



Collection technique

# Cahier technique n° 204

Protections BT et variateurs  
de vitesse (convertisseurs  
de fréquence)



J. Schonek  
Y. Nebon

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 : **Le rendez-vous des experts**

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 après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

# n° 204

## Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence)

---

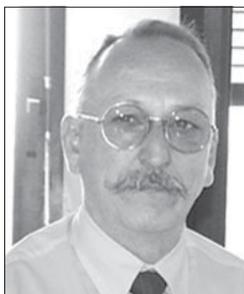


Jacques SCHONEK

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 actuellement responsable Applications et Réseaux Electrotechniques au sein du Bureau des Etudes Anticipation de la Direction Distribution Electrique de Schneider Electric.

---



Yves NEBON

Entré dans l'entreprise Merlin Gerin en 1969, il a travaillé pendant 14 ans dans les bureaux d'étude basse tension tout en continuant sa formation professionnelle avec la réussite successive de plusieurs diplômes et l'obtention du titre d'ingénieur. Il a ensuite occupé différents postes dans les activités Basse Tension.

Depuis 1995 il a en charge, sur le plan marketing, la gestion et l'évolution des gammes de produits de distribution électrique BT de la marque Merlin Gerin au sein de la société Schneider Electric.

---



# Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence)

L'objectif de ce Cahier Technique est d'expliquer les phénomènes particuliers observés dans les installations BT lors de surcharge ou de défaut électrique dans les circuits équipés de variateurs de vitesse. Différentes préconisations sont fournies pour assurer la protection des personnes et des biens, ainsi que la meilleure continuité de service.

## Sommaire

|   |   |              |
|---|---|--------------|
| <b>1 Variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence » pour moteurs asynchrones</b> | 1.1 Description   | <b>p. 4</b>  |
|   | 1.2 Nécessité de protections adaptées                           | p. 7         |
| <b>2 Protections contre les surintensités</b>   | 2.1 Protections intégrées aux variateurs                        | <b>p. 8</b>  |
|   | 2.2 Protections extérieures aux variateurs                      | p. 9         |
| <b>3 Protection des personnes</b>   | 3.1 Les risques liés aux défauts d'isolement                    | <b>p. 11</b> |
|   | 3.2 Rappel sur les schémas de liaisons à la terre               | p. 12        |
|   | 3.3 Utilisation des DDR suivant le SLT                          | p. 14        |
|   | 3.4 Protection contre les défauts terre intégrée aux variateurs | p. 14        |
|   | 3.5 Défauts d'isolement et variateurs de vitesse                | p. 15        |
| <b>4 Protections à associer aux variateurs</b>  | (tableau récapitulatif)   | <b>p. 19</b> |
| <b>5 Phénomènes particuliers</b>  | 5.1 Courants de fuite haute fréquence                           | <b>p. 20</b> |
|   | 5.2 Courants de fuite à la mise sous tension                    | p. 22        |
|   | 5.3 Défaut en sortie du variateur avec un schéma TT ou TN       | p. 23        |
|   | 5.4 Défaut en sortie du variateur avec un schéma IT             | p. 25        |
|   | 5.5 Courant de défaut à composante continue                     | p. 26        |
| <b>6 Recommandations de choix et d'installation</b>   | 6.1 Choix des DDR   | <b>p. 28</b> |
|   | 6.2 Choix des CPI   | p. 28        |
|   | 6.3 Prévention des dysfonctionnements                           | p. 29        |
| <b>Bibliographie</b>  |   | <b>p. 30</b> |

# 1 Variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence » pour moteurs asynchrones

## 1.1 Description

### Objectif

L'objectif des variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence » est d'alimenter les moteurs asynchrones triphasés de manière à obtenir des caractéristiques de fonctionnement radicalement différentes de leur utilisation normale (moteurs alimentés en direct par la tension réseau), à amplitude et fréquence constantes. Le tableau de la **figure 1** présente les avantages de ces dispositifs.

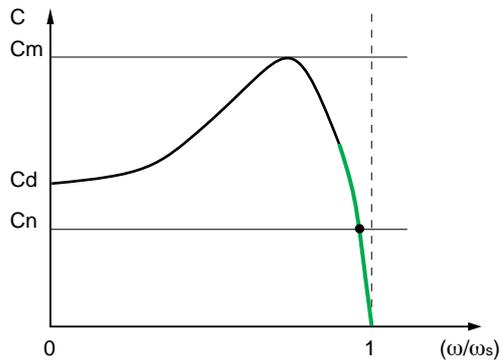
### Principe

Il consiste à fournir au moteur une onde de tension à amplitude et fréquence variables, en maintenant le rapport **tension / fréquence sensiblement constant**.

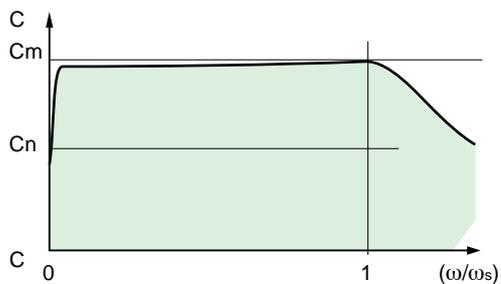
La génération de cette onde de tension est réalisée par un dispositif électronique de puissance dont le schéma de principe est illustré sur la **figure 4**.

| Moteur asynchrone                                      | ... en usage normal  | ... avec variateur de vitesse   |
|--|--|---|
| Courant de démarrage                                   | Très élevé, de l'ordre de 6 à 8 fois le courant nominal en valeur efficace, 15 à 20 fois en valeur crête                     | Limité dans le moteur (en général : environ 1,5 fois le courant nominal)                          |
| Couple de démarrage Cd                                 | Elevé et non contrôlé, de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal Cn   | De l'ordre de 1,5 fois le couple nominal Cn et contrôlé pendant toute l'accélération              |
| Démarrage  | Brutal dont la durée n'est fonction que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée (couple résistant, inertie) | Progressif sans à-coup et contrôlé (rampe linéaire de vitesse par exemple)                        |
| Vitesse  | Variant légèrement selon la charge (proche de la vitesse de synchronisme Ns)   | Variation possible à partir de zéro jusqu'à une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme Ns |
| Couple maximal Cm                                      | Elevé, de l'ordre de 2 à 3 fois le couple nominal Cn   | Elevé disponible sur toute la plage de vitesse (de l'ordre de 1,5 fois le couple nominal)         |
| Freinage électrique                                    | Relativement complexe, nécessite des protections et un schéma particulier  | Facile  |
| Inversion du sens de marche                            | Facile seulement après arrêt moteur  | Facile  |
| Risque de décrochage                                   | Oui, en cas de surcouple (couple résistant > Cm), ou en cas de baisse de tension   | Non   |
| Fonctionnement du moteur dans le plan couple – vitesse | Cf. <b>fig. 2</b>  | Cf. <b>fig. 3</b>   |

**Fig. 1** : comparatif des caractéristiques de fonctionnement montrant tout l'intérêt des variateurs de vitesse de type « convertisseurs de fréquence ».



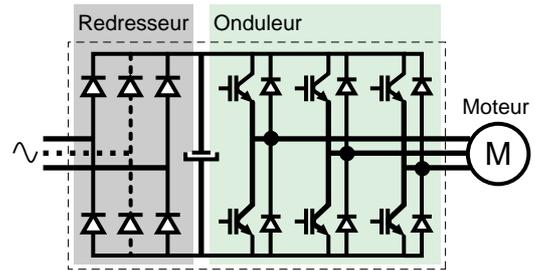
**Fig. 2 :** diagramme couple–vitesse d'un moteur alimenté en direct. La zone de fonctionnement du moteur dans le plan couple–vitesse est limitée à la partie verte de la courbe.



**Fig. 3 :** diagramme couple–vitesse d'un moteur alimenté par convertisseur de fréquence. La zone de fonctionnement du moteur dans le plan couple–vitesse est alors représentée en vert.

Le convertisseur comprend :

- un pont redresseur mono ou triphasé à diodes associé à un condensateur formant une source de tension continue (Bus à tension continue ou Bus DC),
- un pont onduleur généralement à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), alimenté par la tension continue et générant une onde de tension alternative à amplitude et fréquence variables par la technique de « Modulation de Largeur d'Impulsions » ou MLI,
- une unité de commande fournissant les ordres de conduction aux IGBT en fonction des consignes fournies par l'opérateur (ordre de marche, sens de marche, consigne de vitesse...)

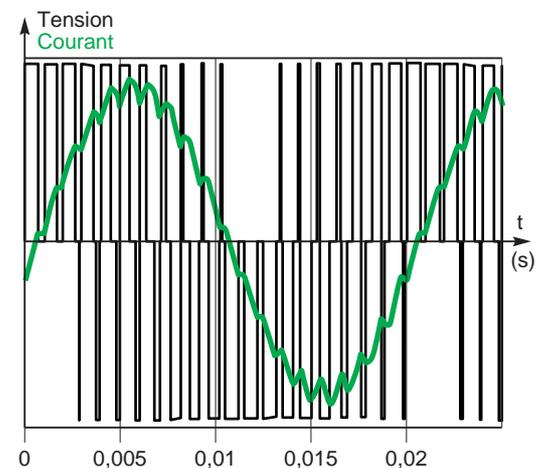


**Fig. 4 :** schéma de principe d'un convertisseur de fréquence.

et de la mesure de grandeurs électriques (tension réseau, courant moteur).

Le principe de la MLI utilisée dans le pont onduleur consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable.

Les courbes représentées sur la **figure 5** sont des exemples de tension entre phases et de courant dans un enroulement de la machine (en supposant les enroulements connectés en triangle).



**Fig. 5 :** tension avec MLI et courant dans un enroulement de la machine.

### Caractéristiques du courant absorbé par le variateur

#### ■ Forme d'onde

□ Dans le cas d'une alimentation triphasée

Le pont redresseur associé au condensateur de filtrage prélève au réseau un courant non sinusoïdal, dont l'allure est représentée par la **figure 6** et son spectre harmonique par la **figure 7**.

La valeur typique du taux de distorsion harmonique THD est de 40 %.

A noter que ce taux de distorsion est obtenu par adjonction d'inductances de ligne provoquant une chute de tension comprise entre 3 et 5 %. En l'absence de ces inductances de ligne,

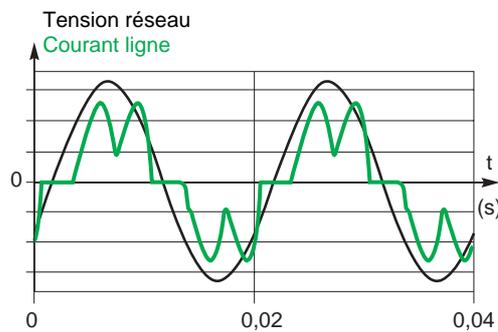
la distorsion de courant est supérieure : elle peut atteindre 80 % en l'absence totale d'inductance dans le variateur.

□ Dans le cas d'une alimentation monophasée

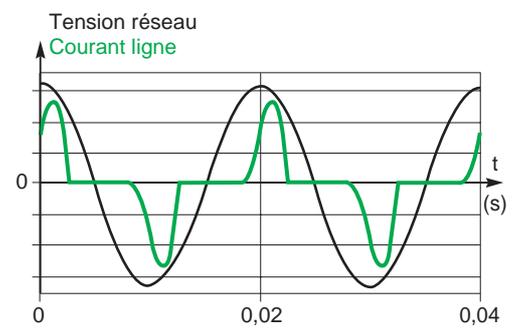
Le courant absorbé est représentée par la **figure 8** et son spectre par la **figure 9**.

