

# ELECTRICITÉ

## Installations basse tension – Norme NF C 15-100 Principes fondamentaux pour la protection contre les courts-circuits (1)

par A. DUMORA, ingénieur I.E.G., ingénieur à l'apave normande

### SOMMAIRE

#### 1<sup>re</sup> Partie

1. INTRODUCTION
2. LES DIFFÉRENTS SCHÉMAS INDUSTRIELS
  - 2.1. Installations en schéma TT
  - 2.2. Installations en schéma TN
  - 2.3. Installations en schéma IT
  - 2.4. Choix d'un régime de schéma TT, TN ou IT
3. LES DIFFÉRENTES RÈGLES DE LA NORME
  - 3.1. La règle du pouvoir de coupure
  - 3.2. La règle de coupure en 5 secondes

#### 2<sup>e</sup> Partie

4. LES DIFFÉRENTS DÉFAUTS POSSIBLES - PRINCIPE DE PROTECTION (études de cas)
  - 4.1. Les défauts en têtes de ligne
  - 4.2. Les défauts en bout de ligne
5. INCIDENCE DE LA POSE JOINTIVE OU SÉPARÉE DU CONDUCTEUR DE PROTECTION
6. SECTION DE TERRE AU NIVEAU DU TRANSFORMATEUR
7. LES PROTECTIONS RETARDÉES - RESPECT D'UNE CONTRAINTE THERMIQUE DE CANALISATION

\*\*

## 1. Introduction.

Un réseau électriquement sain est surveillé en permanence par ses protections de surcharge qui limitent le débit en puissance appelée vis-à-vis de ce que peut fournir ses sources, les transformateurs et les groupes générateurs, et ses artères, les canalisations.

Les protections contre les courts-circuits n'agissent qu'en cas de maladie du réseau de distribution.

Elles ont pour mission d'éliminer un défaut de forte intensité pouvant se produire accidentellement dans le réseau de façon à éviter les risques de détérioration de l'appareillage ou les risques d'incendie.

Les détériorations, généralement observées dans les installations, apparaissent :

- soit au niveau de la protection en tête de ligne d'un départ :
  - soudure des contacts d'un disjoncteur avant ouverture,
  - carbonisation totale ou partielle de la protection et de son environnement,
  - détérioration des organes de détection ou de coupure de défaut;
- soit sur le parcours de la distribution d'une ligne :
  - détérioration d'un câble sur non sollicitation de la protection aux courts-circuits par manque de protection adaptée ou par réglage trop élevé,
  - destruction de jeux de barres par effets électrodynamiques.

(1) Extrait de la Normandie Industrielle, n° 121 et 122.

Photo masquée. Elle était de trop mauvaise qualité

Photo 1  
Le tableau

Photo 2  
L'intérieur du tableau

Photo 3  
Les vêtements

Dans de pareils cas, la protection mise en place ne remplit pas sa fonction laissant la possibilité de voir se développer des échauffements localisés et d'éventuels risques d'incendie dans l'entreprise.

La nouvelle norme NFC 15-100 (1) indique les différentes règles à respecter dans la réalisation d'une installation électrique, pour réduire ces risques :

- la règle du pouvoir de coupure pour les défauts en tête de ligne ;
- la règle du temps de coupure ou de sollicitation des protections pour les défauts en bout de ligne.

Le présent article décrit l'esprit et l'utilisation de ces règles dans les différents schémas utilisés dans les entreprises.

## 2. Les différents schémas industriels.

Le choix d'un régime de neutre pour une installation industrielle dépend des conditions de fonctionnement admises par l'exploitation des unités de fabrication et de production.

Les installations d'habitations, des magasins, des usines de moindre impératif peuvent admettre une coupure au premier défaut, de même que l'ensemble des réseaux d'éclairage ou de prises de courant de la majorité des installations industrielles réalisées avec une subdivision et sélectivité convenable.

Par contre, les unités présentant des impératifs importants ne peuvent être envisagées que pour une coupure au deuxième défaut (ordinateur, relaiage ou force motrice présentant des risques ou des coûts importants en cas de coupure d'alimentation).

Les modes de distribution d'une installation se répartissent sur trois schémas possibles :

- schéma TT : schéma mise à la terre du neutre ;
- schéma TN : schéma mise au neutre des masses ;
- schéma IT : schéma neutre isolé ou impédant.

La première lettre indique la liaison électrique entre le point neutre et la terre au niveau du transformateur :

- T, pour neutre mis à la terre ;
- I, pour neutre isolé ou impédant.

La deuxième lettre indique la liaison électrique entre les masses d'utilisation et la terre ou le conducteur neutre :

- T, pour mise à la terre des masses ;
- N, pour mise au neutre des masses.

(1) Homologation de la norme, le 29 juillet 1977. Application industrielle, le 1<sup>er</sup> octobre 1977 aux installations neuves.

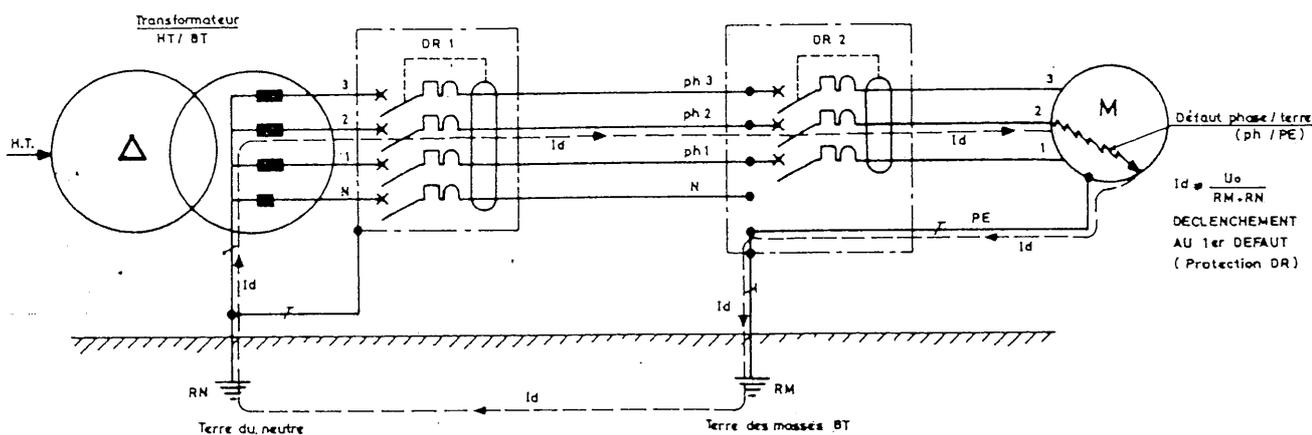


Fig. 1. — Défaut terre en schéma TT (RM et RN séparées)

### 2.1. Schéma TT : mise à la terre.

Ce schéma est utilisé dans les entreprises ne présentant pas ou peu d'impératif de production (magasin, tertiaire, petite ou moyenne entreprise, habitation, branchement E.D.F. basse tension, branchement provisoire ou de chantier, réseau d'éclairage ou de prises de courant).

Le point neutre du transformateur est relié directement à la terre (RN).

Les masses d'utilisation sont reliées à une prise de terre (RM) séparée ou non de la première (RN).

Tout défaut électrique sollicite une protection, permettant une élimination au 1<sup>er</sup> défaut et une réparation rapide par l'équipe d'entretien.

La protection sur défaut terre est assurée par une ou plusieurs protections différentielles DR.

Solution n° 1 : terre des masses et terre du neutre séparées (fig. 1).

Il s'agit du branchement usuel de basse tension

utilisé par l'E.D.F. pour alimenter les habitations, les petits magasins, les petites entreprises.

Le transformateur est dans ce cas la propriété de l'E.D.F. qui fixe le régime de neutre.

En cas de défaut phase-terre, le courant de défaut, Id, traverse un conducteur de phase, un conducteur de protection et les deux prises de terre RM et RN :

$$I_d \neq \frac{U_o}{R_M + R_N}$$

(de l'ordre de dizaines d'Ampères).

Le courant de défaut est éliminé par la protection différentielle DR2 (seuil 30 ou 300 mA).

Solution n° 2 : terres des masses et du neutre interconnectées (fig. 2).

Ce schéma est utilisé dans les entreprises de moindre impératif de production, lorsque le transformateur est la propriété de l'industriel.

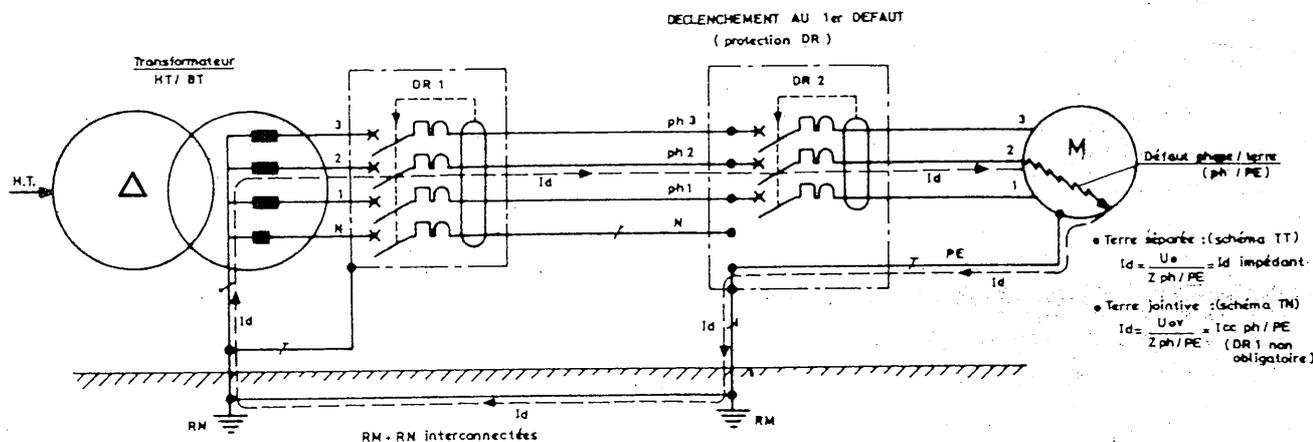


Fig. 2. — Défaut terre en schéma TT (RM et RN interconnectées)

En cas de défaut phase-terre, le courant de défaut,  $I_d$ , traverse une boucle de défaut constituée par le conducteur de phase, le conducteur de protection et le conducteur de terre d'interconnexion des deux prises de terre :

$$I_d = \frac{U_0}{Z_{ph/PE}}$$

$Z_{ph/PE}$  étant l'impédance de la boucle de circulation du courant de défaut phase-terre.

Le courant de défaut est éliminé par la protection différentielle DR2 (seuil 30 ou 300 mA).

Le rôle des protections différentielles dans ces deux schémas est très important. Cette protection permet d'éviter la montée en potentiel des masses et éliminer les défauts phase-terre qui ne peuvent être surveillés par une protection de court-circuit traditionnelle (fusibles ou disjoncteur).

Ce mode de protection DR doit être établi sur un réseau convenablement subdivisé et doit respecter des règles de sélectivité par étage sous peine de nuire à la production et à la recherche des défauts.

## 2.2. Schéma TN : schéma mise au neutre des masses.

Ce schéma est très employé en Allemagne et apparaît en France par les normalisations européennes.

Il est réservé aux industries alimentées par un transformateur HT/BT dont le choix du régime de neutre est laissé à l'usage de l'exploitant.

