

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **Electrotechnique**

# PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

*Protection contre l'electrocution  
dans les installations à basse  
tension*

Proposé par :  
W. MICHALAK

Etudié par :  
ZEBBADJI Tahar  
BOUTEBEL Mohamed

Dirigé par :  
W. MICHALAK



PROMOTION : Juin 1984





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

«O«

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

«O«

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

«O«

**Département : Electrotechnique**

## **PROJET DE FIN D'ETUDES**

### **SUJET**

*Protection contre l'électrocution  
dans les installations à basse  
tension*

Proposé par :  
W. MICHALAK

Etudié par :  
ZEBBADJI Tahar  
BOUTEBEL Mohamed

Dirigé par :  
W. MICHALAK

# Remerciements

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur M<sup>re</sup> W. MICHALAK pour son suivi et tous les conseils qu'il nous a prodigués durant ce projet.

Nous remercions également tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.



## \*Dédicaces.

A ma mère,  
A ma famille,  
A tous mes amis  
Je dédie ce travail.

Abdelkader.

Je dédie ce modeste travail

à mes chers parents  
à mes frères et soeurs  
à tous ceux qui me sont chers  
à tous mes amis

Zahar.

Noms et Prénoms: ZEBBADJI Tahar ; BOUTEBEL Mohamed  
Promoteur.....:M.W . MICHALAK  
Département d'électrotechnique

## R E S U M E

### Sujet:

L'objet de cette étude consiste à donner une image complète du problème de la protection contre l'électrocution dans les installations à basse tension et d'analyser les différentes mesures de protection qui sont :

- 1- fondamentales
- 2- supplémentaires

## SUMMARY

### Subject:

The object of the elaboration consist in an analysis of the danger of the electrocution in the low voltage installation and the protections against it.

Two groups of protection are distinguished:

- 1- fundamental
- 2- supplementary

الموضوع:  
الغاية من هذه الدراسة هي إعطاء صورة شاملة  
لمشاكل الحماية ضد الإصعاق في التجهيزات ذات الجهد  
المنخفض وتحليل مختلف وسائل الحماية التي هي:  
1- الأساسية  
2- التكميلية.



# Table des matières.

	Page:
Introduction.	1
chap I : Dangers du courant électrique.	3
1. Sensibilité	
2. Résistance du corps humain.	
3. Tension de contact.	
4. Tension de défaut.	
5. Classification des moyens de protection.	
chap II : Moyens de protection fondamentaux.	11
Isolation	
Enveloppes	
Eloignement des conducteurs	
Protection contre la casse au point de Connexion.	
chap III : Moyens de protection Supplémentaires.	14
1. Généralités.	
2. Mise à la terre du point neutre.	
3. Ristance de la mise à la terre du neutre.	
chap III-A : Moyens de protection Supplémentaires du 1 <sup>er</sup> degré.	20
1. Neutralisation	
2. Mise à la terre.	
chap III-B Moyens de protection supplémentaires du 2 <sup>nd</sup> degré.	55
Installations de prise de terre	59
Conclusion	61



## Table des figures

	Page
fig. 1 - Tension de contact et tension de défaut. ....	8
fig. 2 - courbe de tension de contact presu <sup>m</sup> ée en fonction du temps. ....	8
" 3a - principe de Neutralisation TNA .....	22
" 3b - " " TNB .....	22
" 4 - Mises à la terre supplémentaires du conducteur neutre....	22
" 6 - schéma d'un dispositif de protection à courant différentiel résiduel. ....	37
" 5 - Cas où le conducteur neutre ne possède pas de multiples mises à la terre. ....	22
" 7 - Boucle de défaut dans le cas de deux défauts simultanés l'un du au neutre l'autre à la phase....	41
" 8 - Installation avec neutre relié à un réseau d'eau publique. ....	41
" 9 - schéma de principe de IT. ....	44
" 10a - Cas des masses non interconnectées dans le schéma IT....	44
" 10b - " " interconnectées " ....	44
" 11 - Boucle de <del>te</del> défaut dans le schéma IT....	47
" 12 - " de double défaut " " ....	47

## Table des tableaux.

Tableau I: Durée maximale de maintien de la tension de contact presu <sup>m</sup> ée. ....	6
Tableau II: Conditions de résistance du corps humain....	6
Tableau III: Calibre maximal du dispositif de coupure automatique associé (avec $U_0 = 50V$ )....	35