La valeur typique du taux de distorsion harmonique THD est de 80 %.

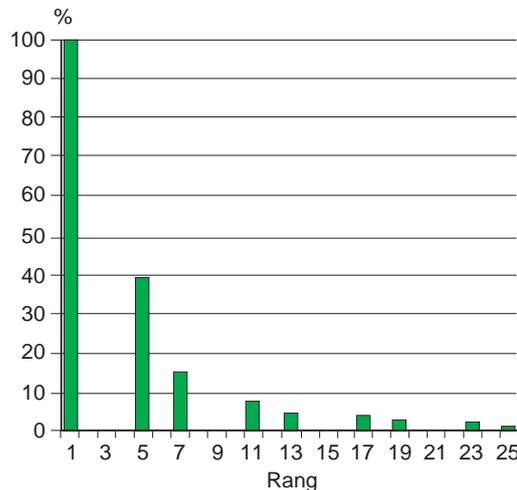
A noter que ce taux de distorsion est encore obtenu par adjonction d'une inductance de ligne provoquant une chute de tension comprise entre 3 et 5 %. En l'absence de cette inductance de ligne, la distorsion de courant est supérieure : elle peut dépasser 100 % en l'absence totale d'inductance dans le variateur.



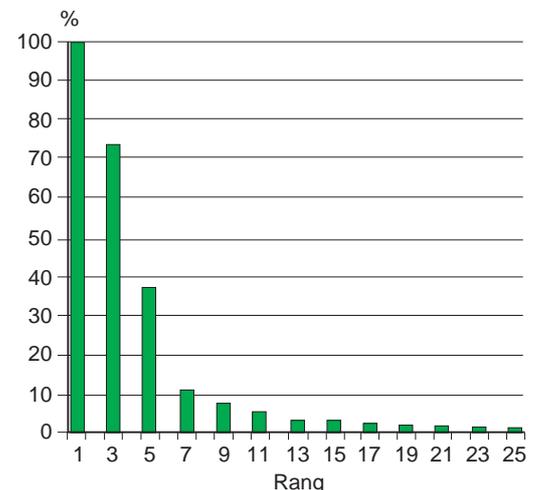
**Fig. 6 :** courant absorbé et tension simple du réseau (alimentation triphasée).



**Fig. 8 :** courant absorbé et tension simple du réseau (alimentation monophasée).



**Fig. 7 :** spectre du courant absorbé au réseau (alimentation triphasée).



**Fig. 9 :** spectre du courant absorbé au réseau (alimentation monophasée).

■ Variation du courant de ligne suivant le point de fonctionnement du moteur  
Le courant fondamental absorbé par le variateur étant pratiquement en phase avec la tension, le courant est donc proportionnel à la puissance électrique absorbée au réseau. Aux rendements près, ce courant est donc proportionnel à la puissance mécanique fournie par le moteur. La puissance mécanique est égale au produit du couple par la vitesse. A vitesse réduite, la puissance mécanique est donc faible. Il en résulte que le courant absorbé au réseau par le variateur est faible quand le moteur tourne à vitesse réduite, même si celui-ci délivre un couple élevé et qu'il absorbe un courant élevé.

### Références normatives

Deux normes concernent particulièrement la conception des variateurs de vitesse :

- CEI 61800-3 « Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 3 : Norme de produit relative à la CEM. »
- NF EN50178 « Equipement électronique utilisé dans les installations de puissance ». La conformité à cette norme autorise le marquage CE au titre de la directive européenne « basse tension ». A noter que cette norme fournit aussi des précisions pour l'installation de ces produits.

## 1.2 Nécessité de protections adaptées

Les caractéristiques décrites précédemment, tant technologiques (circuits électroniques de puissance) que de fonctionnement du moteur associé à un variateur, montrent la nécessité de prévoir des protections adaptées pour bien exploiter un tel appareillage.

La réalisation des variateurs avec une technologie électronique permet l'intégration de plusieurs de ces protections au moindre coût.

Ces protections ne remplacent évidemment pas celles qui sont nécessaires au départ de chaque circuit, selon les règlements d'installation en vigueur, et qui sont donc « extérieures » aux variateurs.

Le fonctionnement de toutes les protections mises en œuvre est décrit dans les chapitres suivants.

## 2 Protections contre les surintensités

Les protections usuelles contre les surintensités (disjoncteurs ou fusibles) sont principalement prévues pour intervenir dans deux cas :

- Afin de protéger une installation contre tout risque de court-circuit.
- Afin d'éviter les risques dus à la surcharge d'un circuit ou à un courant d'exploitation

dépassant les capacités des conducteurs (jeux de barres et câbles) et des appareils de commande et de protection.

La technologie des variateurs de vitesse permet d'assurer électroniquement certaines de ces fonctions.

### 2.1 Protections intégrées aux variateurs

#### Protection de surcharge moteur

Les variateurs modernes assurent la protection du moteur contre les surcharges :

- par une limitation instantanée du courant efficace à 1,5 fois le courant nominal environ,
- par un calcul permanent du  $I^2t$ , avec prise en compte de la vitesse (la plupart des moteurs étant auto-ventilés, le refroidissement est moins efficace à basse vitesse).

A noter que lorsqu'un départ n'alimente qu'un moteur et son variateur, cette protection de surcharge du moteur assure simultanément la protection de surcharge de l'ensemble appareillage et câblage.

#### Protection contre les courts-circuits moteur ou ligne en aval du variateur

En cas de court-circuit entre phases en sortie de variateur (aux bornes du moteur ou à un endroit quelconque de la ligne entre le variateur et le moteur), la surintensité est détectée au sein du variateur et un ordre de blocage est envoyé très rapidement aux IGBT. Le courant de court-circuit (cf. **fig. 10**) est interrompu en quelques microsecondes, ce qui assure la protection du variateur. Ce courant très bref est essentiellement fourni par le condensateur de filtrage associé au redresseur, et est donc indiscernable dans la ligne d'alimentation.

#### Autres protections intégrées aux variateurs

Les variateurs disposent d'autres fonctions d'autoprotection contre :

- les surchauffes de leurs composants électroniques pouvant entraîner leur destruction. Un capteur placé sur le dissipateur thermique provoque l'arrêt du variateur, lorsque la température dépasse un certain seuil.

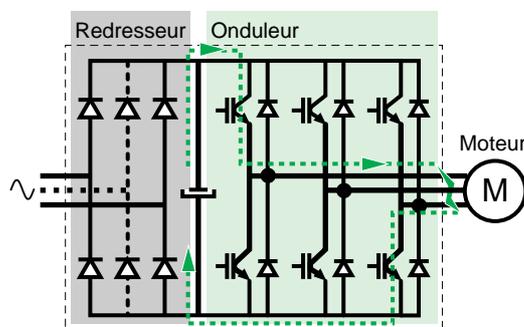


Fig. 10 : court-circuit en aval du variateur.

- les creux de tension du réseau : cette protection est nécessaire pour éviter tout dysfonctionnement des circuits de contrôle et du moteur, ainsi que toute surintensité dangereuse lorsque la tension réseau reprend sa valeur normale.
- les surtensions à fréquence industrielle du réseau : il s'agit d'éviter les destructions éventuelles de leurs composants.
- la coupure d'une phase (pour les variateurs triphasés) : car l'alimentation en monophasé qui se substitue à l'alimentation en triphasé provoque une augmentation du courant absorbé.

#### Action des protections intégrées

Elles provoquent toutes, en cas de défaut, le verrouillage du variateur et l'arrêt du moteur en « roue libre ». La coupure de l'alimentation est alors assurée par le contacteur de ligne dont l'ouverture est commandée par un relais intégré au variateur.

## 2.2 Protections extérieures aux variateurs

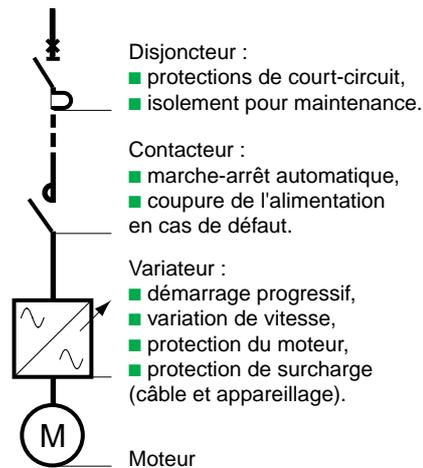
En plus des nécessités exposées dans les premières lignes du chapitre, ces protections contre les surintensités sont aussi prévues pour intervenir en cas de défaut interne au variateur (destruction du pont redresseur par exemple) : le dispositif de protection de la ligne assure la coupure du courant de défaut.

**Nota** : Bien que ce dispositif ne puisse pas normalement protéger les composants du variateur, son ouverture automatique limite les conséquences de tels défauts.

### Emplacements des dispositifs

Toutes ces protections sont définies pour un circuit qui le plus fréquemment se présente selon la **figure 11** :

- avec, à l'origine du circuit, une protection individuelle contre les surintensités souvent associée à un contacteur,
  - sans dispositif de coupure à l'aval du variateur.
- Sur cette figure sont précisées les fonctions attachées aux différents appareils (disjoncteur, contacteur et variateur).



**Fig. 11** : schéma préconisé pour la protection contre les surintensités.

Ces associations (disjoncteur, contacteur et variateur) proposées par les constructeurs sont dénommées « départs-moteurs ». Du fait des protections intégrées aux variateurs, ces associations assurent naturellement une coordination de type 2 dans le cas de court-circuit en aval du variateur.

« Coordination de type 2 » signifie qu'en cas de court-circuit :

- aucun dommage ni dérèglement n'est admis,
- l'isolement doit être conservé,
- le départ-moteur doit être en mesure de fonctionner après suppression du court-circuit,
- le risque de soudure des contacts du contacteur est admis si ceux-ci peuvent être facilement séparés.

S'il y a risque de court-circuit en amont du variateur, pour assurer la coordination de type 2, il est nécessaire de se reporter aux tables de coordination fournies par les constructeurs des protections placées en amont.

**Nota** : Avec un variateur, il n'y a pas de pointe de courant à la mise sous tension, donc aucune contrainte particulière n'est appliquée au dispositif de protection.

### Calcul du calibre des disjoncteurs et des contacteurs

Il est déterminé en fonction du courant ligne absorbé par le variateur. Celui-ci est calculé à partir :

- de la puissance mécanique nominale du moteur,
- de la tension nominale d'alimentation,
- du rendement du moteur et du variateur,
- d'une surcharge permanente admissible de 1,1 C<sub>n</sub> en couple constant et de 1,05 C<sub>n</sub> en couple variable,
- des harmoniques, le courant n'étant pas sinusoïdal.

La valeur efficace du courant, en fonction du taux de distorsion, est obtenue par la formule :

$$I_{\text{rms}} = I_1 \sqrt{1 + \text{THD}^2}$$

ainsi avec THD = 40 %,  $I_{\text{rms}} = 1,08 I_1$ .