Les transformateurs de couplage étoile-étoile ne peuvent être retenus pour ces installations.

Ce mode de distribution de l'énergie nécessite

une subdivision et une sélectivité des protections de courts-circuits particulièrement bien adaptée.

Il existe deux possibilités de câblage pour ce mode de distribution :

- les conducteurs neutre et de protection sont confondus (schéma TN-A);
- les conducteurs neutre et de protection sont distincts (schéma TN-B).

Le schéma TN-A est interdit en risque d'incendie ou d'explosion, de même que pour l'utilisation de câbles souples ou mobiles et des canalisations de section inférieure à  $10 \text{ mm}^2$  (cuivre) ou  $16 \text{ mm}^2$  (aluminium).

Dans ces cas d'utilisation, le câblage en schéma TN-B doit être utilisé.

Le point neutre du transformateur et les masses d'utilisation sont reliés à la même prise de terre (RN + RM).

Tout défaut électrique sollicite une protection de court-circuit, permettant une élimination au 1<sup>er</sup> défaut lorsque les impédances de boucle de défaut sont convenablement déterminées.

L'élimination du défaut terre est assurée par les protections de court-circuit en place (fusibles ou disjoncteurs).

La pose du conducteur de protection (PE) doit être impérativement jointive aux conducteurs de phase (câbles multipolaires conseillés).

En cas de défaut phase-terre, le courant de défaut,  $I_d$ , est un courant de court-circuit monophasé.

Le courant  $I_d$  est généré par la tension simple,  $U_0$  et il parcourt la boucle de défaut constitué par un conducteur de phase et le conducteur de protection (PE ou PEN).

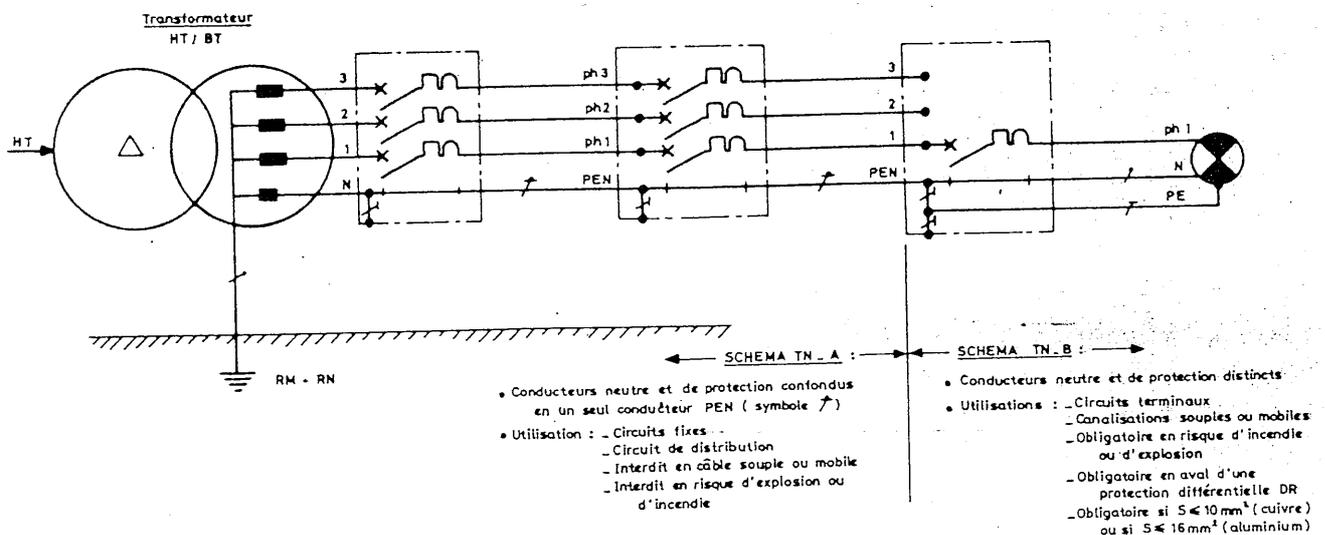


Fig. 3. — Deux schémas TN : TN-A ou TN-B

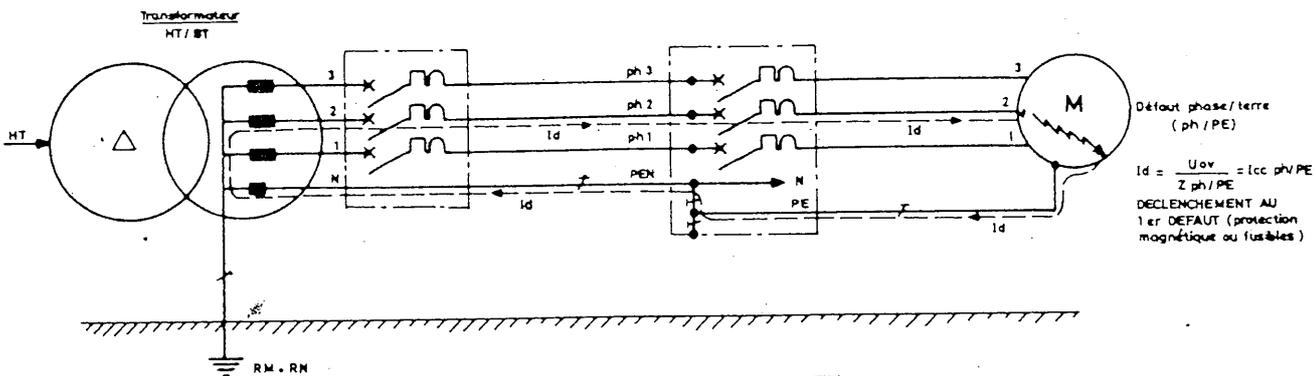


Fig. 4. — Défaut terre en schéma TN

$$I_d = \frac{U_o \text{ à vide}}{Z_1 \text{ Tr} + (Z_{\text{phase}} + Z_{\text{PE ou PEN}}) \text{ canalisations}}$$

- $Z_1 \text{ Tr}$  = impédance monophasée du transformateur
- $Z_{\text{phase}}$  = impédance du pôle de phase
- $Z_{\text{PE ou PEN}}$  = impédance du pôle de protection (PE ou PN)
- $U_{ov}$  = tension simple à vide du transformateur

Ce défaut phase-terre doit être éliminé par la protection de court-circuit du départ en défaut (fusibles ou protection magnétique).

Une protection différentielle, DR, complémentaire peut assurer cette élimination en schéma TN-B exclusivement (conducteur de protection et conducteur neutre distincts).

### 2.3. Schéma IT : schéma neutre isolé ou impédant.

Ce schéma est très employé en France dans les entreprises ayant d'importants impératifs de production.

Il est vivement conseillé dans un tel schéma d'éviter de distribuer le conducteur neutre.

Ce type de schéma demande une équipe d'entretien compétente pouvant réaliser une surveillance périodique du réseau et un entretien préventif de l'appareillage.

- Lors d'un premier défaut d'isolement phase-terre, il apparaît un faible courant de circulation de quelques milliampères. Ce courant de circulation est limité par l'impédance de mise à la terre du neutre du transformateur et par les impédances de fuite du réseau B.T.

Le contrôleur permanent d'isolement (CPI) signale le défaut par un signal sonore et lumineux en un lieu régulièrement fréquenté par le personnel d'entretien.

Il est alors impératif et obligatoire d'éliminer ce premier défaut dans les plus brefs délais, au sens du décret du 14 novembre 1962 relatif à la « protection des travailleurs contre les courants électriques ».

- Si ce premier défaut signalé n'est pas éliminé, il peut se produire un deuxième défaut dont l'effet est difficilement contrôlable et dangereux pour l'exploitation et le personnel :

- déclenchement simultané et intempestif de départs,
- risques de non sollicitation des protections aux courts-circuits sur les lignes impédantes (ligne longue ou de faible section),

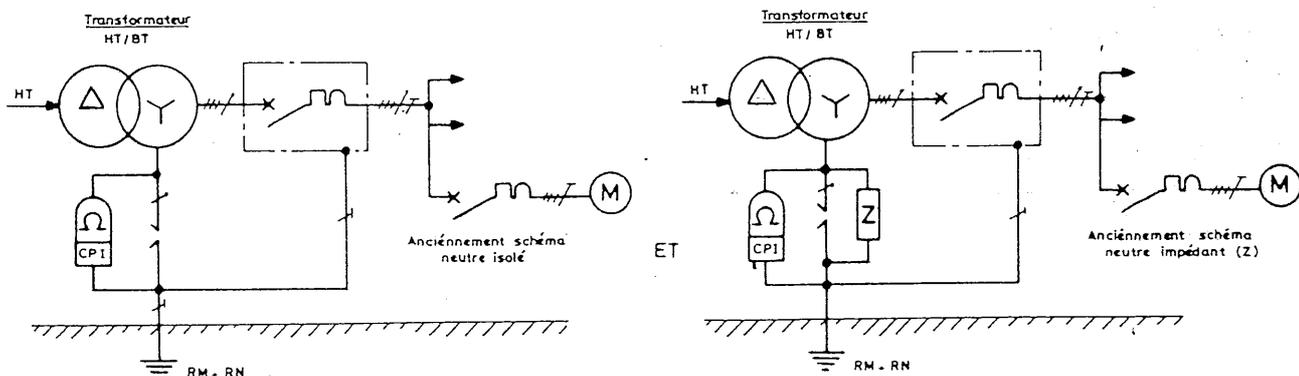


Fig. 5. — Un seul schéma IT : Schémas neutre isolé et neutre impédant

- risques d'incendie,
- risques d'électrocution.

Nous distinguerons par la suite deux schémas :

- schémas IT-SN : schéma IT sans aucun conducteur neutre distribué,
- schémas IT-AN : schéma IT avec au moins un conducteur neutre distribué.

Observations du schéma IT-SN (fig. 6) :

Lors d'un double défaut phase-phase-terre (Ph/Ph/PE), le défaut est alimenté par la tension entre phases.

Le courant de défaut circule dans deux phases (phases 1 et 2 par exemple) puis se reboucle par le conducteur de protection (PE) :

$U_v$  = tension entre phases à vide ( $U_v = \sqrt{3} \cdot U_{ov}$ )

$Z_{Ph/Ph/PE}$  = impédance de la boucle de double défaut Ph/Ph/PE

L'impédance de double défaut Ph/Ph/PE sera maximale lorsque les deux canalisations concernées par les défauts seront de même impédance pour la norme NFC 15-100 :

$$I_{Ph/Ph/PE} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ov}}{Z_{Ph/Ph \text{ TR}} + 2 Z_{Ph/PE \text{ can}}}$$

$Z_{Ph/Ph \text{ TR}}$  = impédance biphasée du transformateur, cette impédance est à compléter par celle de la jonction transformateur - tableau général BT si celle-ci n'est pas négligeable

$Z_{Ph/PE \text{ can}}$  = impédance monophasée simple d'une des deux canalisations identiques considérées

L'impédance de boucle de défaut  $Z_{Ph/Ph/PE}$  est sensiblement égale aux deux impédances monophasées  $Z_{Ph/PE \text{ can}}$  des canalisations envisagées, du fait que l'impédance  $Z_{Ph/Ph \text{ TR}}$  du transformateur est généralement faible devant l'impédance des canalisations :

$$I_{Ph/Ph/PE} \# \frac{\sqrt{3} U_{ov}}{2 Z_{Ph/PE \text{ can}}} = 0,86 \frac{U_{ov}}{Z_{Ph/PE \text{ can}}}$$

$\# 0,86 \cdot I_{Ph/PE}$  (comme si nous étions en schéma TN).

