

Michel Lambert

LES PLANS DE PROTECTION DES RÉSEAUX À HAUTE TENSION

Le traitement des défauts
d'isolement

DUNOD

Illustration de couverture : bjdlsx/istockphoto.com

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

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



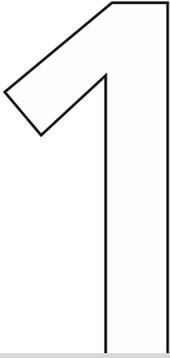
© Dunod, 2018

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077967-3

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

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



Généralités

Quel que soit l'événement initiateur, les plans de protection contre les défauts d'isolement doivent contribuer à des degrés différents :

- à la stabilité du réseau ;
- à la protection des personnes et des biens ;
- à la pérennité des matériels du réseau ;
- au maintien d'une bonne qualité de service au plus grand nombre d'usagers.

Ce chapitre présente les typologies des défauts d'isolement ainsi que les principes qui régissent leur élimination.

1.1 Les défauts d'isolement

Les défauts d'isolement affectant un ouvrage, une installation ou un matériel développent une énergie électrique qui dépend à la fois de la typologie du défaut, de l'impédance de la boucle de défaut et, suivant les cas, du régime du neutre. Un défaut d'isolement est le résultat de la rupture ou du contournement d'un isolant ayant pour origine :

- ▶ l'activité humaine ;
- ▶ le vieillissement des isolants, la présence de corps étrangers, la pollution, le givre et le sable ;
- ▶ les surtensions de manœuvre ou d'origine atmosphérique ;
- ▶ les surtensions temporaires excessives à la fréquence industrielle ;
- ▶ les contraintes thermiques importantes ;
- ▶ la défaillance mécanique d'un matériel ;
- ▶ les conditions d'exploitation anormales ;
- ▶ le non-respect des règles de l'art en matière d'insertion ;
- ▶ une politique de maintenance inadaptée.

1.1.1 Les typologies des défauts à la terre

Sur les lignes aériennes

Ces ouvrages sont fortement sollicités par les agressions externes. Les courts-circuits qui apparaissent sur les lignes électriques ont pour origine un contact direct ou indirect avec le sol ou encore le contournement d'un isolateur. Les défauts d'isolement peuvent avoir un caractère permanent. Il est alors nécessaire de mettre hors tension et de consigner l'ouvrage pour une remise en état. Dans le cas d'un contournement d'isolateur, le défaut peut disparaître naturellement ou nécessiter la mise hors tension momentanée de la ligne.

Les typologies de défaut sont pour l'essentiel :

- ▶ un contact ou un amorçage d'une phase avec la terre sans rupture de conducteur (figure 1.1a) ;
- ▶ la rupture du conducteur avec un contact à la terre côté source (figure 1.1b) ;
- ▶ la rupture du conducteur avec un contact à la terre côté charge (figure 1.1c).