Le courant fondamental  $I_1$  étant pratiquement en phase avec la tension, la valeur typique du courant absorbé par le variateur, lorsqu'il alimente un moteur fonctionnant à son point nominal (application à couple constant), se calcule par la formule :

$$I_{\text{rms}} = 1,08 I_1 \approx 1,08 \times 1,1 \frac{P_{\text{mot}}}{\sqrt{3}U} \frac{1}{\eta_{\text{mot}}} \frac{1}{\eta_{\text{var}}}$$

Avec :

$P_{\text{mot}}$  : puissance nominale du moteur

$U$  : tension entre phases

$\eta_{\text{mot}}$  : rendement moteur

$\eta_{\text{var}}$  : rendement variateur

■ Exemple :

Puissance moteur : 15 kW

Tension réseau : 400 V

$\eta_{\text{mot}} :$  0,95

$\eta_{\text{var}} :$  0,97

d'où :  $I_{\text{rms}} = 27,9 \text{ A}$

**Deux cas particuliers**

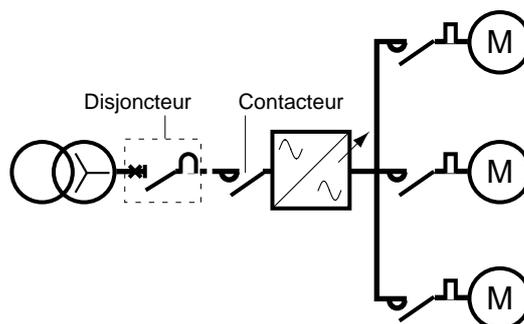
■ Alimentation de moteurs en parallèle

Dans ce cas, la protection de surcharge intégrée au variateur ne peut pas assurer la protection de chaque moteur. En effet, l'un des moteurs peut se trouver en surcharge, alors que le courant absorbé par l'ensemble des moteurs ne dépasse pas le courant nominal du variateur. Les moteurs doivent donc être protégés individuellement par un relais thermique (cf. **fig. 12**).

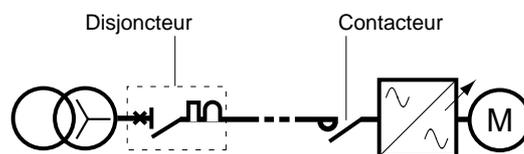
Il est malgré tout recommandé de maintenir la protection de surcharge intégrée au variateur active, afin d'assurer la protection des câbles en amont.

■ Protection de surcharge intégrée au variateur inhibée

Pour certaines applications exigeant une continuité d'exploitation impérative, la protection de surcharge du variateur peut être inhibée. La protection des câbles et de l'appareillage, qui doit être assurée en amont, nécessite alors une protection de surcharge obligatoirement associée au disjoncteur du départ-moteur (cf. **fig. 13**). Un surdimensionnement de 20 % du câble et de l'appareillage est alors préconisé.



**Fig. 12 :** protection de surcharge de plusieurs moteurs alimentés par un même variateur.



**Fig. 13 :** protection de surcharge intégrée au variateur inhibée.

## 3 Protection des personnes

### 3.1 Les risques liés aux défauts d'isolement

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

- la sécurité des personnes (risque de choc électrique),
- la sécurité des biens (risque d'incendie ou d'explosion en raison d'un échauffement excessif ponctuel),
- la disponibilité de l'énergie électrique (déconnexion d'une partie d'une installation pour éliminer le défaut).

Concernant la protection des personnes, les normes et règlements distinguent deux types de contacts dangereux et précisent les mesures de protection correspondantes.

#### Le contact direct

Contact de personnes avec des conducteurs actifs (phase ou neutre) ou des pièces conductrices habituellement sous tension (cf. **fig. 14**).

La protection contre ce risque est normalement assurée par l'isolation des parties actives au moyen de barrières, écrans ou enveloppes (selon CEI 60364-4-41 ou NF C 15-100). Ces dispositifs ont un caractère préventif et peuvent se révéler défectueux. Pour pallier ce risque, on utilise une mesure de protection complémentaire à coupure automatique, consistant à détecter tout courant de « fuite à la terre » susceptible de circuler au travers d'une personne, et qui ne se reboucle pas à la source au travers des conducteurs actifs. Son seuil de déclenchement

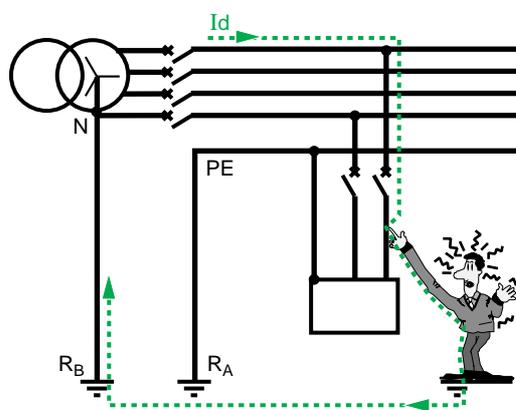


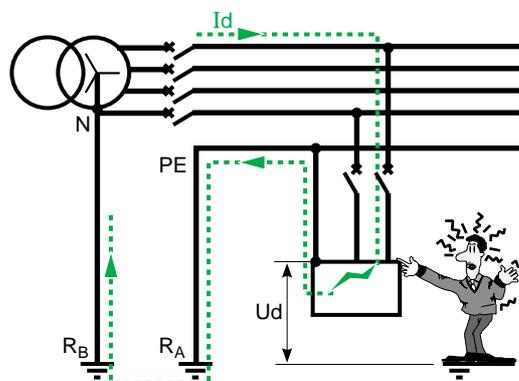
Fig. 14 : contact direct.

est fixé à **30 mA en courant alternatif** (CEI 60364-4-41 ou NF C 15-100) et 60 mA en courant continu.

#### Le contact indirect

Contact de personnes avec des masses conductrices, normalement hors potentiel, mises accidentellement sous tension. Cette mise sous tension résulte de la défaillance de l'isolation d'un appareil ou d'un conducteur amenant un défaut d'isolement (cf. **fig. 15**).

Ce risque électrique est fonction de la tension de contact qui se développe entre la masse de l'équipement en défaut et la terre ou d'autres masses conductrices situées à proximité. Pour définir les protections à mettre en œuvre, les normes présentent différents schémas d'installation selon les liaisons électriques entre les conducteurs actifs, les masses et la terre. Pour plus d'explications voir le Cahier Technique n° 172.



Lors d'un contact avec une masse mise accidentellement sous tension ( $U_d$ ) le seuil de danger est fixé par la tension limite de sécurité  $U_L$ .

Ainsi avec :

$R_A$  = résistance de mise à la terre des masses de l'installation,

$R_B$  = résistance de mise à la terre du neutre,

le seuil de fonctionnement ( $I\Delta n$ ) du dispositif de protection doit être tel que :

$$U_d = R_A \cdot I\Delta n \leq U_L$$

$$\text{et donc } I\Delta n \leq U_L / R_A.$$

(Pour plus de précision lire le Cahier Technique n° 114)

Fig. 15 : contact indirect.

## 3.2 Rappel sur les schémas de liaisons à la terre

Pour les réseaux en BT, il existe trois types de schémas des liaisons à la terre – SLT –, communément appelés régimes de neutre. Ils diffèrent par la mise à la terre ou non du point neutre de la source de tension et par le mode de raccordement des masses (cf. **fig. 16**). Le choix du régime de neutre dépend des caractéristiques de l'installation et des conditions et impératifs d'exploitation.

Pour plus de détails voir aussi les Cahiers Techniques suivants :

- n° 173 - Les schémas des liaisons à la terre dans le monde et évolutions,
- n° 178 - Le schéma IT des liaisons à la terre en BT.

### 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 protégées par un même dispositif de coupure doivent être reliées à une même prise de terre.

C'est le cas typique de la distribution publique en France.

Le schéma TT impose la coupure immédiate car tout défaut d'isolement peut présenter un risque d'électrocution.

### Schéma TN

Le principe de ce schéma dit de « mise au neutre » est que tout défaut d'isolement provoque un court-circuit monophasé phase–neutre. La coupure immédiate est aussi imposée et ce schéma permet d'utiliser les protections de surintensité habituelles pour protéger contre les défauts d'isolement. Dans ce type de schéma :

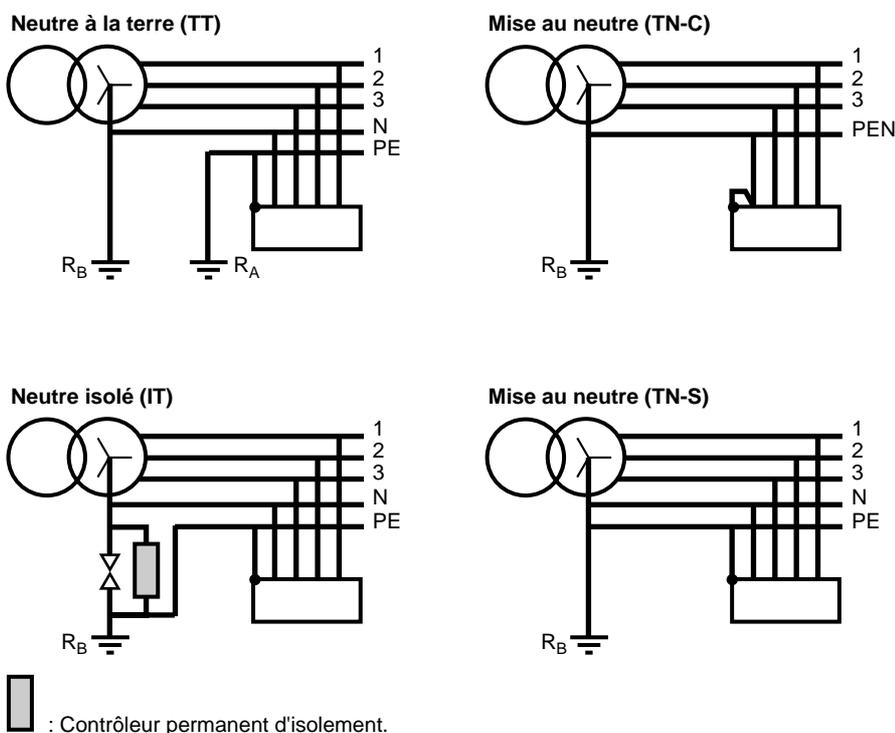
- le point neutre BT de chaque source est relié directement à la terre,
- toutes les masses de l'installation sont reliées à la terre (et donc au neutre) par un conducteur de protection :
- PE distinct du conducteur de neutre, c'est le schéma TN-S,
- ou PEN commun avec le conducteur de neutre, c'est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

**Nota** : Le schéma TN-C n'est pas recommandé pour l'alimentation des dispositifs électroniques en raison de la possible circulation de courants harmoniques dans le conducteur de neutre qui est aussi le conducteur de protection.

### 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),



**Fig. 16** : les trois types de schémas normalisés des liaisons à la terre.

■ toutes les masses de l'installation sont interconnectées et reliées à la terre.  
 En schéma IT, le premier défaut d'isolement n'impose pas la coupure, ce qui permet à l'installation de continuer à fonctionner normalement. Toutefois ce défaut doit être détecté et signalé puis réparé avant qu'un deuxième défaut d'isolement ne survienne sur un autre conducteur actif, nécessitant alors un déclenchement immédiat.  
 Cette règle confère au schéma IT la meilleure continuité d'alimentation (Voir aussi le Cahier Technique n° 178).

### Nécessité de moyens de détection spécifiques

La valeur du courant de défaut d'isolement entre phase et terre (en mode commun) dépend du schéma de liaisons à la terre. Souvent, 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) comme c'est le cas avec les schémas TT et IT.