## Table des symboles

- $V$ : tension simple  
 $U$ : tension composée  
 $U_f$ : tension de défaut  
 $U_c$ : tension de contact  
 $I_{cc}$ : courant de court circuit  
 $I_a$ : courant de fonctionnement du dispositif de protection dans le temps spécifié en fonction de  $U_c$   
 $I_N$ : courant nominal du dispositif de protection  
 $I_t$ : courant de fonctionnement du dispositif de protection dans le temps de coupure  $t$  à la tension  $U_c$  suivant la valeur  $m$ .  
 $I_d$ : courant de défaut  
 $I_{el}$ : courant d'électrocution  
 $S_{ph}$ : Section du conducteur de phase  
 $S_p$ : Section du conducteur de protection  
 $m$ : rapport entre  $S_{ph}$  et  $S_p$   
 $\rho$ : résistivité  
 $L_{max}$ : longueur maximale de canalisation.  
 $L_m$ : longueur maximale de canalisation pour un  $m$  donné  
 $l_i$ : longueur de canalisation de la masse  $i$  à la source  
 $l_p$ : longueur de canalisation du conducteur de protection  
 $R_n$ : Résistance de la prise de terre du neutre du transformateur  
 $R_m$ : Résistance de la prise de terre de la masse  
 $R_h$ : Résistance du corps humain  
 $R_p$ : Résistance de passage  
 $I_{\Delta N}$ : Seuil de fonctionnement du disjoncteur différentiel.



- $Z_T$ : Impédance directe du transformateur =  $R_T + j X_T$   
 $Z_{T0}$ : " homopolaire " =  $R_{T0} + j X_{T0}$   
 $Z_L$ : " directe de la ligne du réseau =  $R_L + j X_L$   
 $Z_{L0}$ : " homopolaire " " =  $R_{L0} + j X_{L0}$   
 $Z_1$ : " directe du conducteur de phase =  $R_1 + j X_1$   
 $Z_{10}$ : " homopolaire " " =  $R_{10} + j X_{10}$   
 $Z_0$ : " de mise à la terre du neutre  
 $Z_n$ : " de fuite de la phase n.



# INTRODUCTION

- L'énergie électrique se trouve à la base de notre civilisation technique moderne. La quantité de cette énergie ne fait qu'augmenter, il est donc indispensable d'en produire toujours plus, d'en augmenter la capacité de distribution.

- Cependant, la tâche des ingénieurs électriciens n'est pas seulement de produire et de distribuer mais aussi de réduire au maximum les risques encourus par les personnes.

Notre étude fait l'objet, en premier lieu, d'une analyse minutieuse de tous les paramètres pouvant avoir une influence sur le risque d'électrocution dans une installation à basse tension, ensuite de définir, suivant le type de contact et les particularités réellement <sup>offertes</sup> par l'installation, les moyens de protection adéquates.

Ce fait a conduit à l'élaboration d'un certain nombre de prescriptions assurant ainsi une meilleure protection dans les conditions normales d'utilisation et de définir le comportement des dispositifs de protection en régime anormal (avarié).

La réglementation de la norme NFC 15-100 (Edition 1977), portant sur le confort et la sécurité des personnes, n'est en fait qu'un chef d'œuvre obtenu par le biais de plusieurs études entreprises au début du 20<sup>ème</sup> siècle.

La détermination d'une protection judicieuse contre les dangers du courant électrique nécessitait tout d'abord une connaissance parfaite de ses effets sur le corps humain : Sensibilité, rôle de l'intensité du courant dans l'électrocution.

### Historique :

- Les résultats obtenus en 1910 par PREVOST et BATTELI, tous deux partisans de la théorie cardiaque qui attribue à l'action paralysante du courant sur le cœur, n'étaient pas rigoureux parce qu'ils reposaient sur des essais faits sur le chien et extrapolés sur l'homme. Néanmoins cette théorie semble fortement appuyée d'une part par des essais méthodiques <sup>et d'autres part</sup> dans les électrocutions pénales américaines ainsi que dans des accidents industriels. Partant de ces données, il a été facile de définir un certain nombre de moyens de protection contre l'électrocution qui permettent de diminuer au maximum les risques et ceci par la mise en place d'une bonne installation électrique qui répond aux exigences de la réglementation et du confort.