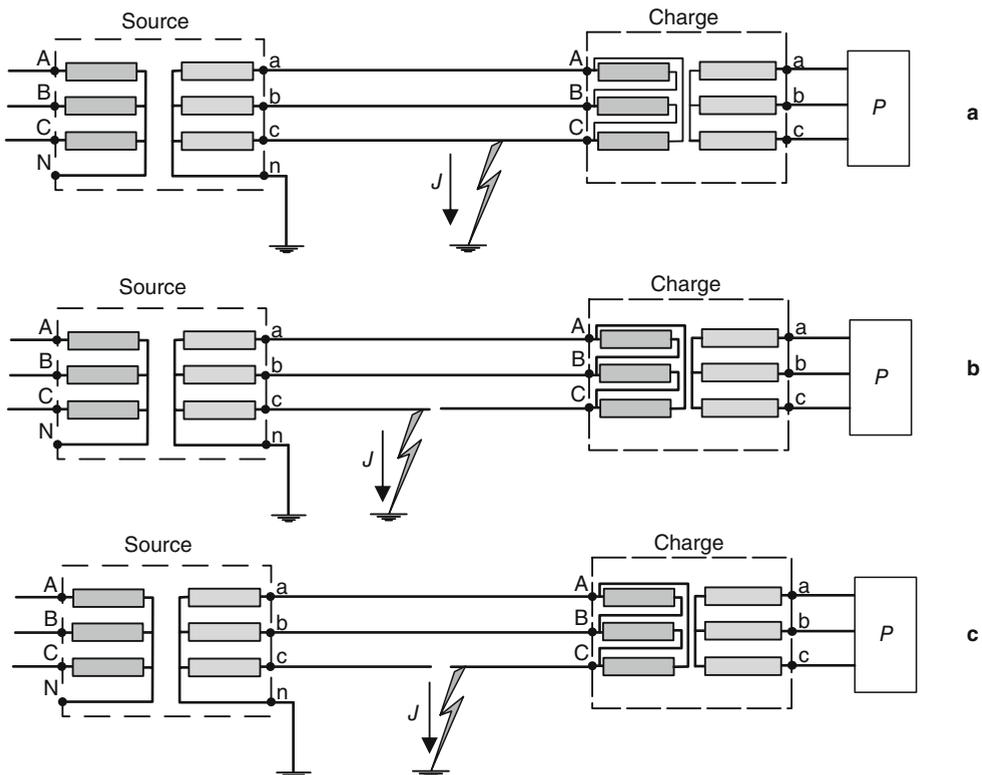


Figure 1.1 Typologie des défauts à la terre affectant une ligne aérienne.

1.1 Les défauts d'isolement

Pour une tension de service donnée et pour le même point de défaut, le courant de court-circuit dépend de plusieurs paramètres dont l'influence respective varie en fonction des autres. Les défauts correspondant aux figures 1.1a et 1.1b par exemple développent un courant de court-circuit qui dépend du régime du neutre, de l'impédance apparente du défaut et de la puissance de court-circuit. Selon le régime du neutre, l'influence des deux autres paramètres présente une importance relative.

- ▶ Si le régime du neutre est direct à la terre ou faiblement impédant, le courant de court-circuit varie en fonction de la résistance du défaut et de la puissance de court-circuit au point considéré.
- ▶ Si le régime du neutre est isolé, compensé ou fortement impédant, l'influence de la résistance de défaut ainsi que la puissance court-circuit sont modérées voire inexistantes.

Par ailleurs, l'examen de la répartition statistique des résistances de défaut affectant les réseaux HTA de distribution publique montre que 90 % des défauts ont des résistances comprises dans l'intervalle [5 Ω ; 200 Ω].

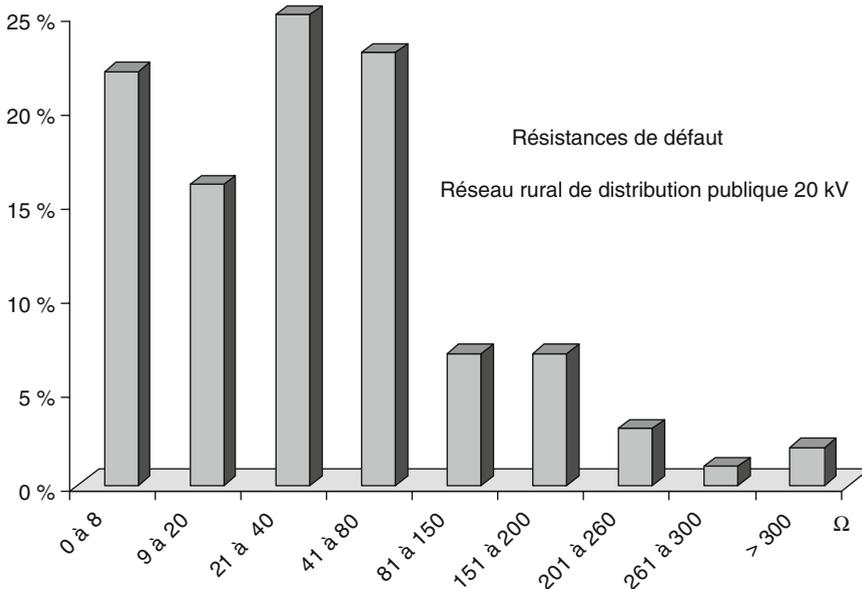


Figure 1.2 Exemple de répartition statistique des résistances de défauts.

Il existe toutefois des cas où la résistance du défaut peut être très supérieure à ces valeurs. Dans ces conditions, un défaut très résistant est de nature à rendre marginales l'influence de la puissance de court-circuit et celle du régime du neutre.