Deux dispositifs sont particulièrement destinés à la protection des personnes : les Dispositifs à courant Différentiel Résiduel – DDR – et les Contrôleurs Permanents d'isolement – CPI –.

#### ■ Les DDR

□ Principe des DDR (illustré sur la **figure 17**).  
 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 aucune force magnétomotrice.  
 En cas de défaut d'isolement, cette somme n'est plus nulle et le courant de défaut induit dans le tore une force magnétomotrice qui génère un courant dans sa bobine. S'il dépasse le seuil fixé pendant une durée supérieure à la temporisation éventuelle, un ordre d'ouverture est alors transmis à l'organe de coupure.

Pour plus de détails, se reporter au Cahier Technique n° 114 : « Les dispositifs différentiels résiduels en BT ».

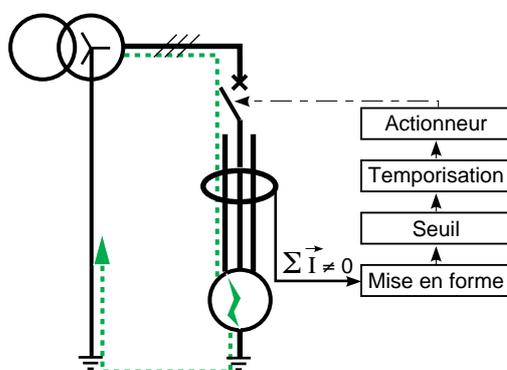


Fig. 17 : principe du DDR.

#### □ Types des DDR

La norme CEI 60755 distingue trois types de protections différentielles :

**AC** : pour les courants alternatifs sinusoïdaux,  
**A** : pour les courants alternatifs ayant une composante continue (cf. **fig. 18**). Ces appareils conviennent pour la détection de courants monophasés redressés.

**B** : pour les courants continus. Ces appareils conviennent pour tout type de courant et sont nécessaires, en particulier, pour les courants triphasés redressés.

#### ■ Les CPI

Le principe d'un CPI consiste à injecter une tension, alternative ou continue, entre le réseau et la terre (cf. **fig. 19**). La mesure du courant traversant le contrôleur permet le calcul de la résistance d'isolement lorsque ce courant est continu, ainsi que celui de l'impédance réseau/terre lorsque ce courant est alternatif.

Ces mesures associées à des dispositifs à seuils autorisent différentes alarmes, par exemple de diminution progressive d'isolement aux fins de maintenance prédictive, ou de défaut terre nécessitant une intervention rapide (avant le deuxième défaut).

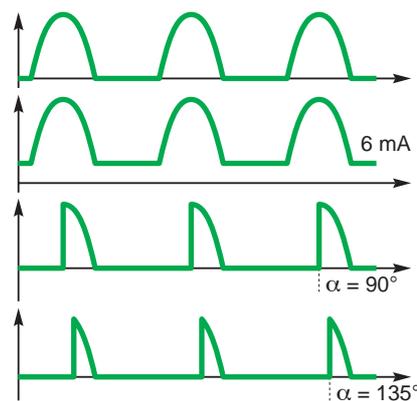


Fig. 18 : formes d'onde caractérisant les DDR type A.

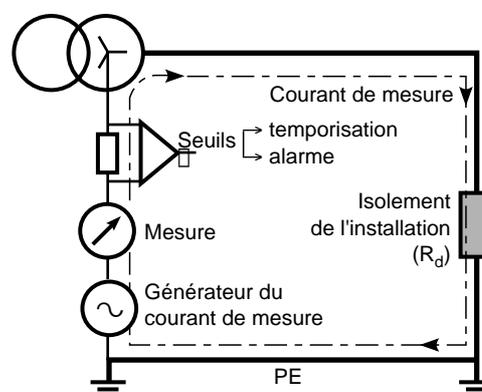


Fig. 19 : principe d'un CPI.

### 3.3 Utilisation des DDR suivant le SLT

Le Cahier Technique n° 172 : « Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes de neutre) » traite plus largement de ce sujet.

#### Quel que soit le SLT

Les DDR sont utilisés en protection complémentaire contre les risques de contact direct. Dans certains pays ils sont même obligatoires en amont des prises de courant  $\leq 32$  A avec un seuil de déclenchement  $\leq 30$  mA (par exemple en France selon la norme NF C 15-100 §532.26).

Des DDR de sensibilité inférieure ou égale à 500 mA (CEI 60364 §482) sont aussi préconisés pour surveiller les circuits d'alimentation électrique dans les zones à risques d'incendie.

#### Schéma TT

L'utilisation de DDR est le seul moyen permettant de détecter de faibles courants de défaut. En effet, l'impédance d'un défaut n'est pas connue avec certitude et peut être élevée (les masses d'utilisation ont des prises de terre distinctes et ne sont pas toujours interconnectées).

#### Schéma TN-S ou TN-CS

L'utilisation de DDR permet de s'affranchir des vérifications sur la valeur du courant en cas de défaut.

Ils commandent également la coupure des circuits lorsque le courant de défaut, limité par une grande longueur de câble, n'est pas suffisant pour activer les protections contre les surintensités. Le seuil de déclenchement des DDR peut être alors élevé (basse sensibilité), de quelques ampères à quelques dizaines d'ampères.

**Nota :** Selon la CEI 60364 :

- un dispositif de protection à courant différentiel-résiduel ne doit pas être utilisé dans le schéma TN-C,
- lorsqu'un dispositif de protection à courant différentiel-résiduel est utilisé dans un schéma TN-C-S, un conducteur PEN ne doit pas être utilisé en aval.

#### Schéma IT

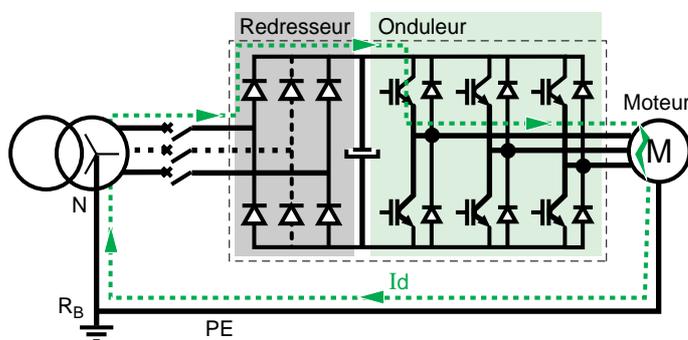
Dans un schéma IT, les DDR sont utilisés dans les deux cas suivants.

- Si le courant de court-circuit (au 2ème défaut) peut ne pas être suffisant pour activer la protection contre les défauts entre phases, par exemple sur les départs alimentant des récepteurs éloignés.
- Dans le cas de groupes de récepteurs reliés individuellement à la terre (groupes de masses non interconnectés).

### 3.4 Protection contre les défauts terre intégrée aux variateurs

Dans le cas où le réseau est avec un schéma TN, un défaut entre une sortie du variateur et la terre provoque une surintensité importante par l'interconnexion des masses (cf. **fig. 20**). Comme dans le cas d'un court-circuit entre phases, cette surintensité est détectée et un ordre de blocage est envoyé aux IGBT.

Par contre, dans ce cas, le courant de défaut circule dans la ligne d'alimentation, mais pendant un temps très court (quelques centaines de microsecondes). Le dispositif de protection intégré intervient alors. L'isolement galvanique du variateur est obtenu par l'ouverture du contacteur de ligne. Ce dispositif n'assure pas



**Fig. 20 :** défaut à la terre en sortie.

dans tous les cas la protection des personnes contre les contacts indirects. En effet, l'impédance du défaut peut limiter le courant à une valeur inférieure au seuil de la protection du variateur et c'est généralement le cas avec le schéma TT.

Un DDR 300 mA est donc nécessaire. Dans le cas d'un réseau IT, le premier défaut ne provoque pas de circulation de courant et le variateur continue à fonctionner normalement.

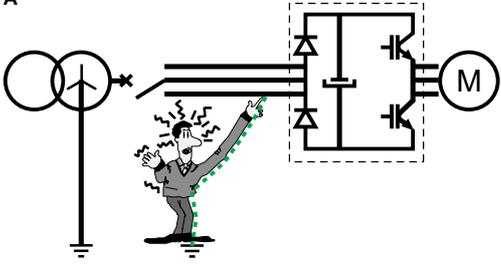
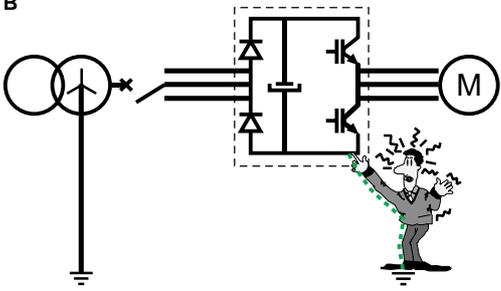
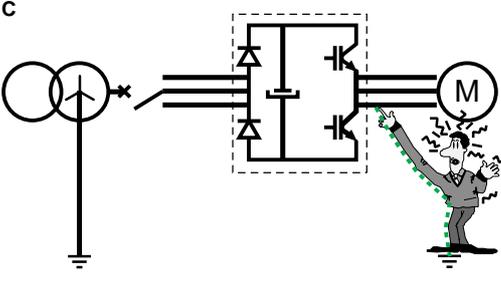
### 3.5 Défaits d'isolement et variateurs de vitesse

#### Contact direct

Sur les circuits comportant des variateurs de vitesse, il y a plusieurs situations possibles de contact direct (cf. **fig. 21** ci-dessous et **fig. 22** page suivante).

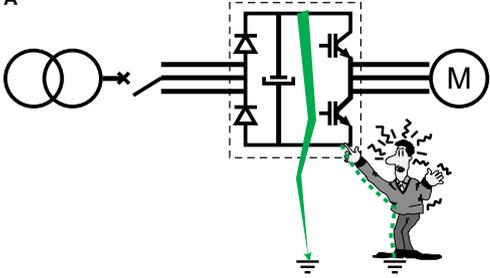
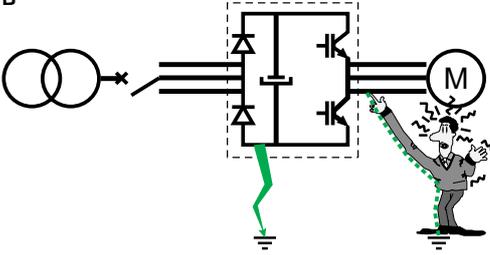
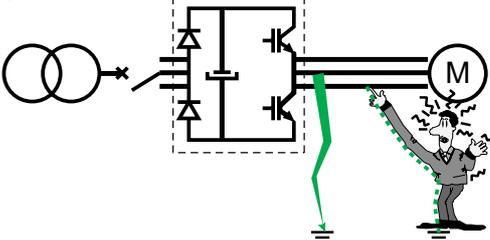
■ Schémas TT et TN-S

Une protection complémentaire, en cas de défaillance d'autres mesures de protection contre les contacts ou en cas d'imprudence des usagers, peut être prévue en amont du variateur et assurée par un DDR de seuil 30 mA.

| Risque de contact direct  | Tension de toucher             | Protection complémentaire |
|---|--------------------------------|---------------------------|
| <p>En amont du variateur<br/>A</p>  | Tension phase - neutre         | DDR 30 mA                 |
| <p>Sur le bus DC<br/>B</p>         | Tension réseau redressée       |                           |
| <p>En aval du variateur<br/>C</p>  | Tension de sortie du variateur |                           |

**Fig. 21** : tensions présentes en cas de contact direct avec les schémas TT et TN-S.

■ Schéma IT avec un premier défaut d'isolement présent sur le réseau

| Risque de contact direct   | Tension de toucher             | Protection complémentaire                        |
|--|--------------------------------|--|
| <p>A</p>    | Tension réseau redressée       | Pas de protection à coupure automatique possible |
| <p>B</p>    | Tension de sortie du variateur |  |
| <p>C</p>  |                                |  |

**Fig. 22** : différentes situations spécifiques à un réseau avec un schéma IT et comportant un défaut d'isolement et un personnage en contact direct.