## chap.I Dangers du courant électrique.

- Les physiologues et spécialistes ont étudiés de près l'influence du courant électrique sur le corps humain et ont pu affirmer que ce ne sont pas les volts qui tuent, contrairement à ce que pensent beaucoup d'entre nous. Le danger d'électrocution ne dépend pas essentiellement de cette dernière, mais d'un certain nombre de paramètres ayant des explications physiques ou physiologiques. Le passage d'un courant électrique dans le corps humain se manifeste de deux manières :

- par une paralysie du système nerveux qui mène très vite à la substitution au mouvement normal du cœur d'oscillations désordonnées et le muscle cardiaque ne peut plus jouer son rôle de pompe et la mort survient rapidement.

- par un surchauffage du corps qui peut mener à une électrolyse des cellules du corps. L'arrêt du cœur ne se produit plus ou, tout au moins cet arrêt n'est pas définitif comme dans le cas précédent. Un tel cas, généralement obtenu par des intensités relativement élevées, de l'ordre de quelques ampères, entraîne inévitablement la destruction et la brûlure du corps humain, la mort peut arriver plus tard après quelques jours ou même quelques semaines.

Les observations et statistiques, suite à de nombreuses accidents, ont largement contribué à la détermination de ces paramètres ayant une influence sur le danger que peut occasionner le passage d'un courant électrique dans le corps humain.



## 1- Sensibilité du corps humain.

-L'étude de la sensibilité du corps humain pour une bonne protection est délicate car les résultats donnés par la Norme NF C 15-100 sont des expériences faites sur des animaux et qu'on a extrapolé sur des individus. Le corps humain présente des effets physiologiques différents en fonction des paramètres suivants :

### 1.1- Genre du courant:

On distingue le courant alternatif à fréquence industrielle, le Courant continu et le courant à haute fréquence.

#### a- Courant alternatif industriel.

Les effets physiologiques du courant alternatif industriel dépendent essentiellement de l'intensité du courant traversant l'individu et du chemin suivi par ce courant dans le corps humain.

Lorsque le courant alternatif traverse le corps humain, il ya substitution d'oscillations désordonnées au mouvement normal du cœur qui peut provoquer son arrêt.

#### b- Courant Continu.

Il a été constaté que les effets du courant continu et du courant alternatif sont les mêmes si le temps de passage est très court tandis que pour des durées de plusieurs secondes l'effet est le même pour un courant continu égale à 4 fois la Valeur de crête en courant alternatif.

### C. Courant à haute fréquence.

Le courant à haute fréquence n'exerce aucune action nerveuse sur l'homme, il peut seulement produire une action d'échauffement.

#### 1.2. Valeur.

Il est difficile et même impossible de déterminer avec exactitude la valeur du courant à partir duquel commence les risques de danger d'électrocution.

Néanmoins on peut, malgré tout, définir différents seuils pour un courant de 50 Hz:

- A partir de 0,5 mA : perception d'un léger picotement sans danger.
- A partir de 8 mA : choc douloureux pouvant entraîner des crispations musculaires.
- Au delà de 25 mA : le passage prolongé du courant alternatif provoque la tétanisation des muscles respiratoires. (cette valeur est de 50 mA pour un courant continu.)

#### 1.3. Temps de passage.

L'énergie électrique fournie par la source dans le cas d'une électrisation peut s'écrire :

$$W = \int_0^t u \cdot i \cdot dt = U \cdot i \cdot t.$$

La gravité de l'accident dépend essentiellement de la quantité d'électricité transmise au corps humain. Pour la sécurité des personnes, le temps de coupure diminue considérablement avec l'augmentation de la valeur du courant de passage. La variation du courant de sécurité en fonction du temps de coupure maximale peut être résumé dans le tableau I.



Tableau I Durée maximale de maintien de la tension de contact presu $\acute{m}$ ee

Tension de contact presu $\acute{m}$ ee (V)		courant traversant le corps (mA)	temps de fonctionnement max du dispositif (s)
Alternative	Continue		
< 50	< 100	< 25	$\infty$
50	100	25	5
75	130	43	1
90	150	56	0,5
110	170	77	0,2
150	200	120	0,1
220	250	210	0,05
280	310	300	0,03

Tableau II

Tension de contact (V)	Conditions de resistance du corps humain ( $R_b$ )			
	seches	humides	mouillees	immergees
10	6500	3200	1200	500
25	5000	2500	1000	400
50	4000	2000	875	300
100	2200	1500	730	260
250	1000	1000	650	200



## 2. Résistance du corps humain.

Le courant traversant le corps humain est limité par sa résistance électrique qui est la somme de trois résistances en série :

- Les résistances de contact à l'entrée et à la sortie du courant. (pression de contact; état de la peau).