Dans le cas de la figure 1.1c, le courant de défaut dépend du schéma des liaisons à la terre de la charge en aval du défaut et de la puissance absorbée par celle-ci. Dans l'exemple, l'intensité dans le défaut serait sensiblement égale à

$$J = \frac{P}{9U} \sqrt{3}$$

Pour $P = 100$ kW et $U = 20$ kV, $J = 0,96$ A.

L'influence du régime de neutre du réseau et de la puissance de court-circuit est alors inexistante. Ce type de défaut dont la résistance apparente est parfois supérieure à $10\,000\ \Omega$ est dangereux pour les personnes par le fait qu'il est difficilement détectable. Sur les réseaux publics comportant de l'aérien, il nécessite la mise en œuvre d'un plan de protection complémentaire particulièrement sensible.

Sur les réseaux publics aériens, les défauts d'isolement sans rupture de conducteur sont les plus nombreux. Les défauts fugitifs ou semi-permanents représentent 80 % des défauts à la terre. C'est la raison pour laquelle les exploitants des réseaux publics équipent les lignes aériennes d'automatisme de réenclenchement.

Sur les matériels protégés

Ces matériels sont pour l'essentiel :

- ▶ les câbles souterrains ;
- ▶ les transformateurs ;
- ▶ les groupes de production et les moteurs électriques ;
- ▶ les condensateurs ;
- ▶ les inductances isolées dans un diélectrique ;
- ▶ les tableaux protégés HTA ;
- ▶ les postes sous enveloppe métallique HTB ou THT.

Les défauts qui affectent leur isolement ont lieu entre les phases et la masse du matériel¹. De ce fait, l'écran ou la carcasse est fortement sollicité par le court-circuit avec les conséquences que l'on peut imaginer. Ces défauts, qui ont un caractère permanent, nécessitent toujours l'intervention sur place de l'exploitant et souvent des réparations longues et coûteuses. La rupture d'un conducteur est un événement rare. Cela peut survenir sur les câbles souterrains arrachés par les engins de terrassement ou lors d'un coup de pioche malheureux.

¹ La masse de l'appareil est bien entendu reliée à la terre.

On peut considérer que les défauts à la masse affectant les matériels protégés sont faiblement résistants, de ce fait l'énergie développée dans le défaut dépend principalement du régime de neutre. La puissance de court-circuit n'intervient que sur les réseaux exploités avec un neutre direct à la terre ou faiblement impédants.

1.1.2 Les typologies des défauts polyphasés

Pour ces défauts, il n'y a pas lieu de faire la distinction entre les lignes aériennes et les matériels protégés.

Les typologies les plus courantes sont représentées dans la figure 1.3.