Ceci explique pourquoi le courant de double défaut Ph/Ph/PE de la norme est évalué forfaitairement à 0,86 fois le courant monophasé simple Ph/PE comme si nous étions en schéma mise au neutre des masses (schéma TN).

Cette évaluation ne convient qu'à des schémas de distribution en antenne, pour des schémas comportant des bouclages, il faut observer l'impédance de boucle parcourue par le courant de défaut.

Observation en schéma IT-AN (fig. 7) :

Le raisonnement de la norme est analogue pour l'évaluation du courant de double défaut Ph/N/PE dans ce schéma :

- double défaut sur deux circuits identiques;
- tension générant le défaut,  $U_{ov}$  (tension simple à vide).

L'évaluation forfaitaire de l'intensité de défaut est :

$$I_d = I_{Ph/N/PE} = \frac{U_{ov}}{Z_{Ph/N/PE}} = \frac{U_{ov}}{Z_{Ph/N \text{ TR}} + 2 Z_{Ph/PE \text{ can}}}$$

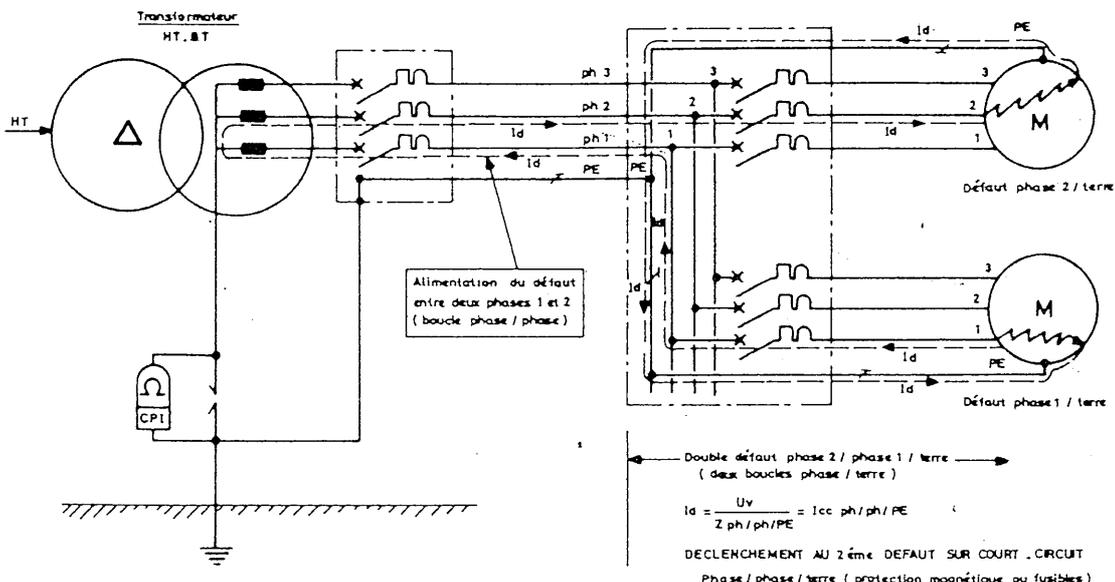


Fig. 6. — Double défaut terre en schéma IT-SN

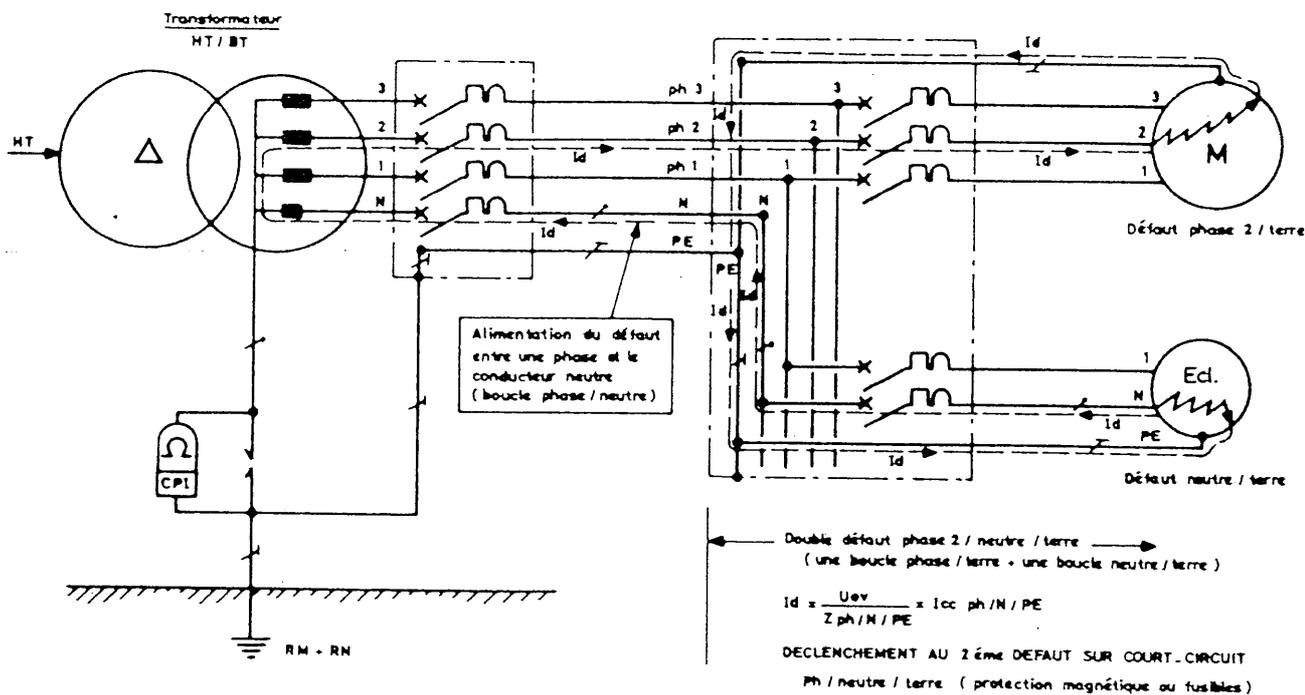


Fig. 7. — Double défaut terre en schéma IT-AN

L'impédance de boucle de défaut  $Z_{Ph/N/PE}$  est sensiblement égale aux deux impédances monophasées  $Z_{Ph/PEcan}$  des canalisations envisagées, du fait que l'impédance  $Z_{Ph/N}$  du transformateur est généralement faible devant l'impédance des canalisations.

$$I_d \approx \frac{U_{0v}}{2 Z_{Ph/PE can}} = 0,5 I_{Ph/PE}$$

(simple comme si nous étions en schéma TN).

Ceci explique pourquoi le courant de défaut Ph/N/PE de la norme est évalué forfaitairement à 0,5 fois le courant monophasé simple Ph/PE comme si nous étions en schéma mise au neutre (schéma TN).

Cette évaluation ne convient qu'à des schémas de distribution en antenne, pour des schémas comportant des bouclages, il faut observer l'impédance de la boucle parcourue par le courant de défaut.

Dans ces schémas, les doubles défauts à la terre doivent être éliminés par les protections de court-circuit (fusibles ou protection magnétique).

Une protection différentielle, DR, complémentaire peut assurer cette élimination pour des circuits terminaux.

#### 2.4. Choix d'un régime de schéma TN, TT ou IT. (Tableau I):

L'ensemble des installations, n'ayant pas d'impératif de production, peut être alimenté en schéma TT ou TN assurant une coupure au premier défaut électrique (mise à la terre ou mise au neutre).

Les installations présentant des dangers et des impératifs d'exploitation ou des coûts importants en cas d'arrêt d'unité sont à réaliser en schéma neutre isolé ou impédant (IT) ou éventuellement en schéma mise au neutre des masses (TN) sous réserve d'une subdivision et d'une sélectivité des protections de court-circuit convenablement adaptée à l'exploitation (un dispositif d'alimentation normal-secours peut être à prévoir selon les impératifs de bon fonctionnement pour certains équipements).

### 3. Les différentes règles de la norme.

Il existe deux règles essentielles dans la norme NFC 15-100.

Ces deux règles permettent de s'assurer que tout dispositif de protection est :

DESTRUCTION D'UN TABLEAU PRÉFABRIQUÉ SUR COURTS-CIRCUITS :

---

Photo 4

Photo 5

DÉFORMATION D'UN JEU DE BARRES  
LORS DES ESSAIS AUX COURTS-CIRCUITS D'UN CONSTRUCTEUR

Barres 25 × 6  
Observation des nœuds et ventres de déformation aux contraintes électrodynamiques

---

Photo 6

Essai monophasé  
lcc eff : 34,5 kA  
lcc crête : 53,8 kA

Photo 7

Photo 8

Essai triphasé  
lcc eff : 31 kA  
lcc crête : 60,5 kA

TABLEAU I

Schémas industriels	Utilisations industrielles	Fonctionnement vis-à-vis des défauts à la terre
<b>Schéma TT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Branchement BT de l'E.D.F. de puissance faible (habitation, magasin...).</li> <li>— Installation de chantier (fortement conseillé).</li> <li>— Usine sans impératif de production ou sans service d'entretien.</li> <li>— Réseau éclairage ou prises de courant (conseillé).</li> <li>— Magasin - Tertiaire.</li> </ul>	<p><b>1<sup>er</sup> défaut</b> Avec protection différentielle DR</p>
<b>Schéma TN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Usine sans impératif de production important.</li> <li>— Usine avec impératif de production sous réserve de bonne sélectivité et subdivision.</li> <li>— Réseau d'éclairage ou prise de courant (conseillé en schéma TN-B avec protection DR).</li> </ul>	<p><b>1<sup>er</sup> défaut</b> Avec protection de court-circuit (fusible ou magnétique d'un disjoncteur)</p>
<b>Schéma IT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Usine avec d'important impératif de production ou d'exploitation exclusivement*.</li> </ul>	<p><b>1<sup>er</sup> défaut</b> Signalisation</p> <p><b>2<sup>e</sup> défaut</b> Avec protection de court-circuit (fusible ou magnétique d'un disjoncteur)</p>
<p>Il est vivement conseillé en schéma IT, de réaliser une séparation électrique entre les réseaux force ou prioritaire et les réseaux annexes souvent générateurs de perturbations comme les réseaux d'éclairage et de prises de courant. L'alimentation la plus appropriée de ces circuits se réalisant par un transformateur dont le régime du secondaire sera au choix : un schéma TT ou un schéma TN.</p>		

- convenablement implanté dans une installation en fonction de la tenue aux courts-circuits de l'appareillage (règle du pouvoir de coupure);
- sollicité en fonction de ses seuils de réponse en cas de défaut sur la ligne qu'il protège, tout en respectant la tenue aux contraintes thermiques de cette canalisation (règle de coupure en 5 secondes).

### 3.1. La règle du pouvoir de coupure (§ 434.2.1.).

Le pouvoir de coupure (PdC) d'une protection par disjoncteur doit être au moins égal au courant de court-circuit franc maximal pouvant la traverser.