- La résistance propre du corps lui-même.

- La résistance des circuits (sol; résistances de prise de terre).

Selon certains auteurs, le corps humain peut être représenté comme étant un assemblage de résistances et de résistances-capacités en parallèle.

La résistance du corps humain peut varier d'une personne à l'autre et dépend essentiellement des conditions dans lesquels s'effectue le contact (peau humide; sèche; mouillée; immergée.) ainsi que du chemin de passage du courant (main-main; main-pied; pied-pied.).

D'autre part, la résistance du corps humain dépend, dans des proportions notables de la tension appliquée, et elle est vraisemblablement plus faible en haute tension qu'en basse tension; en courant alternatif qu'en courant continu. Ceci est résumé dans le tableau II.

## 3. Tension de contact.

Si une personne touche une masse en défaut et un élément se trouvant à un potentiel différent (voir figure 1), apparaît alors une tension qui produit dans le corps de la personne le passage d'un courant dont l'intensité dépend de sa résistance. La valeur de ce courant doit être compatible avec les conditions de sécurité.

fig:1

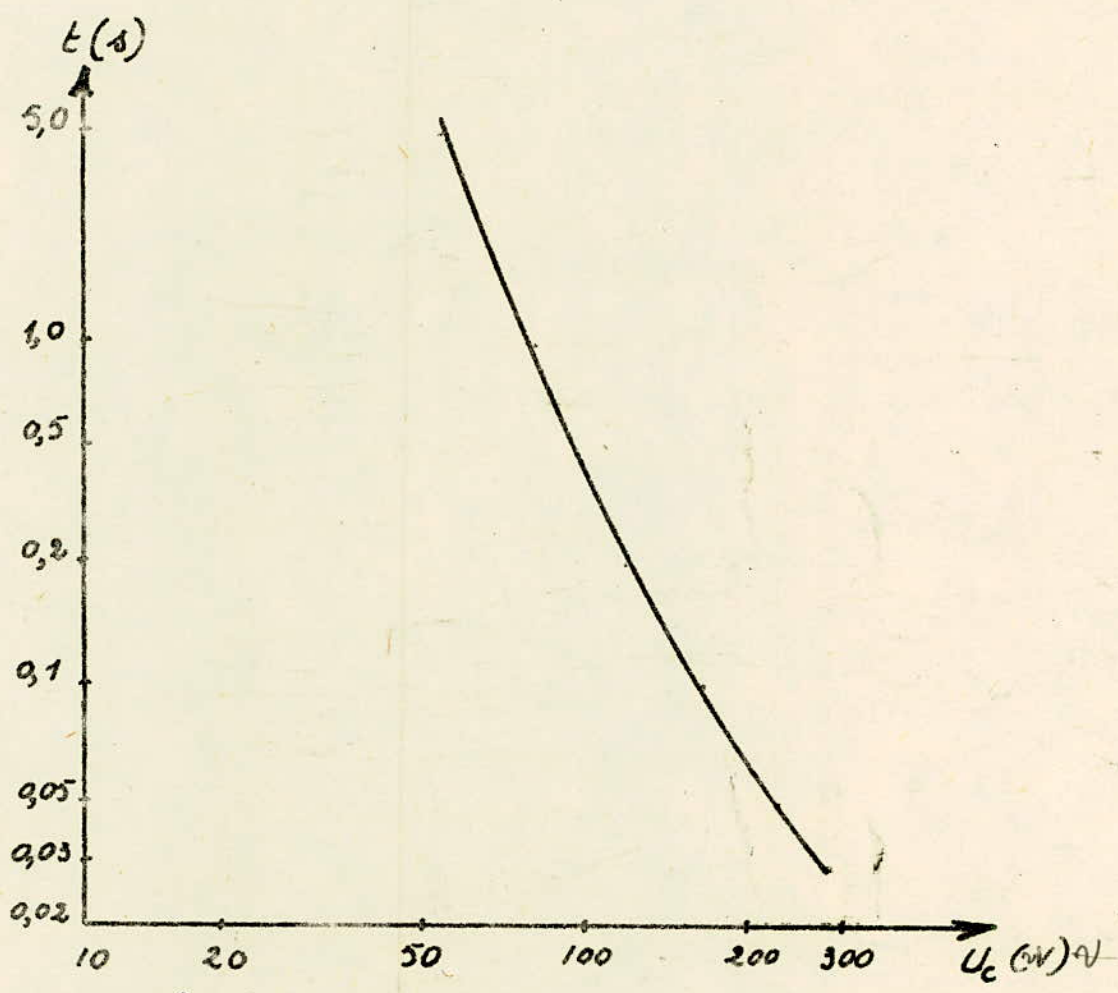
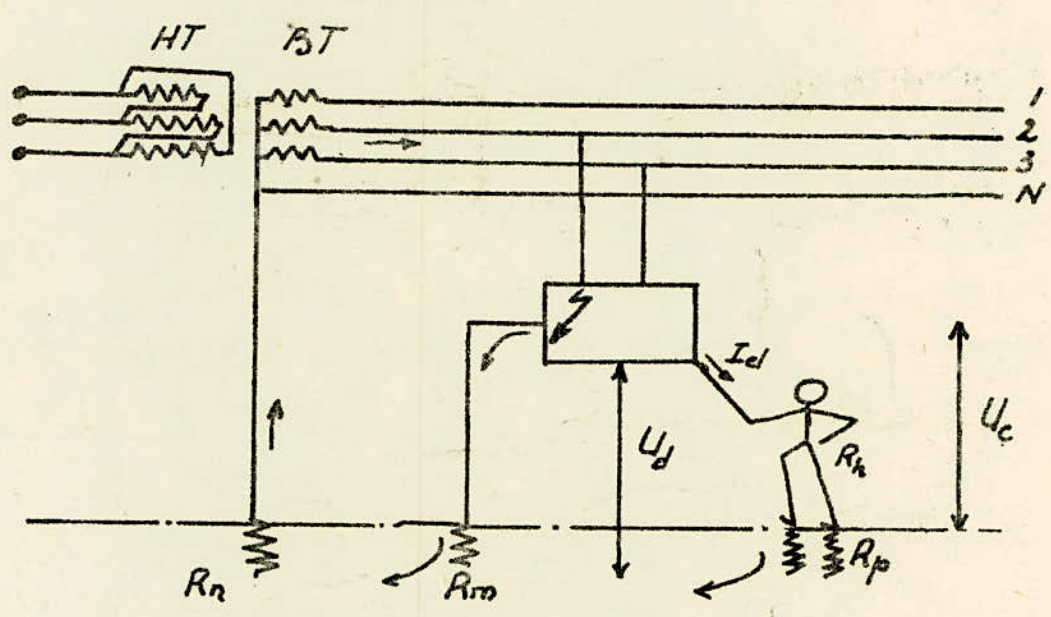