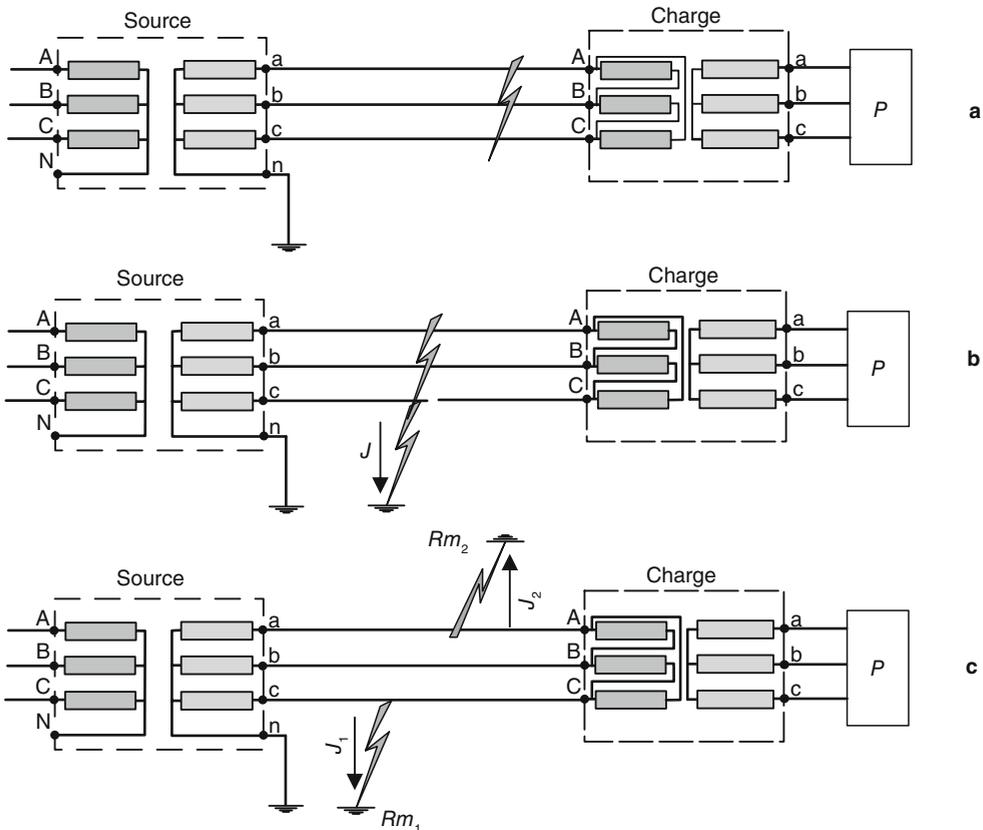


Figure 1.3 Typologie des courts-circuits polyphasés.

- ▶ figure 1.3a : court-circuit entre plusieurs phases sans contact avec la terre ;
- ▶ figure 1.3b : court-circuit entre plusieurs phases et une même terre locale ;
- ▶ figure 1.3c : courts-circuits monophasés avec des phases et des terres locales distinctes.

Les simples courts-circuits polyphasés

Un court-circuit polyphasé affecte plusieurs phases. Un tel défaut est caractérisé par une impédance de boucle qui dépend de la résistance du défaut et de la puissance de court-circuit du réseau au point de défaut. La résistance du défaut ayant un caractère aléatoire et étant généralement de faible valeur, celle-ci n'est en principe pas prise en compte pour le calcul des réglages des protections. Il existe toutefois une typologie de défauts affectant plusieurs phases qui présentent une résistance susceptible d'être importante. Ce sont les doubles ou triples défauts monophasés (figure 1.3c).

Les courts-circuits polyphasés et la terre

Les courts-circuits triphasés à la terre

Il est peu probable qu'un court-circuit triphasé avec la terre puisse être fortement déséquilibré. De ce fait, le courant de défaut à la terre est normalement négligé.

Les courts-circuits biphasés à la terre

Un court-circuit entre deux phases et la terre (figure 1.3b) est à la fois un défaut polyphasé et un défaut à la terre.

On appelle I_{k_1} , le courant de défaut à la terre dans le cas d'un court-circuit monophasé. $I_{k_{E2E}}$ est le courant de défaut à la terre dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre. La valeur F du courant de défaut à la terre dépend du facteur F de mise à la terre (chapitre 4) et donc du régime du neutre.

Les composantes symétriques sont présentées au chapitre 2.

$$\text{Avec } Z_d = Z_i, R_m = 0 \text{ et } F = \frac{Z_o}{Z_d}$$

$$I_{k_1} = \frac{3V_n}{2 \cdot Z_d + Z_o} = \frac{3V_n}{Z_d \times \left(2 + \frac{Z_o}{Z_d}\right)} = \frac{3V_n}{Z_d \times (2 + F)}$$

$$I_{k_{E2E}} = \frac{3 \cdot V_n}{Z_d \times (Z_d + 2 \cdot Z_o)} = \frac{3V_n}{Z_d \times \left(1 + 2 \times \frac{Z_o}{Z_d}\right)} = \frac{3V_n}{Z_d \times (1 + 2 \cdot F)}$$

$$\frac{I_{k_{E2E}}}{I_{k_1}} \approx \frac{2 + F}{1 + 2 \cdot F}$$

- ▶ pour $F = 0,2$, $I_{k_{E2E}} = 1,57 \cdot I_{k_1}$;
- ▶ pour $F = 1$, $I_{k_{E2E}} = I_{k_1}$;
- ▶ pour $F = 3$, $I_{k_{E2E}} \approx 0,7 \cdot I_{k_1}$;

1.1 Les défauts d'isolement

- ▶ pour $F > 2$, $I_{k_{E2E}} < I_{k_1}$;
- ▶ pour $F > 20$, $I_{k_{E2E}}$ tend vers $I_{k_1}/2$.

