augmenté.

Alimentation de lampes à ballasts électroniques :

Nb. max de ballasts par DDR si	TT	TN-S	IT
300 mA	300	220	100
30 mA	30	22	10

Annexe 4 : seuil des DDR en fonction de la tension réseau

Aux USA, certains circuits de prises de courant, sur lesquels le PE n'est pas distribué, sont protégés par un GFCI : « Ground fault circuit interrupter », qui est un dispositif différentiel. Ceci est imposé par l'article 210-8 du NEC, 680-10, 511-10. Si la protection différentielle est utilisée, elle est intégrée dans les prises, la sensibilité retenue est de 5 mA.

La (ou les) raison(s) du choix de cette sensibilité de 5 mA (± 1 mA) n'est pas décrite de manière explicite dans un document, néanmoins plusieurs facteurs convergents expliquent ce choix.

Il faut tout d'abord remarquer que la distribution basse tension sous 120 V en schéma TN-S limite sensiblement les risques. En effet en cas de défaut d'isolement franc dans un appareil, si la résistance des conducteurs de phase (section, longueur) est équivalente à la résistance des conducteurs de retour (PE ou conduit métallique), la tension de contact sur la masse des appareils défectueux sera égale à environ la moitié de la tension phase soit 60 V.

Cette tension de 60 V est proche de la tension de 50 V reconnue comme non dangereuse (tension limite conventionnelle de contact). En conséquence le normalisateur aux USA a considéré qu'en raison des caractéristiques de la distribution BT en Amérique du Nord, la protection complémentaire contre les contacts directs n'est pas aussi nécessaire que sur les réseaux triphasés 230/400 V pour lesquels la tension de contact sur la masse d'un appareil en défaut est double. Ceci explique pourquoi, aux USA, la protection contre les contacts directs ne s'est pas imposée au niveau des tableaux mais

au niveau des prises de certains circuits seulement.

En cas de contact direct avec un conducteur, par exemple dans le cas d'une rallonge endommagée, la tension de contact aux USA est de 120 V. L'impédance du corps humain à 120 V est plus élevée qu'à 230 V et se situe aux environs de 2200 Ω (valeur médiane). Le courant qui s'écoulerait dans le corps de la personne serait en conséquence aux environs de $120 \text{ V} / 2200 \Omega = 54,5 \text{ mA}$.

Un DDR de sensibilité 30 mA déclencherait en 300 ms pour un courant de 54,5 mA ($< 2 I_{\Delta n}$) selon les tables de déclenchement des normes CEI. Ce temps est relativement long et la personne serait fortement « secouée » par un courant qui circulerait aussi longtemps dans son corps.

Pour un réseau 120 V entre phase et neutre, le choix d'un DDR 5 mA semble donc plus approprié car le temps de déclenchement pour le même courant de 54,5 mA ($> 5 I_{\Delta n}$) est de 40 ms seulement. Le déclenchement est alors aussi rapide que pour un DDR 30 mA utilisé sur un réseau 230 V.

La sensibilité de 5 mA utilisée aux USA pour la protection contre les contacts directs au niveau des prises de courant semble donc appropriée pour le réseau TN-S biphasé 240 V entre phases utilisé aux USA.

Pour un réseau triphasé 230 V entre phase et neutre, la sensibilité 30 mA est plus adaptée pour assurer la protection contre les contacts directs au niveau des tableaux électriques ou éventuellement des prises de courant.

Annexe 5 : Bibliographie

Documents de référence :

- CEI 60364 : « Installations électriques des bâtiments ».
- CEI 60479-1 : « Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1 : Aspects généraux ».
- CEI 60479-2 : « Effets du courant passant par le corps humain – Partie 2 : Aspects particuliers ».
- CEI 60755 : « Règles générales pour les dispositifs de protection à courant différentiel résiduel ».
- CEI 60947-2 : « Appareillage à basse tension – Partie 2 : Disjoncteurs ».
- CEI 61008 : « Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel pour usages domestiques et analogues sans dispositif de protection contre les surintensités incorporé (ID) ».
- CEI 61009 : « Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel avec protection contre les surintensités incorporée pour installations domestiques et analogues (DD) ».
- CEI 61200-413 : « Guide pour les installations électriques – Partie 413 : Protection contre les contacts indirects – Coupure automatique de l'alimentation ».
- EN 50178 : Équipement électronique utilisé dans les installations de puissance.

Cahiers Techniques Schneider-Electric

- Protection des personnes et alimentations statiques sans coupure.
Cahier Technique n° 129 - J-N. FIORINA

- Evolution des disjoncteurs BT avec la norme IEC 60947-2.

Cahier Technique n° 150 - E. BLANC

- Les schémas de liaisons à la terre en BT (régimes de neutre).

Cahier Technique n° 172

B. LACROIX et R. CALVAS

- Les schémas de liaisons à la terre dans le monde et leurs évolutions.

Cahier Technique n° 173

B. LACROIX et R. CALVAS

- Perturbations des systèmes électroniques et schémas de liaisons à la terre.

Cahier Technique n°177 - R. CALVAS

- Le schéma IT (à neutre isolé) des liaisons à la terre en BT.

Cahier Technique n°178

F. JULLIEN et I. HERITIER

- Coexistence courants forts - courants faibles.

Cahier Technique n° 187

R. CALVAS et J. DELABALLE

- Protection BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence).

Cahier Technique n° 204

J. SCHONEK et Y. NEBON

Autres publications

- Guide de l'installation électrique.
Schneider-Electric CITEF

Schneider Electric

Service prescription
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 65 28
E-mail : fr-tech-com@schneider-electric.com

Edition : Schneider Electric
Réalisation : Axess

xxxxx

* *Construire le nouveau monde de l'électricité*

02-06