fig2 Courbe de tension de contact  
presumé en fonction du temps



D'après la définition donnée par la Norme, la tension de contact est la tension apparaissant lors d'un défaut d'isolement entre parties simultanément accessibles.

Ainsi on définit la tension limite conventionnelle comme étant la valeur de la tension de contact qui peut être maintenue indéfiniment sans danger pour les personnes.

Compte tenu des valeurs pratiques de la résistance électrique du corps humain et du seuil de déclenchement de la fibrillation cardiaque (25mA en courant alternatif et 50mA en courant continu), la tension à ne pas dépasser est :

- En courant alternatif :

+ Dans les locaux secs non conducteurs,

$$U_L = R.I = 0,025 \times 2000 = 50 \text{ V}$$

+ Dans les locaux humides,

$$U_L = 0,025 \times 950 = 24 \text{ V}$$

- En courant continu :

+ Dans les locaux secs non conducteurs,

$$U_L = 0,05 \times 2000 = 100 \text{ V}$$

+ Dans les locaux humides,

$$U_L = 0,05 \times 950 = 48 \text{ V.}$$

La tension de contact peut prendre des valeurs plus grandes que celles calculées précédemment. Seulement le pouvoir de coupure du dispositif de protection diminue considérablement (voir ~~fig. 2~~).