Dans les trois situations spécifiques au schéma IT exposées figure 22, aucune protection par coupure automatique n'est applicable : le courant de défaut ne peut pas être distingué du courant normal de

fonctionnement. Cela souligne l'importance que les installateurs doivent apporter au câblage de ces machines afin de garantir la précaution de base qu'est l'isolement des parties actives.

Remarques :

- le constat est identique pour chacune de ces situations lorsque les deux défauts (d'isolement et contact direct) sont permutés.
- lorsque plusieurs variateurs sont alimentés par un même réseau, les bus DC des différents variateurs peuvent être considérés comme étant au même potentiel. Des défauts localisés sur des variateurs différents ont donc les mêmes conséquences que s'ils étaient localisés sur un même variateur.

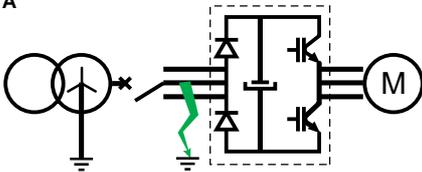
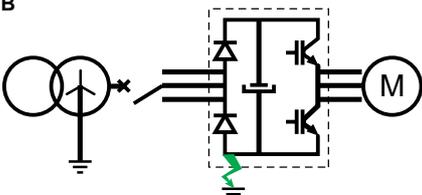
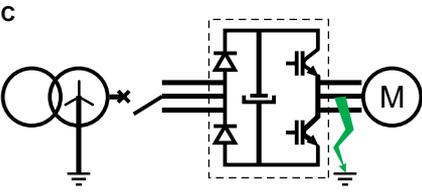
### Contact indirect

#### ■ schémas TT et TN-S

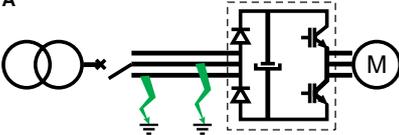
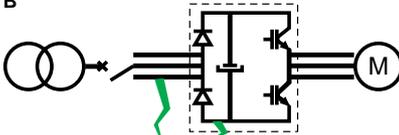
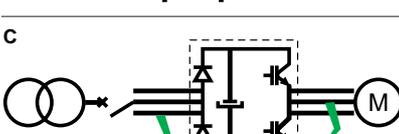
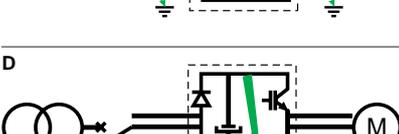
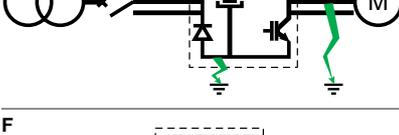
Les situations de contact indirect sont présentées dans la **figure 23**.

#### ■ Schéma IT

Avec ce schéma il faut tenir compte de la présence de deux défauts simultanés. Le tableau de la **figure 24** page suivante, précise les différents défauts possibles ainsi que leurs conséquences.

| Situation   | Effet... (risque...)   | Protection concernée avec un schéma TT     | Protection concernée avec un schéma TN-S |
|---|--|--|--|
| <p><b>A</b></p>    | Surintensité en amont du variateur   | DDR  | A maximum de courant placée en amont     |
| <p><b>B</b></p>   | Surintensité au travers d'une diode du pont redresseur, le courant de défaut est un courant redressé (risque de destruction)                                       | DDR immunisé au passage du courant continu |  |
| <p><b>C</b></p>  | Surintensité au travers d'une diode du pont redresseur et d'un IGBT. (risque de destruction fonction du type de protection « court-circuit » intégré au variateur) | Interne au variateur ou DDR                |  |

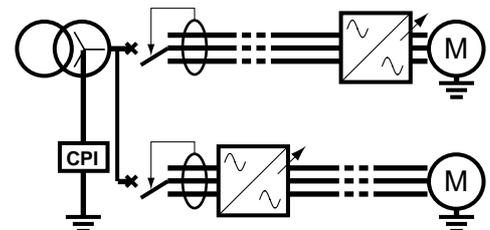
**Fig. 23** : différents défauts d'isolement avec les schémas TT et TN-S.

| Situation   | Effet... (risque...)   | Protection concernée  |
|---|--|---|
| <b>A</b><br>   | Surintensité en amont du variateur   | A maximum de courant placée en amont  |
| <b>B</b><br>   | Surintensité au travers d'une diode du pont redresseur (risque de destruction)   | A maximum de courant placée en amont  |
| <b>C</b><br>   | Surintensité au travers d'une diode du pont redresseur et d'un IGBT (risque de destruction fonction du type de protection « court-circuit » intégrée au variateur) | Interne au variateur ou à maximum de courant placée en amont, mais une grande longueur de câble en aval du variateur peut masquer le défaut |
| <b>D</b><br>   | Court-circuit sur le bus continu (risque de destruction du pont redresseur)  | A maximum de courant placée en amont  |
| <b>E</b><br>  | Court-circuit aux bornes d'un IGBT (risque de destruction de l'IGBT opposé fonction du type de protection « court-circuit » intégrée au variateur)                 | Interne au variateur ou à maximum de courant placée en amont  |
| <b>F</b><br> | Surintensité en sortie du variateur  | Interne au variateur  |

**Fig. 24 :** différentes situations avec deux défauts francs ou peu impédants sur un schéma IT.

■ Cas particulier des moteurs alimentés par des circuits distincts comportant chacun un variateur et dont les masses ont des prises de terre distinctes. Lorsqu'une installation alimente plusieurs équipements éloignés les uns des autres, leurs masses d'utilisation sont souvent connectées à des prises de terre séparées. L'impédance du circuit parcouru par le courant de défaut est alors augmentée de la résistance des deux prises de terre concernées. La condition nécessaire à la protection des personnes (respect des temps maximaux de coupure) ne peut plus être assurée par les dispositifs de protection contre les courts-circuits. La solution habituelle, très simple d'étude et d'installation, est l'emploi de DDR (Lire le Cahier Technique n° 178) placés au départ de chaque circuit comportant une mise à la terre distincte

(cf. **fig. 25** ). Ces DDR ne doivent pas être perturbés par le passage d'une composante continue.



**Fig. 25 :** emplacement des DDR pour protéger, en schéma IT, deux départs ayant des prises de terre distinctes.

## 4 Protections à associer aux variateurs (tableau récapitulatif)

En synthèse des chapitres précédents, le tableau suivant permet de connaître les fonctions de protection remplies par le variateur,

et si nécessaire de les compléter par des dispositifs extérieurs au variateur tels que disjoncteur, relais de surcharge, et DDR.

| Protection à assurer                 | Protection généralement assurée par le variateur | Protection extérieure                          |
|--------------------------------------|--|--|
| Surcharge câble                      | Oui = (1)  | Inutile si (1)                                 |
| Surcharge moteur                     | Oui = (2)  | Inutile si (2)                                 |
| Court-circuit aval                   | Oui  |  |
| Surchauffe variateur                 | Oui  |  |
| Surtension                           | Oui  |  |
| Sous-tension                         | Oui  |  |
| Coupure phase                        | Oui  |  |
| Court-circuit amont                  |  | Disjoncteur (décl. court-circuit)              |
| Défaut interne                       |  | Disjoncteur (décl. court-circuit et surcharge) |
| Défaut terre aval (contact indirect) | Autoprotection du variateur                      | DDR $\geq$ 300 mA                              |
| Défaut par contact direct            |  | DDR $\leq$ 30 mA                               |

## 5 Phénomènes particuliers

L'objet de ce chapitre est d'analyser les phénomènes particuliers, liés au fonctionnement

des convertisseurs de fréquence, qui ont un impact sur les dispositifs de protection DDR et CPI.

### 5.1 Courants de fuite haute fréquence

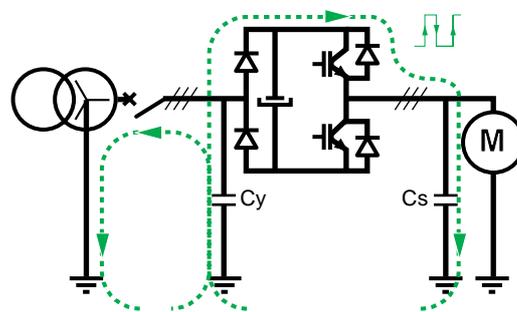
La forme de la tension générée par le variateur, et en particulier la présence de fronts de tension générés par la commutation des IGBT, est à l'origine de courants de fuite haute fréquence circulant dans les câbles d'alimentation.

#### Leurs parcours

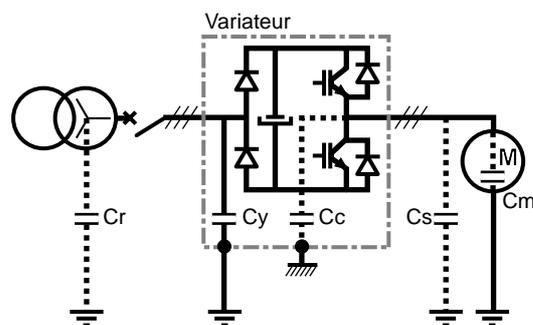
Ces fronts de tension sont appliqués aux bornes des différentes capacités du circuit (cf. **fig. 26**) :

- $C_c$  : capacité des composants IGBT entre conducteurs et enveloppe reliée à la terre,
- $C_m$  : capacité entre les enroulements moteur et la terre (fonction de la puissance du moteur),
- $C_r$  : capacité entre le réseau d'alimentation et la terre (en court-circuit si le neutre est relié à la terre),
- $C_s$  : capacité entre les conducteurs de sortie et la terre (fonction du type et de la longueur des câbles),
- $C_y$  : capacité d'antiparasitage à l'entrée du variateur.

Des courants circulent donc au travers de ces capacités. Les plus significatifs sont représentés sur la **figure 27**.