Cette règle s'observe en tête de ligne au niveau de la protection sous la tension alimentant le défaut et selon la nature du circuit :

- circuits triphasés :  
 $PdC (U_v) \geq I_{cc3} \text{ amont}$ ,
- circuits biphasés :  
 $PdC (U_v) \geq I_{cc2} \text{ amont} = 0,86 \cdot I_{cc3} \text{ amont}$ ,
- circuits monophasés :  
 $PdC (U_{ov}) \geq I_{cc1} (Ph/N) \text{ amont}$ .

PdC (U<sub>v</sub> ou U<sub>ov</sub>) étant le pouvoir de coupure sous la tension à vide alimentant le défaut (U tension entre phases ou U<sub>o</sub> tension phase-neutre).

En pratique, dans les réseaux industriels, l'écriture de cette règle doit être vérifiée en courant de défaut triphasé franc selon la tension composée (U) au point d'implantation de la protection :

$$PdC (U_v) \geq I_{cc3} \text{ amont}$$

- Les pouvoirs de coupure des fusibles gF, gI, gII, gT et aM sont de l'ordre de : 6 - 20 - 50 ou 100 kA selon la taille et la nature du fusible.

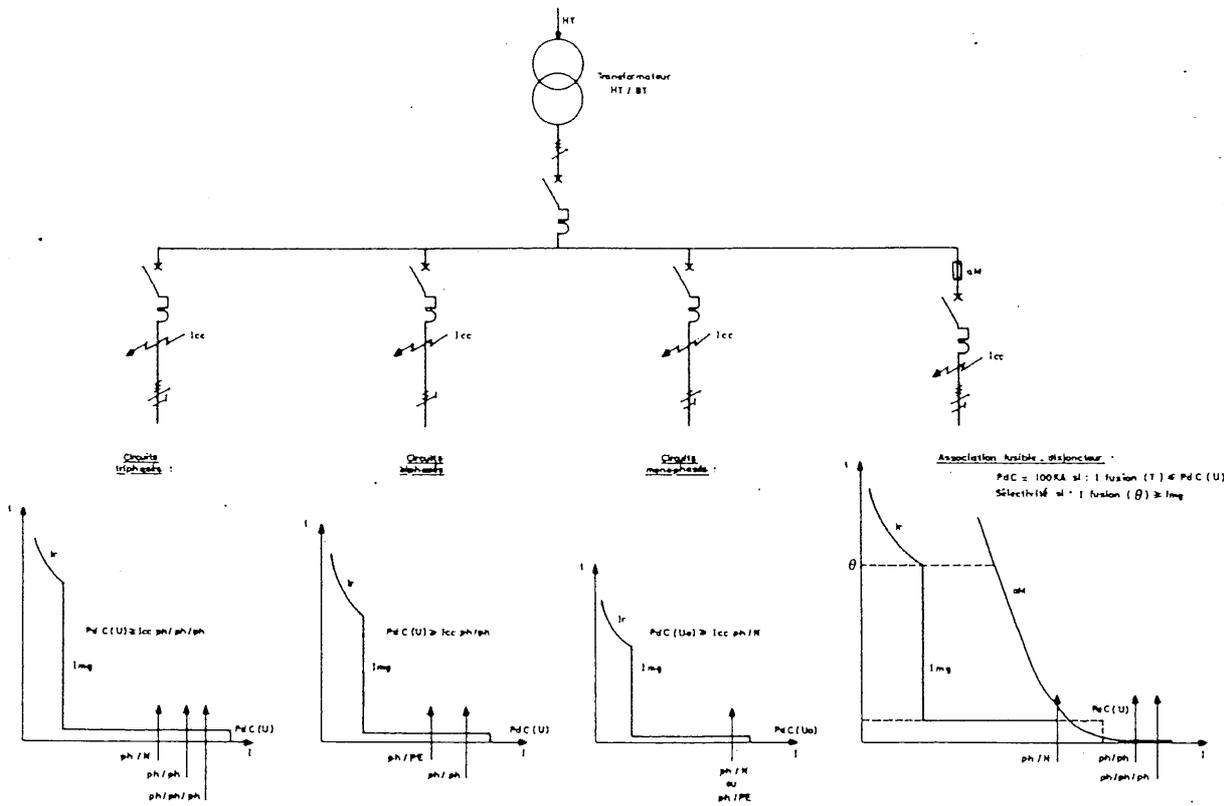


Fig. 8. — Pouvoir de coupure selon les circuits

TABLEAU II

Protection	Cycle	Séquence d'essais	État après essais
Disjoncteur domestique type U ou L	P <sub>2</sub>	O 3 mm CO 3 mm CO	Service normal
Disjoncteur d'usage général (DUG)	P <sub>1</sub>	O 3 mm CO	Service réduit
	P <sub>2</sub>	O 3 mm CO 3 mm CO	Service normal

O = une manœuvre d'ouverture sur défaut.  
CO = une manœuvre de fermeture (C) et d'ouverture (O) sur défaut.  
3 mm = temps d'espacement des séquences.

— Le pouvoir de coupure des disjoncteurs varie, par contre, selon leur type et selon les séquences d'essais normalisés auxquels ils sont soumis (cycle P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>) (tableau II).

**3.2. La règle de coupure en 5 secondes** (§ 434.2.1. puis 434.2.3 puis 532.3).

Tout dispositif de protection doit éliminer tout court-circuit en un temps inférieur à 5 secondes, tout en respectant la contrainte thermique de chaque pôle du circuit protégé.

$$I^2 t = K^2 S^2 \text{ ou } K^2 S^2_N \text{ ou } K^2 S^2_{PE}$$

K = constante dépendant de la nature du métal et de l'isolation des conducteurs :

Isolation	Valeur de K	
	Métal	
	Cuivre	Aluminium
PCV	115	74
PRC	135	87

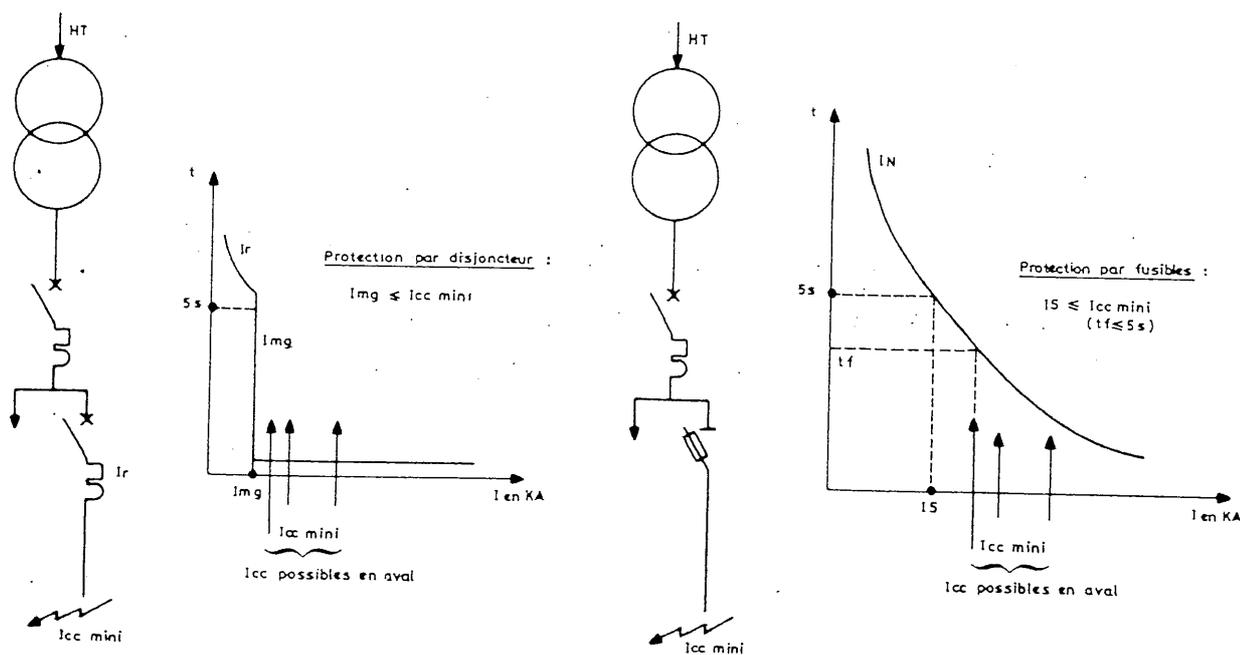


Fig. 9. — Règle de sollicitation des protections

En pratique, si le dispositif n'est pas retardé, cette règle s'observe en bout de ligne en s'assurant que tout court-circuit est supérieur à l'intensité de réponse du relais magnétique ou de fusion en 5 secondes de la protection fusible. Ceci de façon à vérifier que la protection sera sollicitée pour le plus petit court-circuit possible pour le circuit étudié ( $I_{cc \text{ mini}}$  en bout de ligne) (fig. 9).

Les valeurs de  $I$  fusion ou réponse en 5 secondes des protections par fusibles ou par disjoncteur d'usage domestique (type U ou L) sont indiquées dans le tableau III, selon la protection envisagée :

Lors du réglage d'une protection magnétique ( $I_{mg}$ ) d'un disjoncteur industriel, il convient de s'assurer de ne pas régler trop bas la protection de façon à ne pas déclencher au moment du démarrage des moteurs :

- pour 1 moteur :  $I \text{ démarrage} < I_{mg}$ ;
- pour 1 atelier dans lequel un ou plusieurs gros moteurs peuvent démarrer simultanément :  
 $I \text{ atelier} + (I \text{ démarrage} - I \text{ nominal}) 1 \text{ ou } n \text{ moteurs} < I_{mg} \text{ atelier}$

Les valeurs de  $I$  démarrage, selon le type de démarrage d'un moteur, sont approximativement celles du tableau IV.