#### 4 - Tension de défaut.

Par définition, on appelle tension de défaut, la tension qui apparaît, lors d'un défaut d'isolement entre une masse et une prise de terre de référence, c'est à dire dont le potentiel n'est pas modifié par la mise sous tension de la masse (voir fig 1).

Les règles actuelles ne considèrent le plus souvent que la tension de défaut alors que seule, du point de vue danger, est à considérer la tension de contact car celle-ci est toujours inférieure à la tension de défaut, ce fait contribue d'ailleurs à augmenter la sécurité.

#### Classification des moyens de protection.

Les mesures de protection contre l'électrocution peuvent être classées comme suit:

- Les moyens de protections fondamentaux: permettent d'écarter toute possibilité de contact avec un conducteur sous tension en régime quelconque.

- les moyens de protections supplémentaires: sont appliquées là où il ya risque d'apparition de tension dangereuse en régime anormal.



# Moyens de protections fondamentaux.

Les mesures de protections contre les contacts directs sont essentiellement des mesures preventives consistant à mettre hors portée des personnes les parties actives des équipements ; ces mesures sont les suivantes :

- protection par isolation des parties actives
- " au moyen d'enveloppes ou de barrières.
- " par mise hors portée, par éloignement
- " des conducteurs mobiles contre une casse du point de connexion avec le récepteur.

## a. Protection par isolation :

La mesure de protection par isolation est la plus utilisée et en particulier dans les installations domestiques et dans la plupart des installations industriels ; c'est la seule pratiquée.

La mise hors portée par isolation consiste à recouvrir les parties actives des équipements électriques par une isolation appropriée qui est généralement une isolation principale.

Les qualités des isolants varient à l'usage, ceux ci vieillissent, se fendent, s'usent sous l'effet des intempéries, variations de températures, effort mécaniques rejetés, frottements...

Les qualités de cette isolation sont vérifiées par un essai diélectrique. Pour cela, cet essai diélectrique est effectué sur un échantillon d'appareil ayant été exposé à des conditions plus défavorables ; ceci vérifiera que l'appareil



n'est pas devenu dangereux pour les personnes qui viennent le toucher.

Par exemple, la tension de l'essai diélectrique est de 500V pour la très basse tension (TBT) et elle est de 1500V pour une tension d'utilisation de 220V.

#### b. Protection au moyen d'enveloppes ou de barrières.

La mise hors de portée au moyen de barrières consiste à disposer des obstacles efficaces empêchant, en usage normal, tout contact avec les parties actifs des équipements.

Les obstacles peuvent être constituer par des grillages si besoin est, un essai de vérification sera fait avec le doigt d'épreuve utilisé pour vérifier la protection contre les contacts directs.

Ces essais d'inaccessibilités des parties actives sont effectués sur les appareils et matériels avec toutes les parties qui peuvent être retiré sans l'aide d'un outil sont enlevés.

Lorsque les obstacles sont métalliques, il ya lieu d'examiner s'ils doivent être ou non considérés comme des masses.

Il est à noter que l'enlèvement des capôts de protection ou l'ouverture des couvercles sans l'aide d'un outil est interdite car l'emploi d'un outil par une personne est une action volontaire qu'elle entreprend et risque de trouver des pièces sous tension qui sont accessibles et risque d'être électrocuter.



c. Protection par mise hors de portée par éloignement.

La mise hors portée par éloignement consiste à disposer les parties actives des équipements par rapport aux emplacements où les personnes se trainent ou circulent habituellement à une distance telle qu'un contact fortuit soit impossible, directement ou indirectement par l'intermédiaire d'objets conducteurs. Il doit être tenu compte, pour la disposition des parties actives des équipements, des dimensions et de la forme des objets conducteurs pouvant être manipulés à proximité. Compte tenu du fait que cette mesure n'assure pas une protection complète on prévoit des mesures compensatrices :

- rappeler aux gens qui pénètrent dans les locaux qu'ils doivent faire attention.
- prévenir tout contact accidentel avec les parties actives non protégées.

d. Protection des conducteurs mobiles contre une casse.

Cette mesure de protection est appliquée surtout au niveau du point de connexion avec le récepteur.

e. Protection contre l'arc électrique.

- L'arc de coupure d'un dispositif de commande ou de protection se produisant à l'intérieur du matériel ne doit pas se propager à l'extérieur.