**Fig. 27** : circulation des courants de fuite Haute Fréquence.



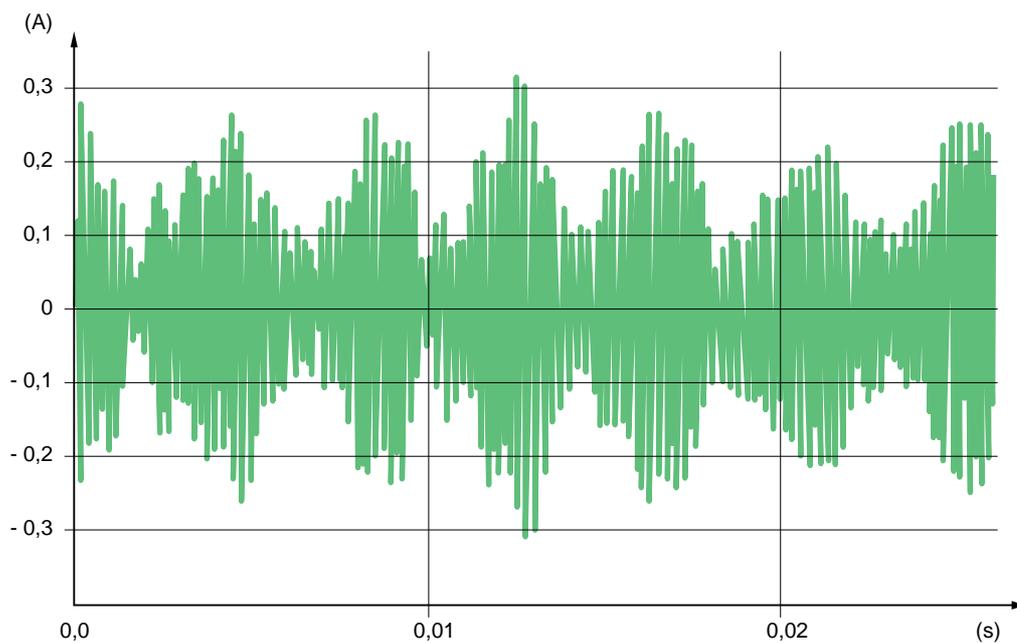
**Fig. 26** : capacités du circuit.

#### Leurs caractéristiques

Ces courants peuvent atteindre plusieurs ampères en valeur instantanée et plusieurs dizaines ou centaines de milliampères en valeur efficace. Le spectre et l'amplitude de ces courants dépendent à la fois de la fréquence de la MLI (entre 1 et 20 kHz) et des caractéristiques de l'installation :

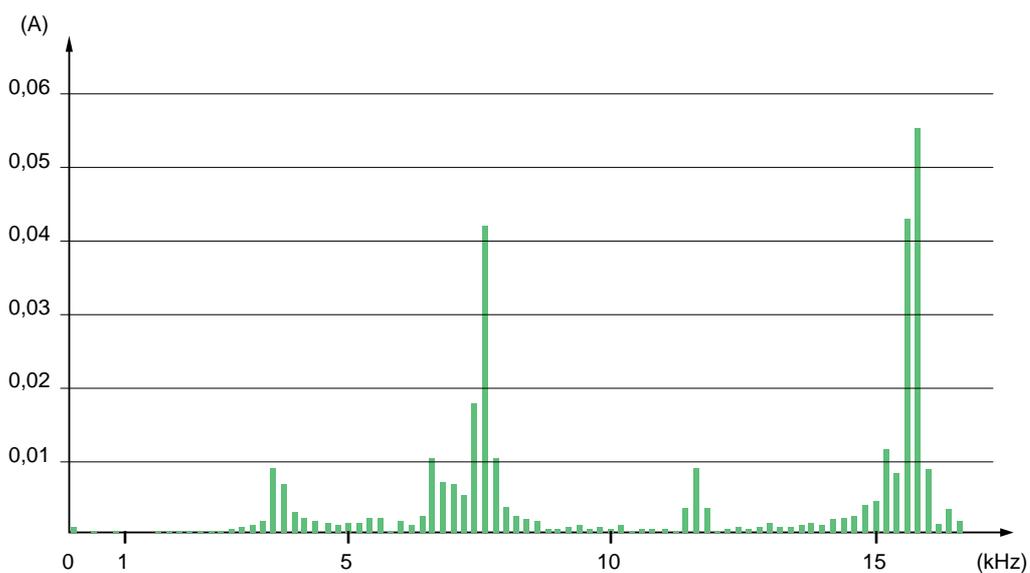
- alimentation : impédance de ligne, schéma de mise à la terre,
- type et longueur du câble moteur (blindé, non blindé, conducteur de protection),
- puissance du moteur.

L'allure et le spectre des courants HF à l'entrée du variateur (hors défaut), pour une MLI à 4 kHz, sont représentés par les **figures 28** et **29**.



**Fig. 28** : courants de fuite Haute Fréquence.

---



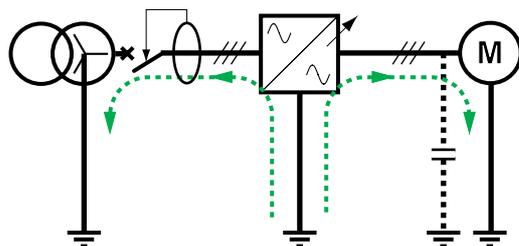
**Fig. 29** : spectre du courant de fuite.

---

**Leur incidence :**  
**risque de perturbation des DDR**

■ Déclenchements intempestifs

Ces courants peuvent être à l'origine de dysfonctionnements des dispositifs différentiels résiduels (DDR) puisqu'ils parcourent les conducteurs entourés par les tores de mesure. La mesure du courant différentiel peut donc être perturbée, en particulier lorsque le câble de liaison variateur - moteur est de grande longueur et/ou les capacités entre phases et terre sont élevées (cf. **fig. 30**).

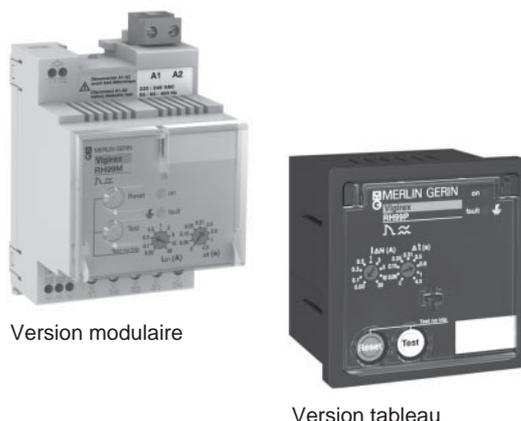


**Fig. 30** : perturbation d'un DDR par les courants de fuite Haute Fréquence.

**La solution**

Le dispositif de mesure doit donc inclure un circuit de filtrage de manière à ne prendre en compte que la composante basse fréquence du signal (cf. **fig. 31**).

Des précautions supplémentaires, présentées en fin de ce Cahier Technique, peuvent s'avérer nécessaires dans certaines situations extrêmes.



**Fig. 31** : DDR intégrant un filtrage des courants HF (Vigirex RH99M et RH99P - marque Merlin Gerin).

## 5.2 Courants de fuite à la mise sous tension

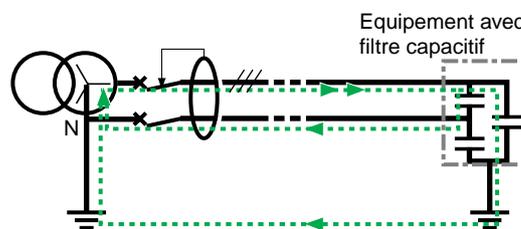
**Leur origine**

Des condensateurs sont généralement placés à l'entrée des convertisseurs de fréquence pour assurer leur immunité vis-à-vis des perturbations HF présentes sur le réseau et réduire leurs émissions HF. Leur capacité est d'environ 10 à 100 nF.

Ces condensateurs sont responsables de courants différentiels résiduels (cf. **fig. 32**) à la mise sous tension, ainsi qu'en fonctionnement normal.

**Leur incidence : risque de déclenchements intempestifs**

Pour un appareil en fonctionnement normal, ces courants sont faibles (de 0,5 à 3,5 mA). Par contre, dans un équipement industriel comportant plusieurs variateurs ils sont à même de provoquer des déclenchements intempestifs de DDR.



**Fig. 32** : courant de fuite parcourant les condensateurs d'entrée des équipements (en pointillés).

**La solution**

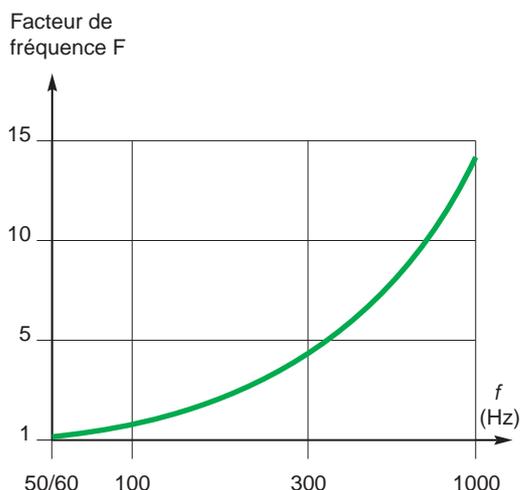
Elle est du ressort de l'équipementier ou de l'installateur : elle consiste à limiter le nombre de variateurs alimentés par un même DDR.

## 5.3 Défaut en sortie du variateur avec un schéma TT ou TN

### Risque d'électrocution

Le courant de défaut contient une composante à la fréquence de la MLI ainsi que des courants HF créés par les oscillations des capacités parasites, mais les dangers des courants HF sont assez mal connus. Le document CEI 60479-2 fournit des indications, en particulier sur la variation du seuil de fibrillation cardiaque.

Cette courbe (cf. **fig. 33**) montre que le facteur de fréquence, qui est le rapport du courant à la fréquence  $f$  au courant à la fréquence de 50/60 Hz pour un même effet physiologique considéré, augmente avec la fréquence. Elle autorise donc un seuil de déclenchement plus élevé pour des fréquences de courant supérieures à 50 Hz. Cette variation de seuil est techniquement réalisée par un filtrage.



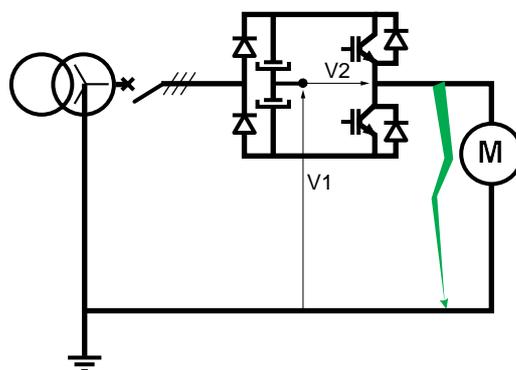
**Fig. 33** : variation du seuil de fibrillation cardiaque en fonction de la fréquence (selon CEI 60479-2).

### Allure du courant de défaut

En cas de défaut franc à la terre en sortie de variateur, avec un schéma TN, la surintensité provoque le déclenchement de la protection interne du variateur ou des protections à maximum de courant placées en amont.

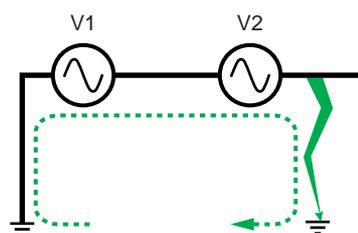
Si ce défaut d'isolement est impédant, le seuil de la protection à maximum de courant est susceptible de ne pas être atteint, un DDR doit donc être prévu pour assurer cette protection.

Comme déjà abordé précédemment, le bon fonctionnement d'un DDR dépend des courants de défaut qui traversent son capteur torique, or dans ce cas de figure, ces courants ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. Il est possible d'analyser la forme d'onde du courant de défaut homopolaire en étudiant le schéma équivalent simplifié de la **figure 34**.



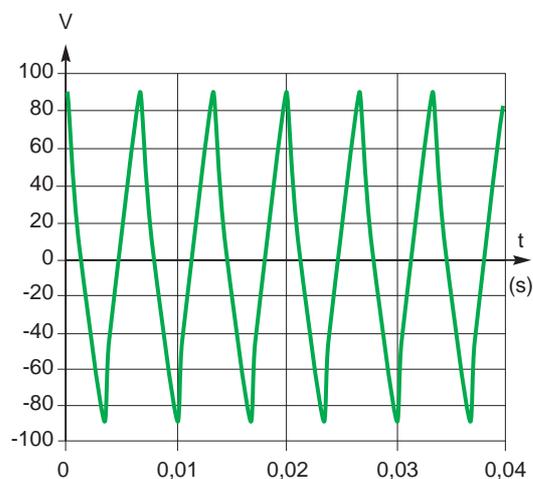
**Fig. 34** : tension de défaut.