On peut de la même manière déterminer le rapport $I_{k_{E2E}}/I_{k_3}$ avec $I_{k_3} = Vn/Zd$ où I_{k_3} est le courant de défaut triphasé. La figure 1.4 montre que les valeurs relatives des courants de défaut dépendent du facteur de mise à la terre.

■ Pour $F < 1$, le courant de défaut monophasé est supérieur au courant de défaut triphasé.

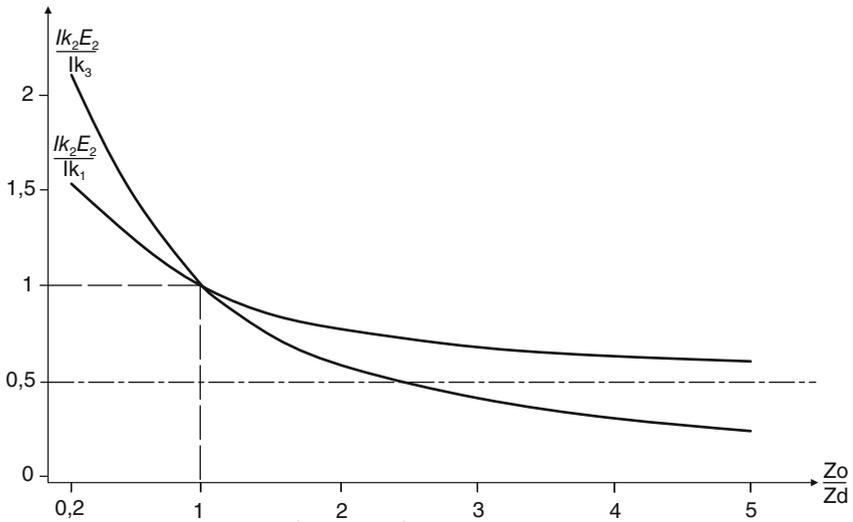


Figure 1.4 Variation $\frac{I_{k_{E2E}}}{I_{k_1}}$ et $\frac{I_{k_{E2E}}}{I_{k_3}}$ en fonction du facteur de mise à la terre.

1.1.3 Les doubles défauts monophasés

Les défauts doubles ou doubles défauts monophasés, qui affectent deux phases d'un même réseau, sont des défauts consécutifs ou évolutifs. Sur un réseau ayant un facteur de mise à la terre¹ Z_0/Z_d supérieur à 3, un « défaut double » a pour origine un premier court-circuit monophasé. Ce défaut développe des surtensions temporaires, en mode commun et à la fréquence industrielle susceptibles par leur amplitude de provoquer, si l'isolement est insuffisant, des amorçages entre les autres phases et la terre. Pour de tels facteurs de mise à la terre, la « tenue 50 Hz » des ouvrages par rapport à la terre doit être définie pour la

¹ Le sujet est présenté dans le livre *Les Régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre*, 2^e éd., M. Lambert, Dunod, Paris, 2011.

tension composée¹. Les défauts doubles peuvent affecter un même ouvrage (un jeu de barres par exemple), différents matériels d'une même ligne ou des ouvrages distincts (figure 1.5). Les défauts doubles sont non seulement dangereux pour les personnes et les animaux mais également destructeurs pour les biens. En effet, les montées en potentiel des prises de terre qui en découlent dépendent plus du rapport des résistances de défaut que du régime de neutre. La figure 1.7 illustre le mécanisme de production des montées en potentiel des prises de terre.

Ce type de défaut ne doit pas être confondu avec un défaut polyphasé à la terre mais plutôt comme un défaut polyphasé résistant ou comme plusieurs défauts monophasés affectant simultanément des phases différentes. Les courants de défaut à la terre dépendent essentiellement de la somme et du rapport des résistances Rm_1 et Rm_2 , leur valeur peut être inférieure au seuil de détection des protections ampèremétriques de phase (code ANSI 51) ; c'est la raison pour laquelle la détection des défauts doubles est confiée aux protections ampèremétriques homopolaires (Code ANSI 51N ou 51G).