- L'arc dû à un court-circuit doit être éteint le plus rapidement par un dispositif de protection adapté.

## chp. III Moyens de protections supplémentaires.

### 1. Généralités.

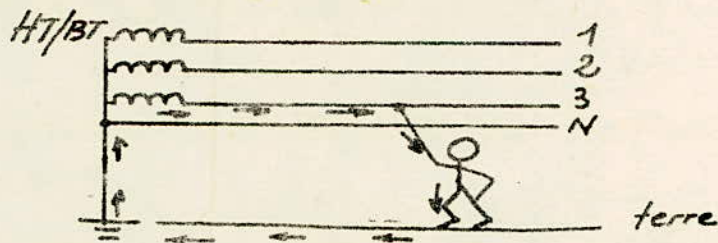
Les conséquences d'un contact direct dépendent non seulement des conditions dans lesquels s'effectuent mais de la tension du réseau et du régime du transformateur HT/BT.

Les régimes du neutre, en nombre de trois, sont les suivants :

- Mise à la terre direct;
- Point neutre isolé;
- Mise à la terre par l'intermédiaire d'un éclateur.

### 2. Mise à la terre du point neutre.

#### a. Mise à la terre direct.



ce régime consiste à relier directement le point neutre de l'enroulement secondaire du transformateur HT/BT à la terre ; c'est le cas du réseau de distribution publique.

Lors d'un contact direct avec un conducteur de phase, le corps d'un individu est traversé par un courant qui n'est limité que par la résistance du corps, des contacts et de la prise du neutre du transformateur or la résistance de la prise de terre (aussi de contact)

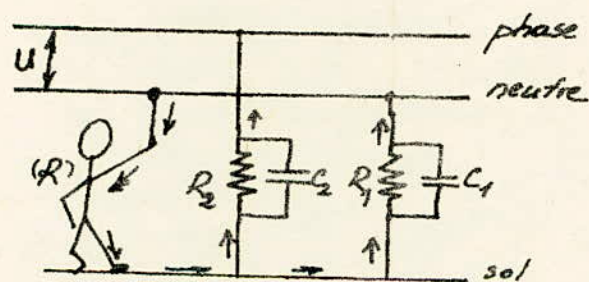


est toujours négligeable devant celle du corps humain ce qui revient à dire que la tension de contact est sensiblement égale à la tension simple  $V$ . Pour parer contre ce danger il faudrait prévoir alors des moyens de protection dites fondamentaux qui ont été vus précédemment.

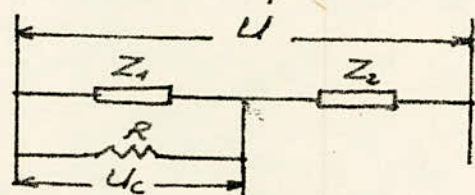
### b. Le point neutre isolé.

Il peut être supposé qu'en isolant le point neutre de la terre on obtiendrait un réseau à sécurité "intrinsèque" ne présentant aucun danger en cas de contact direct. Mais en réalité il ya à considérer le chemin de retour offert par les résistances d'isolement et les capacités des conducteurs par rapport à la terre. Pour le calcul de la tension de contact on peut considérer deux éventualités qui sont:

#### 1. Cas du courant monophasé.



D'où le schéma équivalent :



D'où :

$$U_c = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} U$$

avec :

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 R}{R + Z_1}$$

$$Z_1 = \frac{R_1 (-j/C_1 \omega)}{R_1 - j/C_1 \omega} = \frac{R_1}{1 + jR_1 C_1 \omega}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + jR_2 C_2 \omega}$$

Dans le cas où les capacités sont négligeables et  $R_1 = R_2$ ,  $U_c$  sera donc égale, après tout calcul fait à l'expression:

$$U_c = \frac{U}{2 + R_1/R}$$

Exemple :

supposons que les résistances d'isolement de chaque conducteur par rapport à la terre soient égales à  $10ks\Omega$  (valeur faible) et attribuons une résistances de  $1000s\Omega$  à la résistance du corps humain.

Dans un réseau à tension 220/380V, la tension de contact est :

$$U_c = \frac{380}{12} = 32 \text{ V}$$

c'est une valeur acceptable en courant continu mais trop élevée en courant alternatif dans un local humide. Et dans réseau 127/220V, la tension de contact est :

$$U_c = \frac{220}{12} = 18,3 \text{ V}$$

c'est une valeur acceptable en courant continu et en courant alternatif.