TABLEAU III

Protections	Tableau I Fusion 5 secondes des protections, en kA ou A																								
	2	4	6	8	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	
gf	7	13	21	27	35	62	80	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25	0,32	0,4	0,54	0,64	0,8	1	1,3	2	2,5	3	4,2	5,2	
gll				40	62	86	0,12	0,14	0,2	0,26	0,34	0,46	0,57												
gl	9	18	27	36	45	82	110	0,13	0,16	0,2	0,26	0,34	0,44	0,56	0,74	0,94	1,2	1,5	2	2,6	3,2	4,8	6	8,3	
gt	10	20	30	40	50	90	110	0,14	0,2	0,24	0,3	0,42	0,56	0,7	0,9	1,2	1,6	2	2,7	3,5	4,5	5,8	7,6	10	
aM	17	34	50	68	85	140	170	0,22	0,27	0,34	0,42	0,53	0,68	0,85	1	1,35	1,7	2,1	2,6	3,4	4,2	5,35	6,8	8,5	
disj. U						110	120	0,16	0,2	0,25	0,29	0,38	0,45	0,62	0,71	1									
disj. L						50	53	0,07	0,09	0,11	0,13	0,17	0,2	0,26	0,33	0,42									
Taille en A						15	17	22	28	35	42	52	65	82	104	130									
Unités	Unité A							Unité le kA																	

TABLEAU IV

Moteur	Démarrage	$I_D =$ Démarrage
Moteur à rotor en court-circuit	Direct	2 pôles : 4,2 à 9 $I_N$ 4 pôles et plus : 4,2 à 6,6 $I_N$
	Par couplage étoile-triangle	$\frac{I_D \text{ triangle}}{3}$
	Par insertion de résistance ou de réactance en série avec le stator	à vide : 0,6 $I_D$ direct à couple croissant : 0,75 $I_D$ direct
Moteur à induction à rotor bobiné	Par insertion de résistance dans le circuit rotorique	1,5 à 3 $I_N$

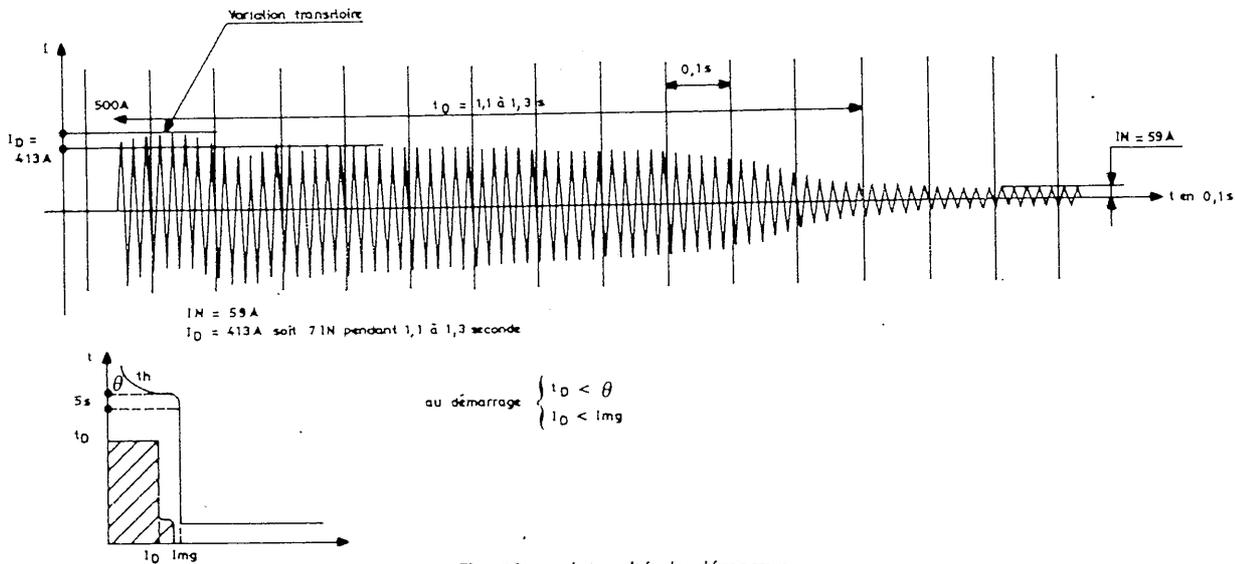


Fig. 10. — Intensité de démarrage

L'énergie appelée lors du démarrage doit pouvoir transiter sans solliciter le seuil de la protection pendant le temps,  $t_D$ , de l'appel de courant  $I_D$ .

(à suivre)

# ELECTRICITÉ

## Installations basse tension – Norme NF C 15-100 Principes fondamentaux pour la protection contre les courts-circuits (1)

par A. DUMORA, ingénieur I.E.G., ingénieur à l'apave normande

### 2<sup>e</sup> partie

#### 4. Les différents défauts possibles - principe de protection.

Un court-circuit se produit généralement après détérioration des isolants des conducteurs ou éventuellement après fausse manœuvre d'un utilisateur ou détérioration mécanique.

La nature du défaut dépend alors des pôles concernés lors de l'incident :

- court-circuit entre conducteurs actifs :
  - lcc3, court-circuit triphasé (Ph/Ph/Ph)
  - lcc2, court-circuit biphasé (Ph/Ph)
  - lcc1, court-circuit monophasé (Ph/N)
- court-circuit entre le conducteur actif et le conducteur de protection :
  - lcc1, court-circuit monophasé simple (Ph/PEN ou Ph/PE, uniquement en schéma TN),
  - court-circuit de double défaut (Ph/Ph/PE ou Ph/N/PE, uniquement en schéma IT).

#### Étude de cas.

L'étude du cas suivant permet d'observer les incidences de ces différents courants de défaut possibles :

- en tête de ligne : règle du pouvoir de coupure ;
- en bout de ligne : règle de sollicitation de la protection, en envisageant les différents schémas possibles (schéma IT ou TT ou TN).

#### 4.1. Les défauts en tête de ligne.

En cas d'implantation de protection par disjoncteur au tableau A ou au tableau B, il convient de vérifier la règle du pouvoir de coupure.

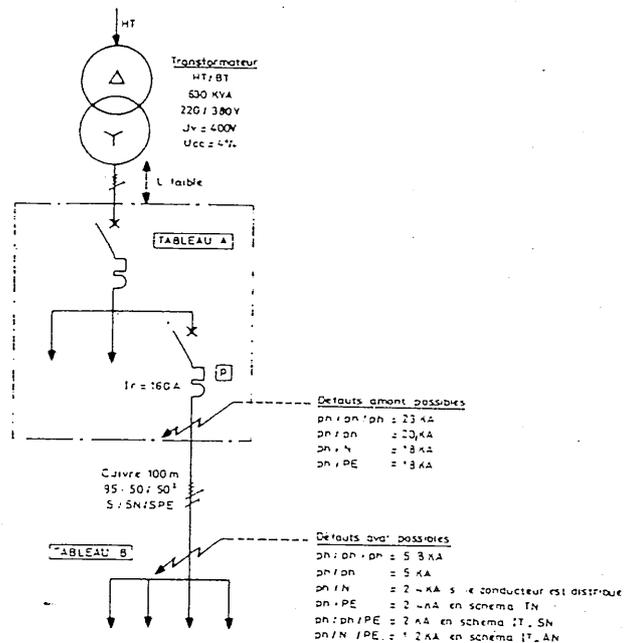


Fig. 11. — Les différents courts-circuits possibles

(1) Suite de l'article paru dans *apave*, n° 223 (juillet-août-septembre 1983), p. 43.

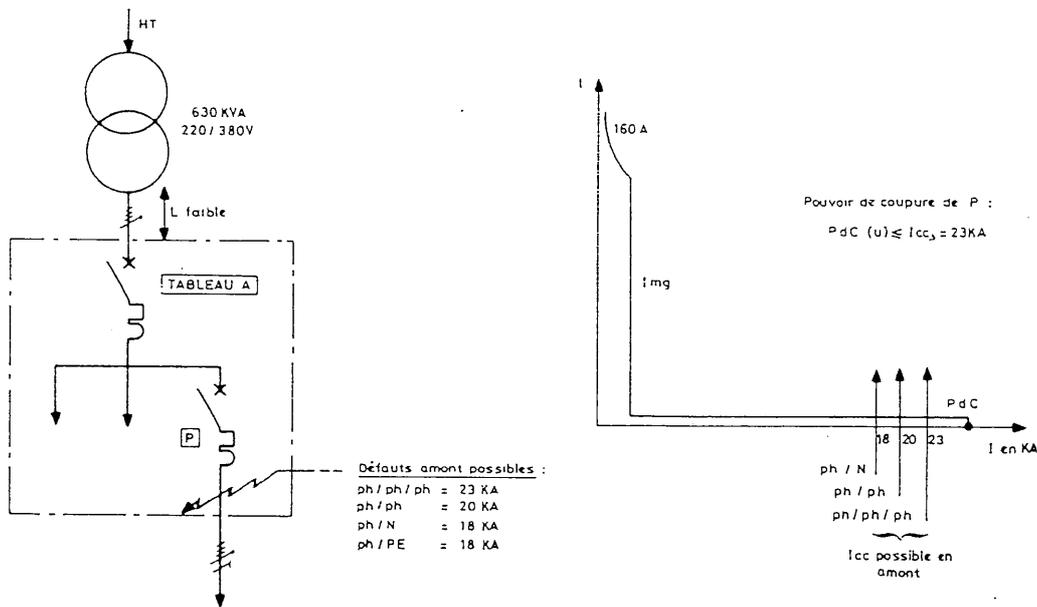


Fig. 12. — Pouvoir de coupure d'une protection

**Au tableau A.**

$PdC (400 V) \text{ de } P \geq 23 \text{ kA} = I_{cc3} \text{ amont}$

Si cette relation n'est pas satisfaite, la protection P devra être protégée en amont par un jeu de fusibles du type aM d'intensité nominale supérieure ou égale à  $I_r = 160 A$ .

**Au tableau B.**

La règle est moins contraignante du fait de l'impédance de la ligne posée entre les tableaux A et B :

$PdC (400 V) \geq 5,8 \text{ kA} = I_{cc3} \text{ tableau B}$

**4.2. Les défauts en bout de ligne.**

Les défauts vis-à-vis du conducteur de protection (PE) indiqués sur ce cas d'étude de principe dépendent de la nature du régime de neutre retenue pour le schéma.

Les courts-circuits se produisant en bout de ligne doivent être éliminés par la protection magnétique du disjoncteur (temps inférieur à 5 secondes).

**— Élimination des défauts en schéma IT-AN.**

Les défauts possibles sont : Ph/Ph/Ph ou Ph/Ph ou Ph/N ou Ph/Ph/PE ou Ph/N/PE.

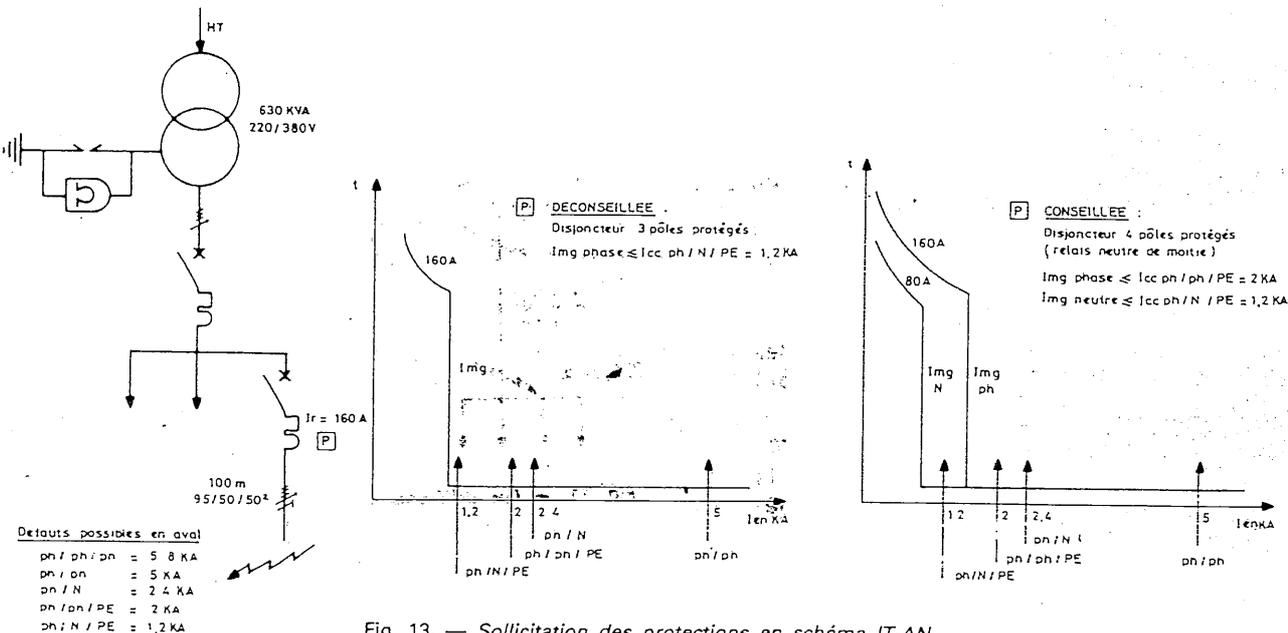


Fig. 13. — Sollicitation des protections en schéma IT-AN

La section réduite  $S_N = S/2$  du conducteur neutre ne peut être convenablement protégée que par un relais sur le neutre d'un calibre égal à la moitié de celui du relais de phase.