Les tensions  $V1$  et  $V2$  sont responsables de la circulation d'un éventuel courant de défaut, comme illustré sur la **figure 35**.



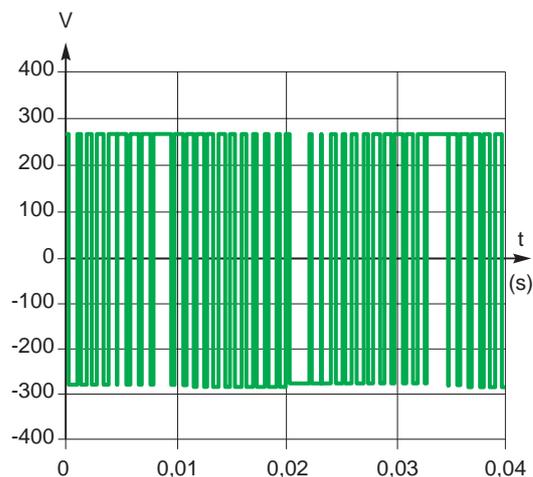
**Fig. 35** : courant de défaut.

La tension  $V_1$ , entre le neutre de l'alimentation triphasée et le point milieu du redresseur a une fréquence fondamentale de 150 Hz (cf. **fig. 36**).



**Fig. 36** : tension du point neutre du redresseur en triphasé.

La tension  $V_2$  (cf. **fig. 37**), entre le point milieu du redresseur et une phase de sortie est le résultat de la MLI ; elle contient donc une composante à basse fréquence égale à la fréquence de sortie du variateur (40 Hz dans cet exemple) et une composante à la fréquence de la MLI (1 kHz dans cet exemple).

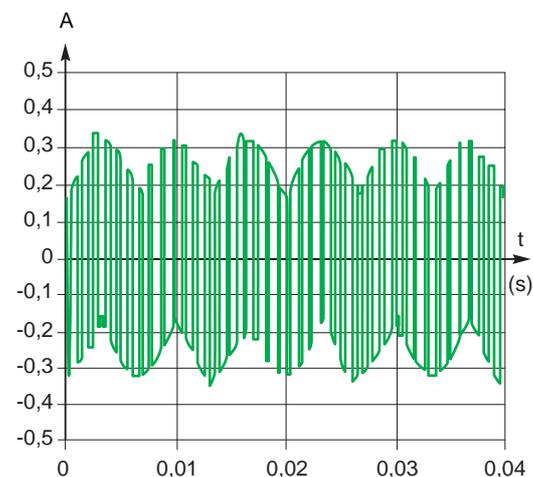


**Fig. 37** : tension de sortie de l'étage onduleur.

Il en résulte un courant de défaut contenant l'ensemble de ces composantes :

- 150 Hz,
- fréquence de sortie du variateur,
- fréquence de modulation, ainsi que leurs harmoniques.

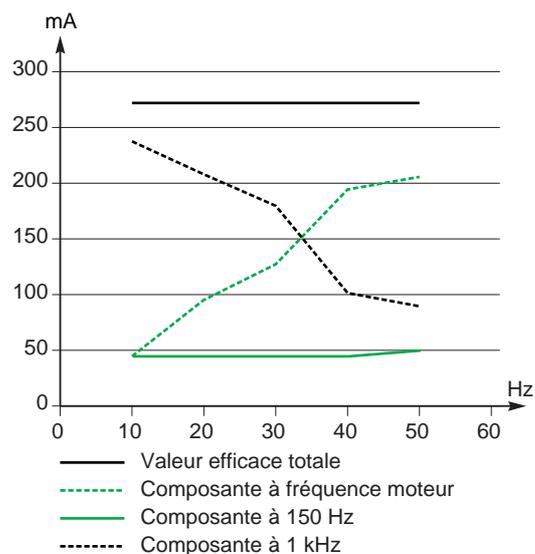
Son allure est représentée sur la **figure 38**. Ce courant de défaut contient également des courants HF évoqués dans les paragraphes précédents, mais négligés ici par souci de simplification des illustrations.



**Fig. 38** : courant de défaut en alimentation triphasée.

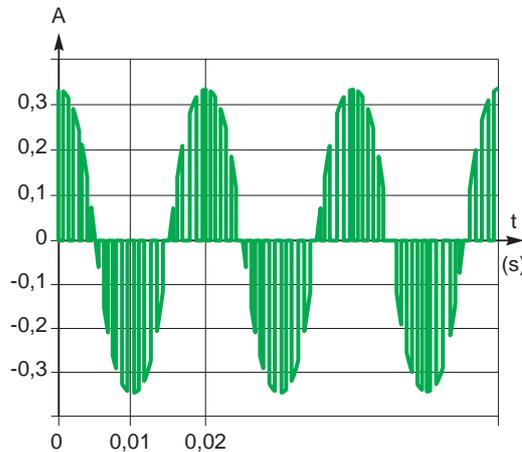
En fonction de la fréquence de fonctionnement du moteur, l'amplitude des différentes composantes évoluent comme illustré sur la **figure 39** :

- La valeur efficace du courant reste constante, ainsi que la composante à 150 Hz.
- Les composantes à la fréquence d'alimentation moteur et à la fréquence de la MLI varient de manière opposée l'une de l'autre.



**Fig. 39** : évolution des composantes du courant de défaut.

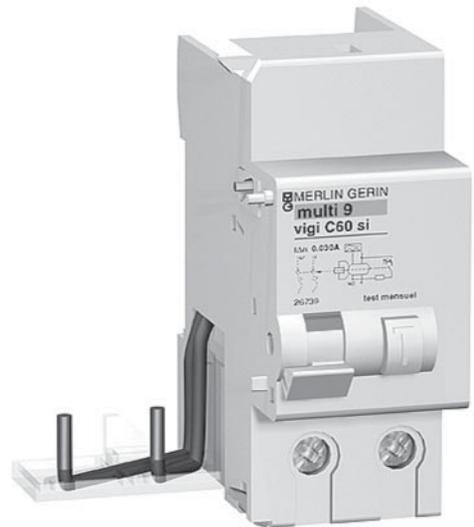
Dans le cas d'une alimentation monophasée, l'allure du courant de défaut est représentée sur la **figure 40**. A noter la présence d'une composante à 50 Hz et non pas à 150 Hz comme avec une alimentation triphasée.



**Fig. 40** : courant de défaut en alimentation monophasée.

### La solution

L'allure complexe du courant de défaut nécessite l'utilisation de DDR de type A (cf. **fig. 41**).



**Fig. 41** : exemple de DDR de type A adaptable à un disjoncteur BT (Bloc Vigi C60-300 mA - Merlin Gerin).

## 5.4 Défaut en sortie du variateur avec un schéma IT

### Fluctuation rapide de la tension réseau-terre

En régime IT, un défaut à la terre en sortie de variateur ne nécessite pas le déclenchement mais va provoquer une fluctuation rapide de la tension réseau par rapport à la terre.

En effet, contrairement au schéma TN, le potentiel du réseau n'est pas fixé, et va suivre les fluctuations imposées par la MLI. Ceci est illustré sur le schéma de la **figure 42**.

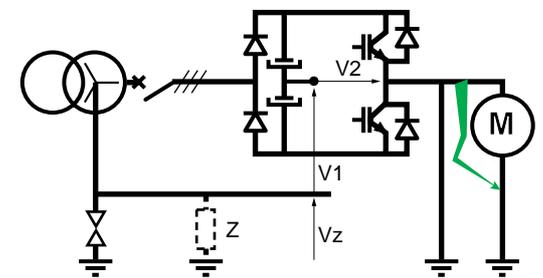
L'ensemble des récepteurs connectés au réseau est donc soumis aux mêmes fluctuations, incluant de forts gradients de tension (cf. **fig. 43**). Ces gradients peuvent entraîner la détérioration des filtres capacitifs connectés entre le réseau et la terre.

### Les solutions

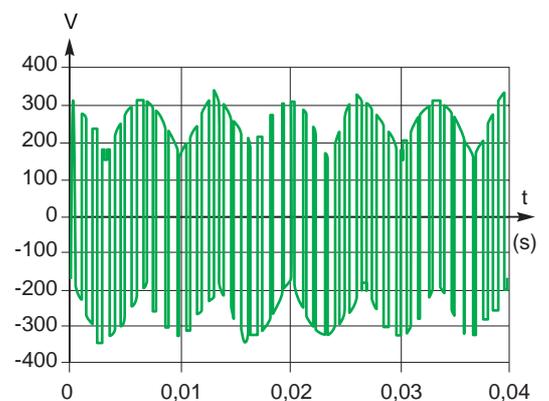
Pour améliorer la Compatibilité Electro-Magnétique, l'utilisation de filtres CEM est déconseillée sur les réseaux en schéma IT (cf. norme CEI 61800-3).

Lorsque la réduction des émissions HF est impérative, une solution convenable est de placer à l'entrée du variateur un filtre CEM sans liaison à la terre.

Pour éliminer le phénomène de fluctuation rapide de tension, l'installation d'un filtre « sinus » en sortie du variateur est préconisée : il élimine tout gradient élevé de tension appliqué au moteur et au câble d'alimentation.



**Fig. 42** : défaut terre en régime IT.

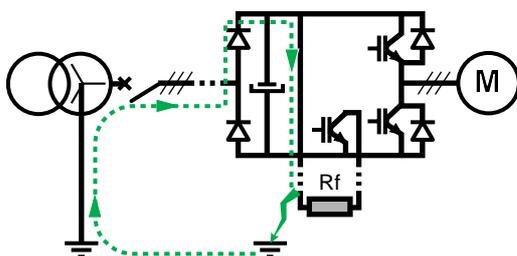


**Fig. 43** : fluctuation du potentiel ( $V_z$ ) du neutre du réseau.

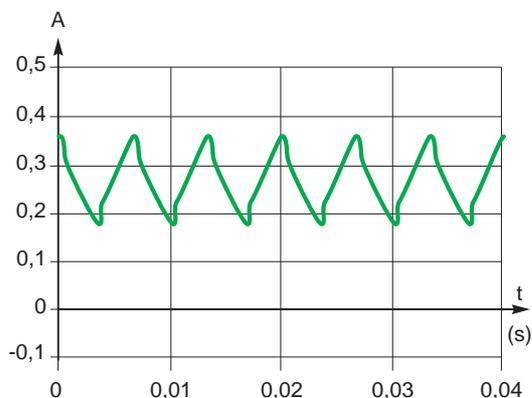
## 5.5 Courant de défaut à composante continue

### Description

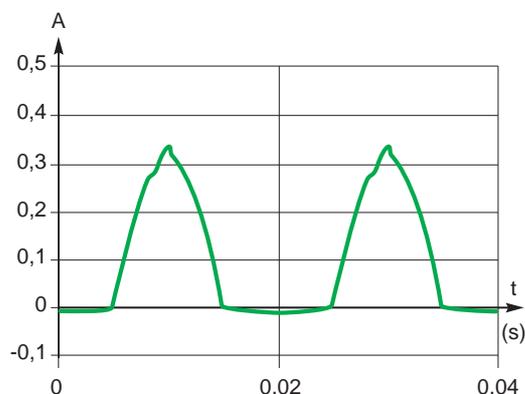
Les dispositifs usuels de protection sont adaptés à la mesure de courants de défaut alternatifs. Toutefois, les défauts d'isolement sur le bus DC du variateur ou sur le circuit de dissipation de l'énergie de freinage (fonction remplie par une résistance  $R_f$  habituellement extérieure aux variateurs) provoquent la circulation (cf. **fig. 44**) d'un courant à composante continue (cf. **fig. 45** avec une alimentation triphasée et cf. **fig. 46** avec une alimentation monophasée).