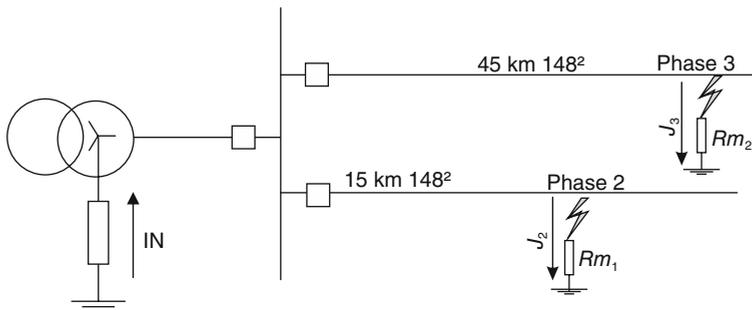


Figure 1.5 Doubles défauts monophasés.

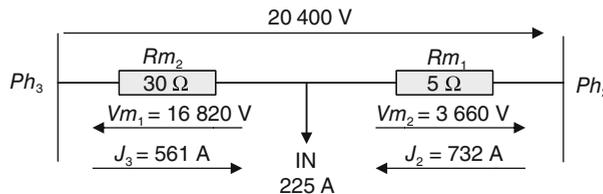


Figure 1.6 Grandeurs électriques développées par un défaut double.

Remarque : À l'exception des réseaux comportant des autotransformateurs, les conditions d'apparition d'un défaut double ne peuvent être réunies que sur un réseau de tension homogène. En effet, les transformateurs ne transmettent pas les déséquilibres homopolaires. Pour autant, un défaut double qui affecterait un

¹ 24 kV pour les réseaux 20 kV.

1.2 Les aspects réglementaires

réseau 20 kV alimenté par un transformateur 62 500 V/21 000 V se traduirait par une surintensité dans les systèmes direct et inverse. Un défaut monophasé sur le réseau 63 kV ne peut en aucun cas provoquer un défaut double sur le réseau 20 kV. S'il apparaît un défaut monophasé sur un réseau 20 kV comportant un autotransformateur 20 kV/15 kV, il est possible qu'il se produise un défaut double sur la partie 15 kV surtout si celle-ci est isolée 17,5 kV au lieu de 24 kV.

Les doubles défauts monophasés n'apparaissent que sur les réseaux exploités avec un neutre impédant, compensé ou isolé. Dans ces conditions, un réseau 15 kV alimenté par un autotransformateur 20 kV/15 kV doit être isolé pour une tension de 24 kV.

1.2 Les aspects réglementaires

1.2.1 Les défauts polyphasés

Compte tenu de l'importance de l'énergie développée par un défaut polyphasé, il n'est pas envisageable de maintenir sous tension un ouvrage ou une installation en défaut. L'exploitant a l'obligation de mettre en œuvre les moyens les plus performants pour détecter et traiter rapidement tout défaut d'isolement affectant plusieurs phases du réseau.

Le plan de protection doit être en capacité d'éliminer rapidement tout court-circuit polyphasé apparaissant sur le réseau.

1.2.2 Les défauts avec la terre

Cas général

Lorsque la partie active d'un ouvrage à haute tension est soumise à un défaut d'isolement par rapport à la terre ou à la masse, il est impératif que le traitement du défaut soit conforme aux obligations de sécurité concernant les biens et les personnes. La règle qui prévaut généralement consiste à réaliser d'une manière automatique la mise hors tension de l'ouvrage en défaut. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte les limites imposées par la métrologie qui ne permet pas de détecter un défaut lorsqu'il est très résistant¹. Dans la suite de l'ouvrage on conviendra qu'un défaut franc est un court-circuit qui est détecté par le plan de protection principal ; un défaut résistant est détecté uniquement

¹ Cas d'un conducteur tombé côté charge par exemple (figure 1.1c).

par le plan de protection complémentaire ; un défaut très résistant n'est pas détectable d'une manière automatique.

L'exploitation du réseau à défaut maintenu

Par dérogation l'exploitant peut être autorisé à assurer la continuité de la fourniture d'électricité avec un défaut à la terre maintenu sous réserve de respecter les conditions fixées par le législateur. Ce mode d'exploitation présente un intérêt économique par le fait que la continuité de la production industrielle est assurée. Il faut cependant que les modalités d'exploitation puissent être validées.