Il est très vivement conseillé de protéger le conducteur neutre dans ce schéma par un relais magnétothermique sur le conducteur même si  $S_N = S$  phase de façon à protéger ce conducteur face à tout courant de double défaut Ph/N/PE possible (disjoncteur 4 ou 2 pôles protégés selon le circuit).

— Dans le cas où la protection est assurée par le relais de phase, il convient de régler le magnétique du disjoncteur de façon à éliminer le double défaut Ph/N/PE :

$$I_{mg} = \text{magnétique de phase} \leq 1,2 \text{ kA}$$

— Dans le cas où la protection comporte un relais neutre de moitié, le double défaut Ph/N/PE est éliminé par le relais neutre moitié et le double défaut Ph/Ph/PE par le relais de phase :

$$\frac{I_{mg}}{2} \leq I_{Ph/N/PE} = 1,2 \text{ kA (neutre)}$$

$$I_{mg} \leq I_{Ph/Ph/PE} = 2 \text{ kA (phase)}$$

Les relais magnétiques sont alors réglés à :

- phase :  $I_{mg} \leq 2 \text{ kA}$
- neutre :  $I_{mg} (N) \leq \frac{2 \text{ kA}}{2} = 1 \text{ kA}$

Le défaut le plus contraignant est dans ce cas le double défaut Ph/Ph/PE.

#### — Élimination des défauts en schéma IT-SN.

Les défauts possibles sont : Ph/Ph/Ph ou Ph/Ph ou Ph/Ph/PE :

Il est rappelé qu'aucun conducteur neutre n'est distribué dans une installation IT-SN (§ 2.3.).

Il convient de régler le relais de phase de façon à éliminer le double défaut Ph/Ph/PE :

$$I_{mg} = \text{magnétique de phase} \leq 2 \text{ kA}$$

#### — Élimination des défauts en schéma TT.

Les défauts possibles sont : Ph/Ph/Ph ou Ph/Ph ou Ph/N.

La protection (P) est obligatoirement une protection différentielle résiduelle (DR) de façon à éliminer les risques d'électrocution et à couper le défaut impédant Ph/PE traversant les prises de terre du neutre ( $R_N$ ) et des masses ( $R_M$ ).

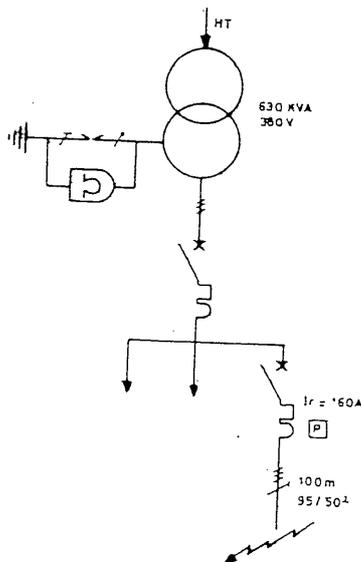
Dans ce schéma, lorsque le conducteur neutre présente une section réduite  $S_N = S/2$  vis-à-vis des conducteurs de phase, S, il est très vivement conseillé de protéger ce conducteur par un relais magnétothermique moitié de celui protégeant les conducteurs de phase.

Si la section du conducteur neutre est identique à celle des conducteurs de phase, un relais de protection sur le conducteur neutre n'est pas nécessaire.

— Dans le cas où la protection est assurée par le relais de phase, il convient de régler le magnétique du disjoncteur de façon à éliminer le défaut monophasé Ph/N :

$$I_{mg} = \text{magnétique de phase} \leq 2,4 \text{ kA}$$

— Dans le cas où la protection comporte un relais neutre de moitié, le défaut monophasé Ph/N est éliminé par le relais neutre moitié :



Défauts possibles en aval

- Ph / Ph / Ph = 5,8 kA
- Ph / Ph = 5 kA
- Ph / Ph / PE = 2 kA

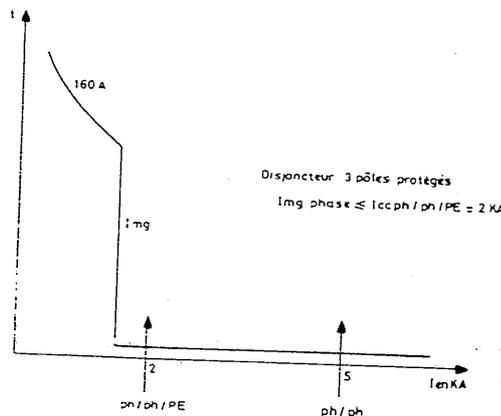
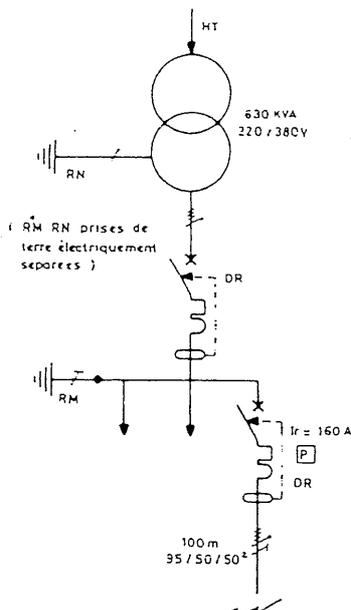
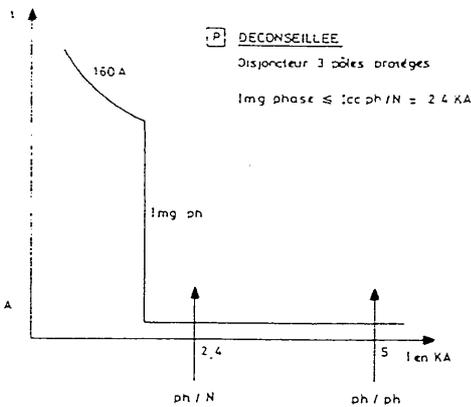


Fig. 14. — Sollicitation des protections en schéma IT-SN



Défauts possibles en aval

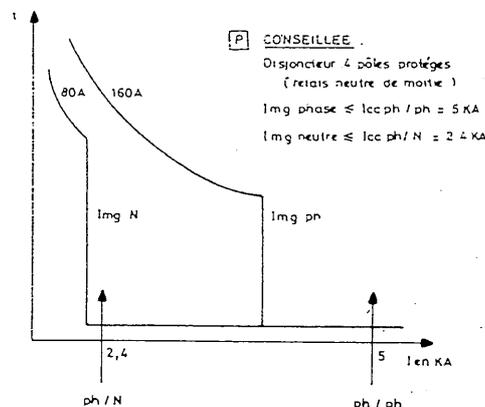
- ph / ph / ph = 5,8 kA
- ph / ph = 5 kA
- ph / N = 2,4 kA
- ph / PE impédant sollicitant la protection différentielle DR



**DECONSEILLÉE**

Disjoncteur 3 pôles protégés

$$I_{mg \text{ phase}} \leq I_{cc \text{ ph/N}} = 2,4 \text{ kA}$$



**CONSEILLÉE**

Disjoncteur 4 pôles protégés

(relais neutre de moitié)

$$I_{mg \text{ phase}} \leq I_{cc \text{ ph / ph}} = 5 \text{ kA}$$

$$I_{mg \text{ neutre}} \leq I_{cc \text{ ph/N}} = 2,4 \text{ kA}$$

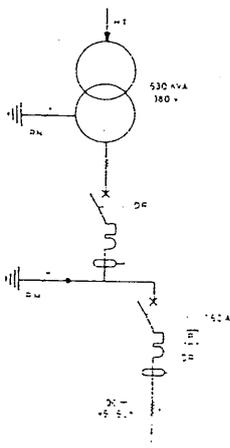
Fig. 15. — Sollicitation des protections en schéma TT avec neutre

$$\frac{I_{mg}}{2} = \text{magnétique de neutre} \leq 2,4 \text{ kA}$$

d'où  $I_{mg} = \text{magnétique de phase} \leq 4,8 \text{ kA}$

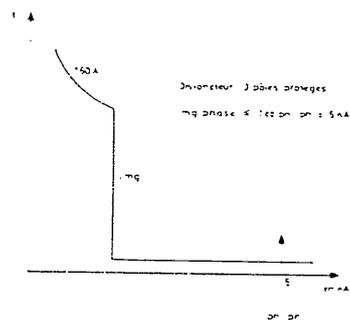
— Si le circuit ne comporte pas de conducteur neutre, il ne reste que le défaut Ph/Ph à éliminer par la protection magnétique de phase :

$$I_{mg} (\text{magnétique de phase}) \leq 5 \text{ kA}$$



Défauts possibles en aval

- ph / ph / ph = 5,8 kA
- ph / ph = 5 kA
- ph / PE impédant sollicitant la protection différentielle DR



Disjoncteur 3 pôles protégés

$$I_{mg \text{ phase}} \leq I_{cc \text{ ph / ph}} = 5 \text{ kA}$$

Fig. 16. — Sollicitation des protections en schéma TT sans neutre

### — Élimination des défauts en schéma TN.

Les défauts possibles sont : Ph/Ph/Ph ou Ph/Ph ou Ph/N ou Ph/PE ou Ph/PEN selon le câblage en schéma TN-A ou TN-B :

### En schéma TN-B.

Lorsque le conducteur neutre présente une section réduite  $S_N = S/2$  vis-à-vis des conducteurs de phase,  $S$ , il est très vivement conseillé de protéger ce conducteur par un relais magnétothermique moitié de celui protégeant les conducteurs de phase.

Si la section du conducteur neutre est identique à celle des conducteurs de phase, un relais de protection sur le conducteur neutre n'est pas nécessaire.

Dans le cas d'étude :

— Disjoncteur 3 pôles protégés déconseillé :  
Le relais de phase doit surveiller les défauts monophasés Ph/N et Ph/PE en n'assurant pas la surveillance thermique du conducteur neutre.

$$I_{mg \text{ de phase}} \leq 2,4 \text{ kA (défaut Ph/N et Ph/PE)}$$

— Disjoncteur 4 pôles protégés avec relais neutre de moitié conseillé :

Le relais de phase doit surveiller le défaut Ph/PE (2,4 kA).

Le relais neutre de moitié assure la surveillance thermique du conducteur neutre.

$$I_{mg} = \text{de phase} \leq 2,4 \text{ kA (défaut Ph/PE)}$$

$$\frac{I_{mg}}{2} = I_{mg \text{ sur le neutre}} \leq 2,4 \text{ kA (défaut Ph/N)}$$

L'utilisation d'un dispositif DR pour ce schéma revient à envisager le mode de protection comme si nous étions en schéma mise à la terre (TT), en éliminant par cette protection le défaut Ph/PE.