**Fig. 44** : défaut entre la résistance de freinage et la terre.



**Fig. 45** : courant en cas de défaut sur la résistance de freinage, pour une alimentation triphasée et une résistance de défaut égale à  $1\text{ k}\Omega$ .



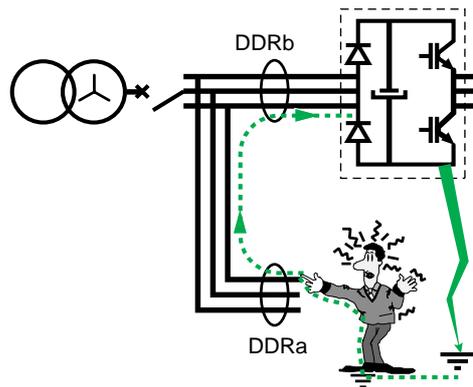
**Fig. 46** : courant en cas de défaut sur la résistance de freinage, pour une alimentation monophasée et une résistance de défaut égale à  $1\text{ k}\Omega$ .

### La solution

Malgré cette composante continue les dispositifs de protection doivent rester opérationnels. Si un défaut d'isolement est possible sur le bus DC, ou sur le circuit de la résistance de freinage, l'utilisation de DDR de type B est nécessaire lorsque le variateur est alimenté en triphasé. Lorsqu'il est alimenté en monophasé, un DDR de type A convient.

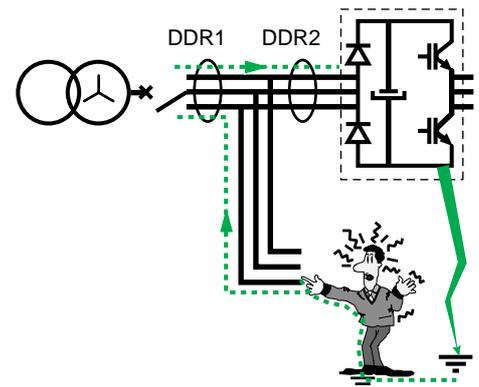
### Règle pratique d'association de DDR

- Dans le premier cas, avec un schéma IT, illustré par la **figure 47**, le courant de défaut est à composante continue. Le DDRa assurant la protection complémentaire contre le contact direct doit donc être sensible à ce type de courant.
- Dans le second cas (cf. **fig. 48**), deux DDR sont placés en cascade. En cas de défaut sur le bus DC, le courant de défaut peut être insuffisant pour faire déclencher le DDR2. Par contre, ce courant à composante continue peut être suffisant pour saturer le tore de mesure du DDR1, l'empêchant de déclencher sur un éventuel défaut survenant sur un autre départ.



**Fig. 47** : risque d'aveuglement du DDRa.

■ La règle est donc la suivante :  
 Si le courant de défaut peut avoir une composante continue, un DDR de type A ou B selon l'alimentation est nécessaire. Alors tous les DDR dans lesquels peut circuler ce courant doivent être de type identique A ou B.



**Fig. 48** : risque d'aveuglement du DDR1.

Cette condition doit être remplie en particulier :

- dans le cas où ces DDR sont placés en série,
- en schéma IT car les DDR peuvent être concernés par des défauts doubles se produisant sur différents départs.

## 6 Recommandations de choix et d'installation

A partir des principes :

- de mise en œuvre des dispositifs de protection de surintensités (court-circuit et surcharge) traités au chapitre 2,
- de protection des personnes objet du chapitre 3,

■ puis des phénomènes particuliers exposés dans le chapitre précédent, ce chapitre présente des recommandations pratiques répondant à la question : comment bien protéger un circuit comportant des variateurs de vitesse ?

### 6.1 Choix des DDR (cf. fig. 49)

|  | Protection...                                  |  |   |                |
|--|--|--|---|----------------|
|  | ... contre un contact indirect                 |  | ... contre un contact direct  |                |
| Alimentation                                     | Triphasée                                      |  | Monophasée  |                |
| Caractéristiques matérielles et d'installation   | Sans double isolement du bus DC                | Avec double isolement du bus DC            | Si une mesure de protection complémentaire est nécessaire en cas de risque de défaillance d'autres mesures de protection contre les contacts ou en cas d'imprudence des usagers (cf. normes d'installation) |                |
| SLT : TT (ou IT avec masses non interconnectées) | Type B, basse sensibilité ( $\geq 300$ mA)     | Type A, basse sensibilité ( $\geq 300$ mA) | Type A (30 mA), ou type B (30 mA) si la résistance de freinage est accessible   | Type A (30 mA) |
| SLT : TN-S                                       | Type A, basse sensibilité ( $\geq 300$ mA) [*] |  |   |                |
| SLT : IT   |  |  |   |                |

[\*] Le défaut d'isolement s'apparente à un court-circuit. Le déclenchement doit normalement être assuré par la protection contre les courts-circuits mais l'utilisation d'un DDR est recommandée en cas de risque de non déclenchement des protections à maximum de courant.

Fig. 49 : type de DDR en fonction du SLT et de la protection souhaitée.

#### Recommandations particulières :

- ne raccorder qu'un seul variateur par DDR,
- prévoir un DDR comme mesure de protection

complémentaire contre un contact direct lorsque la résistance de freinage est accessible.

### 6.2 Choix des CPI

Les CPI à injection de courant continu peuvent être « trompés » par un défaut présentant une tension continue entre réseau et terre. Selon la polarité de cette tension, le niveau d'isolement sera faussement amplifié ou abaissé.

Seuls des CPI à injection de courant alternatif peuvent donc être utilisés sur les réseaux alimentant, sans séparation galvanique, des équipements comportant des bus DC tels les variateurs de vitesse.

Cependant, en cas de défaut à la sortie d'un convertisseur de fréquence, la mesure d'isolement peut être faussée (cf. fig. 50).

En effet, le convertisseur se comporte comme une source de tension d'amplitude et fréquence

variable. Cette tension s'ajoute à la tension de mesure injectée par le CPI. Si la fréquence de cette tension est proche de la fréquence de mesure, la mesure est faussée.

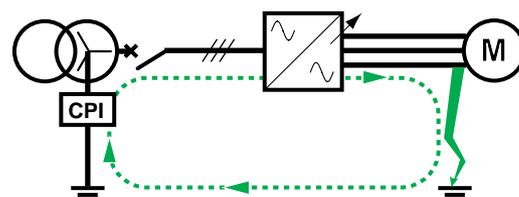


Fig. 50 : perturbation de la mesure du CPI.

## 6.3 Prévention des dysfonctionnements

Les perturbations évoquées dans les paragraphes précédents peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des protections. Pour une bonne continuité de service il est recommandé de suivre les indications ci-après.

### Précautions concernant les DDR

- Choisir un modèle adapté, intégrant :
  - un filtrage des courants HF,
  - une temporisation (évite tout déclenchement dû à la charge des capacités parasites à la mise sous tension). La temporisation n'est pas possible pour les appareils 30 mA. Dans ce cas choisir des appareils immunisés contre les déclenchements intempestifs, par exemple des DDR à immunité renforcée de la gamme **s.i.** (marque Merlin Gerin).
- Relever si possible le seuil de déclenchement en respectant les valeurs limites fixées pour la protection des personnes.

Ces précautions complètent les règles émises dans le sous-chapitre 5.5 concernant l'association des DDR.

### Précautions concernant les CPI

Choisir un modèle adapté :

- de type à injection de courant alternatif, ou
- à impulsions codées, permettant de s'affranchir de la fréquence de sortie du variateur.

### Précautions concernant l'installation

La mise en œuvre des convertisseurs doit se faire en conformité avec les normes EN 50178 et CEI 61800-3.

Certaines précautions supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires.

- Réduire autant que possible les capacités à la terre, pour cela :
  - éviter les câbles blindés quand l'environnement d'utilisation le permet,
  - réduire la longueur de câble entre variateur et moteur,
  - effectuer un câblage suivant les règles de l'art,
  - éviter les filtres CEM ou adopter des filtres avec faibles capacités (en particulier en régime IT) ,
- Réduire la fréquence de la MLI (réduction du nombre de commutations par seconde et donc réduction de la valeur efficace des courants HF),
- Répartir les variateurs sur plusieurs DDR (pour ne pas réunir les courants de fuite),
- Placer un filtre « sinus » en sortie de variateur (élimination des gradients de tension appliqués aux câbles),
- Utiliser un transformateur d'isolement et placer le DDR en amont (séparation du circuit perturbé par le variateur de son réseau d'alimentation).

# Bibliographie

## Normes « Produits »

- CEI 60479 : Guide des effets d'un courant passant à travers le corps humain.
- CEI 60755 : Règles générales relatives aux dispositifs de protection à courant différentiel résiduel.
- CEI 60947-2 : Appareillage à basse tension - Partie 2 : Disjoncteurs.
- CEI 61008, NF EN 61008-1 et 61008-2 : Interrupteurs automatiques à courant différentiel résiduel pour usages domestiques et analogues.
- CEI 61009, NF EN 61009-1 et 61009-2 : Disjoncteurs pour usages domestiques et analogues.
- CEI 61800-3 : Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 3 : Norme de produit relative à la CEM.
- NF EN 50178 : Equipement électronique utilisé dans les installations de puissance.
- UTE C 60-130 : Dispositifs de protection à courant différentiel résiduel.
- NF C 61-420 : Petits disjoncteurs différentiels.
- NF C 62-411 : Matériel de branchement et analogues, disjoncteurs différentiels pour tableaux de contrôle des installations de première catégorie.

## Normes « Installation »

- CEI 60364, NF C 15-100 : installations électriques à basse tension.

## Cahiers Techniques Schneider Electric

- Les Dispositifs Différentiels Résiduels en BT. R. CALVAS, Cahier Technique n° 114.
- Protection des personnes et alimentations statiques sans coupure. J-N. FIORINA, Cahier Technique n° 129.
- Les schémas de liaisons à la terre en BT (régimes de neutre). B. LACROIX et R. CALVAS, Cahier Technique n° 172.
- Les schémas de liaisons à la terre dans le monde et leurs évolutions. B. LACROIX et R. CALVAS, Cahier Technique n° 173.
- Perturbations des systèmes électroniques et schémas de liaisons à la terre. R. CALVAS, Cahier Technique n° 177.
- Le schéma IT (à neutre isolé) des liaisons à la terre en BT. F. JULLIEN et I. HERITIER, Cahier Technique n° 178.
- Coexistence courants forts - courants faibles. R. CALVAS et J. DELABALLE, Cahier Technique n° 187.



**Schneider Electric**

Direction Scientifique et Technique,  
Service Communication Technique  
F-38050 Grenoble cedex 9  
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60  
E-mail : fr-tech-com@mail.schneider.fr

Réalisation : AXESS - Valence (26).  
Edition : Schneider Electric

- 20 € -