À titre indicatif, l'exploitation d'un réseau ou un élément de réseau avec un défaut maintenu peut être autorisé si :

- ▶ la sécurité des personnes¹ est garantie par la suppression des risques d'électrisation. Les tensions de contact à l'endroit du défaut et la tension de pas dans l'environnement de celui-ci ne doivent excéder les limites autorisées par la réglementation (50 V efficace en France par exemple) ;
- ▶ l'énergie développée dans le défaut doit être limitée à une faible valeur² ;
- ▶ le défaut doit être détecté et signalé d'une manière automatique ;
- ▶ le défaut doit être localisable dans les meilleurs délais ;
- ▶ l'avarie ne doit pas pouvoir évoluer³ en défaut polyphasé du fait de l'apparition des surtensions temporaires à la fréquence industrielle produites par l'événement initiateur.

Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, la mise hors tension automatique de l'ouvrage ou de l'installation en défaut s'impose.

Il faut noter que certains pays excluent l'exploitation à défaut maintenu des réseaux aériens (c'est le cas de la France pour l'instant).

Dans tous les cas, l'exploitation à défaut maintenu doit respecter le cadre de cohérence fixé par le législateur en matière de sécurité électrique.

1.3 Présentation d'un plan de protection

Le choix des moyens qui doivent être mis en œuvre pour obtenir un plan de protection contre les défauts d'isolement dépend à la fois du coût et de la position

¹ La norme CEI 479-1 est le document de référence en matière de sécurité électrique.

² On comprend aisément que le maintien d'un défaut est incompatible sur un réseau exploité avec un neutre direct à la terre ou faiblement impédant.

³ L'isolement en mode commun du réseau doit être garanti et conforme aux spécifications.

1.3 Présentation d'un plan de protection

stratégique des ouvrages ou des installations, de leur exposition aux contraintes ainsi que des impératifs d'exploitation notamment en matière de sûreté et de sécurité. Définir un plan de protection revient à en fixer les contours. Les dispositions qui sont prises doivent être sûres et durables.

1.3.1 Les principes généraux

Il faut distinguer les protections des plans de protection. **Une protection** est un composant matériel ou logiciel du **plan de protection du réseau**. Une protection est aujourd'hui représentée par une fonction incluse dans un équipement. Dans la suite de l'ouvrage on l'appellera « protection », « équipement de protection » ou « automate de protection ». Une protection est constituée physiquement d'un équipement alimenté par des capteurs appelés également « réducteurs de mesure ou transformateurs de mesure ». Une protection est le plus souvent sensible à un critère directement mesurable. Il existe cependant quelques cas où la protection est conçue pour être sensible au phénomène physique produit par un événement initiateur. C'est le cas par exemple du relais Buchholz sensible au mouvement d'huile produit dans un transformateur par la décomposition du diélectrique sous l'effet d'un arc électrique.

Un automate de protection peut supporter une ou plusieurs fonctions codifiées dans la norme¹ IEEE/ANSI 37-2.

Le code ANSI décrit à la fois la fonction d'une protection et son logiciel. C'est ainsi qu'un automate prévu pour fonctionner pour un dépassement de seuil intensité sera représenté par le code 50 si son fonctionnement est instantané et 51 si son fonctionnement est temporisé. Lorsque l'automate est alimenté par un tore homopolaire, son code sera 51G ; s'il est alimenté par la sommation des trois intensités d'une ligne, il sera codifié 51N.

Le rôle des transformateurs de mesure (TC, TT) consiste à fournir à l'automate et en temps réel des grandeurs analogues et proportionnelles aux grandeurs électriques du réseau. L'automate assure le traitement de ces grandeurs et, lorsque les limites sont atteintes, commande le système d'alerte et éventuellement la mise hors tension de l'ouvrage en défaut suivant un processus défini et configuré par l'exploitant. Certaines fonctions élémentaires peuvent être prévues pour échanger des informations afin de constituer un système logique ou analogique de protection.

La performance d'une protection ou d'un système de protection a une limite imposée par la métrologie et la technologie employée. Pour atteindre le niveau de performance souhaité, il est souvent utile d'associer, d'une manière cohérente, plusieurs dispositifs dans un ensemble appelé plan de protection.

¹ American National Standards Institute.