SCHEMA	Valeur	Théorie de la NFC 15.100	MESURES SELON LE MODE DE POSE		
			Mesure n°1	Mesure n°2	Mesure n°3
	Mode de pose envisagée	Indication à 160°C résistivité $\rho = 0,027 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ en cuivre	 Fixation aux parois	 Chemin de câbles posé jointive	 Chemin de câbles posé espacée
	Impédance monophasée simple de la canalisation $Z_{ph/PE\text{can}}$	53 mΩ	42 mΩ (- 21%)	50 mΩ (- 6%)	81 mΩ (+ 53%)
	Courant de court-circuit monophasé simple aval $I_{cc\text{ph/PE}}$ calcul ou mesures	$I_{cc\text{ph/PE}} = \frac{U_0 V}{Z_{ph/PE\text{tr}} + Z_{ph/PE\text{can}}}$ $= \frac{0,8 U_0 V}{Z_{ph/PE\text{can}}} = 3,5 \text{ KA}$	4,2 KA (+ 20%)	3,7 KA (- 6%)	2,5 KA (- 28%)

Fig. 19. — Influence de la pose jointive des câbles sur le court-circuit monophasé phase-terre (schéma TN)

$$\frac{U_0 V}{Z_{ph/PE\text{tr}} + Z_{ph/PE\text{can}}} \neq \frac{0,8 U_0 V}{Z_{ph/PE\text{can}}}$$

Cette relation suppose que l'impédance monophasée du transformateur ( $Z_{ph/PE\text{tr}}$ ) ou que l'impédance amont au circuit étudié est de l'ordre du quart de l'impédance de la canalisation :

$$Z_{ph/PE\text{tr}} \neq 1/4 Z_{ph/PE\text{can}}$$

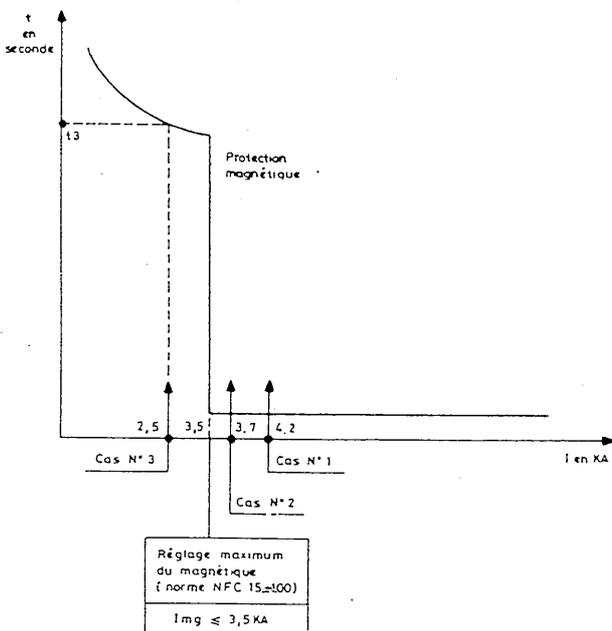


Fig. 20. — Sollicitation d'une protection magnétique sur défaut terre selon le mode de pose des câbles

Le réglage du relais magnétique du disjoncteur P selon les valeurs indiquées par la norme, assure le fonctionnement sur défaut monophasé Ph/PE dans les cas de pose jointive du conducteur de protection vis-à-vis des conducteurs de phase (cas n°s 1 et 2).

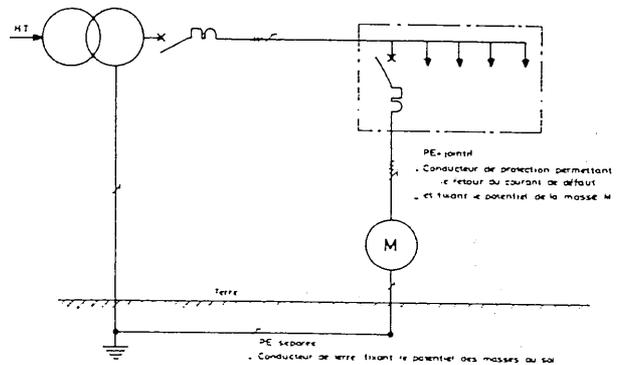


Fig. 21. — Conducteur de terre jointif et séparé

Dès que le conducteur de protection est espacé (ici 14 cm), le fonctionnement de la protection magnétique ne peut plus être garanti en un temps inférieur à 5 secondes (fonctionnement en protection de surcharge en  $t_3 > 5$  secondes pour le cas 3).

La présence d'un chemin de câbles augmente l'impédance  $Z_{ph/PE}$  canalisation de 19 % (cas 1 et 2).

Le fait d'espacer de 14 cm le conducteur de protection sur le chemin du câble, augmente l'impédance  $Z_{ph/PE}$  canalisation de 62 % (cas 2 et 3).

L'observation de ces mesures permet d'interpréter le fonctionnement des protections sur défaut terre dans les deux schémas suivants :

### Conducteur de protection jointif et séparé (fig. 21).

Une interconnexion enterrée, en pose séparée, reliant les masses d'utilisation, a pour but de fixer le potentiel des masses au sol. Les courants de circulation, lors d'un défaut terre, sont relativement faibles dans ce conducteur, du fait d'une impédance de boucle de défaut relativement importante.

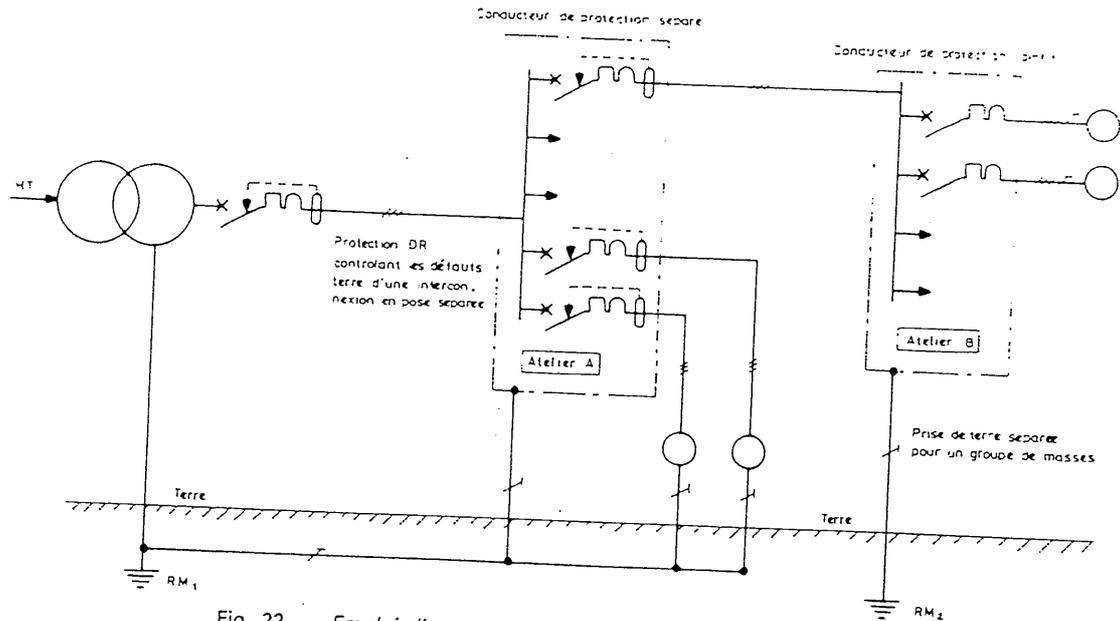


Fig. 22. — Emploi d'une protection différentielle -DR- lorsque :  
 Le conducteur de protection est en pose séparée  
 ou la prise de terre de l'atelier ou du groupe de masses est séparée

Le conducteur de protection jointif véhicule le courant de défaut terre avec un minimum d'impédance de boucle, de façon à pouvoir solliciter la protection de court-circuit en défaut.

De plus, le conducteur de protection jointif fixe le potentiel des différentes masses d'utilisation.

**Conducteur de terre séparée ou prise de terre séparée et protection différentielle DR (fig. 22).**

**Atelier A :**

Le potentiel des masses est fixé par la mise à la terre enterrée (pose séparée).

Le courant de défaut terre est ici incalculable, du fait :

- d'une maille éventuellement complexe;
- des multiples contacts de fixation et de leur état;
- d'effet d'induction lors d'un défaut.

Seule, une protection différentielle DR, par départ, peut maîtriser efficacement un éventuel courant de défaut à la terre.

**Atelier B :**

L'ensemble des masses d'utilisation est relié à la prise de terre RM2 séparée de la prise de terre générale RM1.

En cas de défaut de terre dans l'atelier B, le courant de défaut traverse les deux prises de terre :

$$I_d \neq \frac{U_0}{R_{M1} + R_{M2}}$$

Ce courant de défaut présente une valeur faible et ne peut être maîtrisé efficacement que par une protection différentielle DR au niveau du départ général de l'atelier.

**6. Section de terre au niveau du transformateur.**

Le conducteur de terre reliant le point neutre du transformateur au puits de terre du poste, de même que le conducteur interconnectant les masses basse tension du poste de transformation (comme le tableau général basse tension par exemple), est souvent installé en pose séparée vis-à-vis des conducteurs de phase.

En cas de défaut basse tension traversant ce conducteur, la protection haute tension du poste répondra généralement en un temps moyen de  $t_{HT} \neq 200$  ms.

La section de ce conducteur est obtenue par la relation :

$$S_{PE} \geq \frac{I}{\alpha} \sqrt{\frac{t_{HT}}{\Delta \theta}} \quad (\text{\S } 543.1.1.)$$

$\alpha = 13$  pour le cuivre

$\Delta \theta =$  échauffement admissible du conducteur :

- 160 °C si le conducteur est isolé
- 180 °C si le conducteur est nu.

$I =$  courant maximum de défaut BT traversant le conducteur de section  $S_{PE}$ .

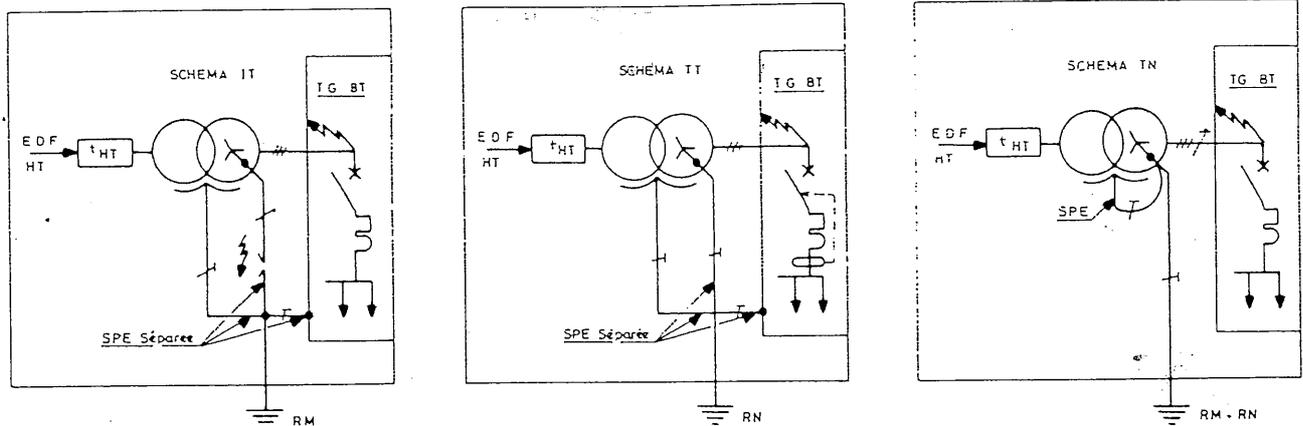


Fig. 23. — SPE en pose séparée au niveau du poste

Les tableaux V et VI indiquent les valeurs de SPE pour  $t_{HT} = 200$  ms en fonction de la puissance des transformateurs et de la nature du conducteur dans les réseaux 127/220 et 220/380 V :

TABLEAU V

CONDUCTEUR CUIVRE NU		$I_{SPE}$ en kA	$S_{PE}$ en mm <sup>2</sup>
Transformateur en kVA			
127-220 V	220-380 V		
≤ 200	≤ 315	≤ 9,7	25
250	400	13,6	35
315	500 à 800	19,5	50
400 + 500	1 000 + 1 250	27,3	70
630 + 800	1 600	37	95
1 000 + 1 250		46,8	120
1 600		58,5	150

TABLEAU VI

CONDUCTEUR CUIVRE ISOLÉ		$I_{SPE}$ en kA	$S_{PE}$ en mm <sup>2</sup>
Transformateur en kVA			
127-220 V	220-380 V		
≤ 160	≤ 315	≤ 9,2	25
200 + 250	400	12,8	35
315	500 à 630	18,3	50
400 + 500	800 + 1 250	25,7	70
630 + 800	1 600	34,8	95
1 000 + 1 250		44	120
1 600		55	150

La valeur  $I_{SPE}$  est l'intensité maximale que peut supporter le câble de section  $S_{PE}$  pendant le temps  $t_{HT} = 200$  ms.

Dans le cas de protection haute tension réalisée par disjoncteur, le temps  $t_{HT}$  à considérer est le temps total de réponse de la protection magnétique pour la formule du § 543.1.1. de la norme NF C 15-100.

## 7. Les protections retardées - respect d'une contrainte thermique de canalisation.

### 7.1. Les protections retardées

Lorsqu'une protection magnétique de disjoncteur est retardée sur un départ général, la contrainte thermique de chaque pôle constituant la canalisation dépend du temps réel de fonction de la protection ( $t_{BT}$ ), de la valeur maximale du courant de défaut susceptible de traverser chaque pôle et de la section du pôle considéré.

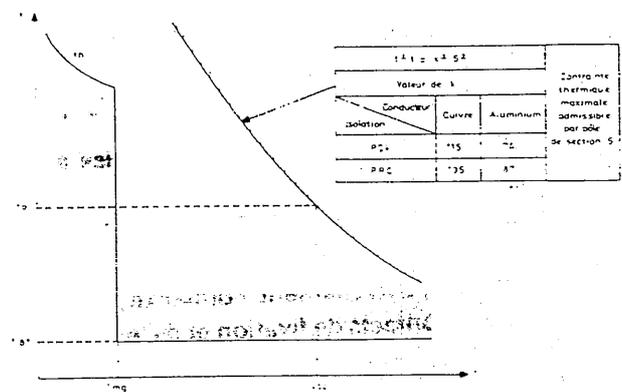
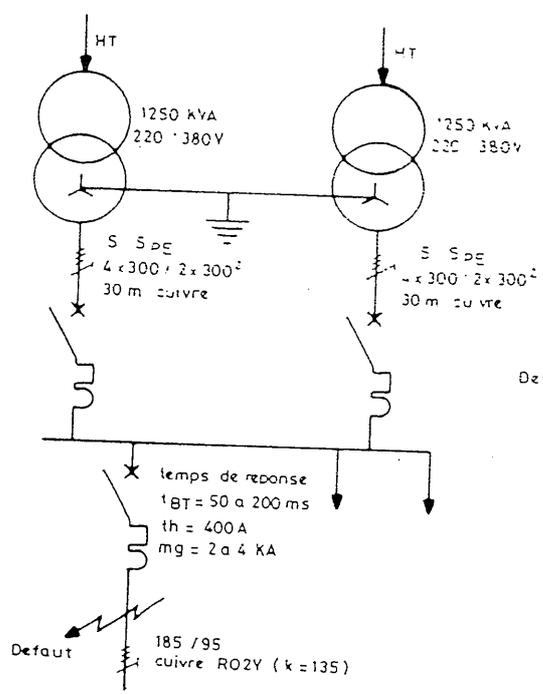


Fig. 24. — Contrainte thermique

Le pôle S supporte en fonction de sa contrainte thermique un courant de défaut  $I_{cc}$  pendant un temps  $t_0$ .

Le conducteur sera soumis à un choc thermique le plus violent lorsque le défaut  $I_{cc}$  envisagé se produit le plus en amont sur le départ, par exemple au niveau du disjoncteur du départ.

Le temps de réponse total de la protection ( $t_{BT}$ ) doit rester inférieur au temps  $t_0$  de façon à respecter la contrainte thermique du conducteur.



Defauts possibles au tableau général : BT  
 ph / ph / ph = 48 KA  
 ph / PE = 38 KA

Defaut observé	$I^2 t_{BT}$ energie de defaut traversant le cable en $kA^2 s$ pour $t_{BT}$ en ms				$k^2 s^2$ energie maximum admissible par pole en $kA^2 s$
	50	100	150	200	
ph / ph / ph	115	230	345	460	623 ( $S=185$ )
ph / PE	72	144	216	289	164 ( $S_{PE}=95$ )

Temps de reponse maximum de la protection magnetique :  
 $t_{BT \text{ maxi}} = \frac{k^2 s^2 P_E}{I^2_{ph/PE}} = \frac{164}{38^2} = 0,113 s$

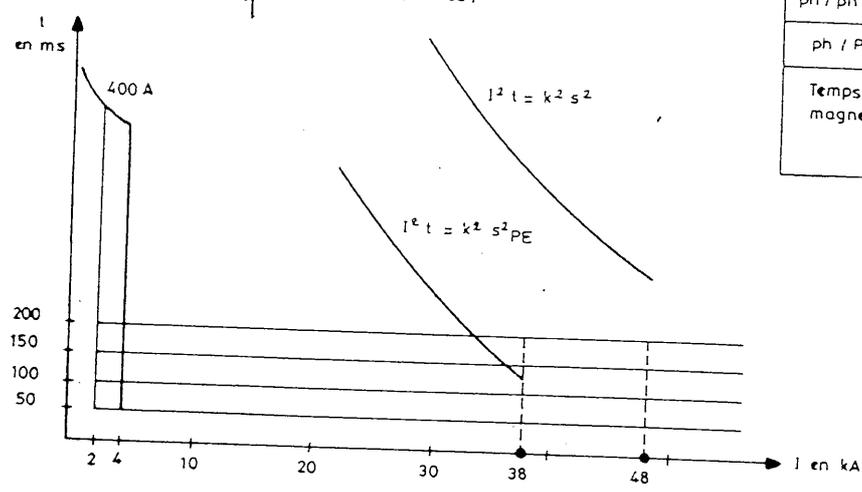


Fig. 25. — Temps de réponse maximum

L' nergie «  $I^2_{cc} \cdot t_{BT}$  » développée par le courant de défaut traversant la protection pendant le temps de réponse, sera ainsi inférieure à l'énergie maximale admissible du pôle «  $K^2 S^2$  ».

Le cas suivant en schéma TN, mise au neutre, indique :

- les valeurs des courants de défaut au niveau du tableau du départ étudié (Ph/Ph/Ph pour S et Ph/PE pour  $S_{PE}$ );
- les énergies traversant la protection magnétique pendant le temps total de réponse du relais ( $t_{BT} = 50$  à  $200$  ms);
- les énergies maximales admissibles par pôle (S ou  $S_{PE}$ );
- le temps de réponse total maximal vis-à-vis des contraintes thermiques des pôles ( $t_{BT \text{ maxi}} = 100$  ms).

Le conducteur le plus délicat à protéger dans cet exemple est le conducteur de protection  $S_{PE}$  du fait de sa section réduite  $S_{PE} = S : 2$ .

### 7.2. Limitation de densité de courant.

Les protections par disjoncteur ont la particularité de faire apparaître un point anguleux au niveau de leur courbe de fonctionnement à la rencontre du thermique et du magnétique (point  $\theta = 1$  à  $20$  secondes).

La courbe de la contrainte thermique d'un pôle de section S doit être supérieure à la courbe de la réponse de la protection en ce point :

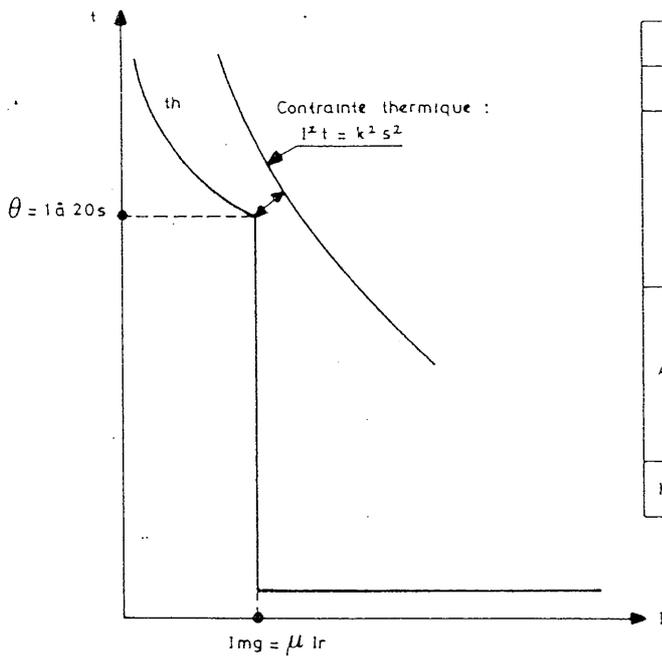
$$I^2 m_g \cdot \theta = \mu^2 \cdot I_r^2 \cdot \theta \leq K^2 S^2$$

$I_r$  étant l'intensité du déclencheur du relais thermique.

$\mu$  étant le multiple de fois  $I_r$  donnant le réglage du relais magnétique.

Cette relation conduit à une limitation des densités de courant surveillés par le disjoncteur de relais thermique  $I_r$  :

$$\frac{I_r}{S} \leq \frac{K}{\mu \cdot \sqrt{\theta}}$$



Disjoncteur		Fort ampérage		Faible ampérage		
Valeur de $\theta$ en s		20	10	5	1	
Cuivre	PRC	$\mu = 5$	6	8,5	12	27
		$\mu = 10$	3	4,3	6	13,5
	PCV	$\mu = 5$	5,1	7,3	10	23
		$\mu = 10$	2,5	3,6	5	11,5
Aluminium	PRC	$\mu = 5$	3,9	5,5	7,8	17,4
		$\mu = 10$	1,9	2,7	3,9	8,7
	PCV	$\mu = 5$	3,3	4,7	6,6	14,8
		$\mu = 10$	1,6	2,3	3,3	7,4
Métal	Isolation	$\mu = \frac{I mg}{Ir}$	Densité maximale $\frac{Ir}{s}$ en A / mm <sup>2</sup>			

Fig. 26. — Densité maximale  $\frac{Ir}{s}$

Pour les disjoncteurs usuels, cette relation conduit à une détermination de section sensiblement identique à celle réalisée par les règles de surcharges de la norme NFC 15-100.

Le non-respect de cette relation ne garantit pas la protection de la canalisation en cas de défaut impédant.