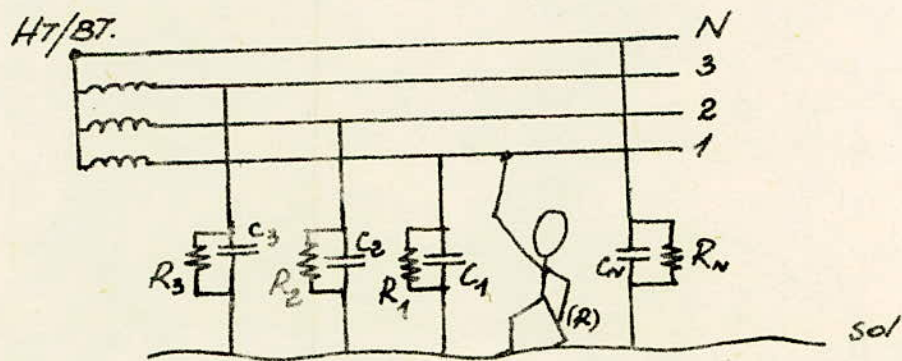
## 2. Cas du courant triphasé.

Dans le cas où les impédances d'isolement, par rapport



à la terre,  $Z_1, Z_2, Z_3$  sont égales; le fait qu'une personne touche un conducteur, le système devient déséquilibré; en d'autres termes le potentiel du point neutre n'est pas nul et peut être calculé par la formule de Millikan, à savoir que :

$$V_N = \frac{\bar{V}_1 G_1 + \bar{V}_2 G_2 + \bar{V}_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_N}$$



- $R$  : Résistance électrique du corps humain.
- $G_i$  : Représente l'admittance de fuite de la phase  $i$  avec le sol
- $V_i$  : Représente la tension simple de la phase  $i$

avec :  $Z_{eq} = \frac{R Z_1}{Z_1 + R}$

$$Z_i = \frac{R_i}{1 + j R_i C_i \omega}$$

la tension de contact est donc :

$$U_c = \bar{V}_1 - \bar{V}_N = \frac{(G_3 + G_2 + G_N) \bar{V}_1 - G_2 \bar{V}_2 - G_3 \bar{V}_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_N}$$

Dans le cas où  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = R_1$  et  $Z_N = 0$   
la tension de contact devient :

$$U_c = \frac{V}{1 + \frac{R_1}{3R}}$$

Exemple :

Supposons que  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$  (mauvais isolement) et  $R = 1000 \Omega$ . et nous sommes en présence d'une ligne triphasé à capacité négligeable, la tension de contact est :

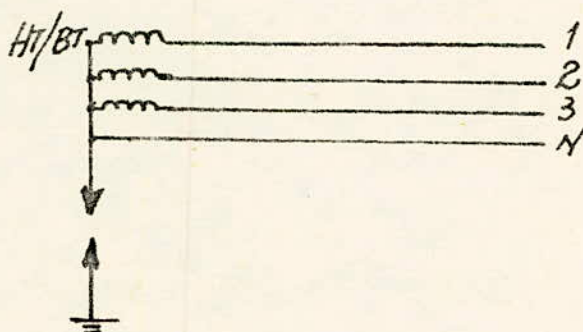
Pour un réseau 127/220 (V)  $\rightarrow U_c = 29,3 \text{ v}$   
et pour 220/380 (V)  $\rightarrow U_c = 51 \text{ v}$

Dans les deux cas la tension de contact est dangereuse en courant alternatif dans un local humide. Pour remédier à ce problème il faut faire augmenter la résistance d'isolement de telle façon à ne pas dépasser la tension de contact dangereuse.

La valeur du courant traversant une personne en contact direct avec l'une des phases du réseau dépend essentiellement du niveau d'isolement (Caractérisé par  $R_1$ ) et de l'étendu de l'installation (Caractérisé par la Capacité); le contact est donc d'autant plus dangereux que le niveau d'isolement est faible.

Avec  $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$  et pour  $U = 380 \text{ V}$ ; la tension de contact est de 23,5 v (c'est une valeur tout juste acceptable).

c. Neutre relié par l'intermédiaire d'un éclateur.



Ce régime consiste à relier le neutre du transformateur HT/BT par l'intermédiaire d'un éclateur à la terre.



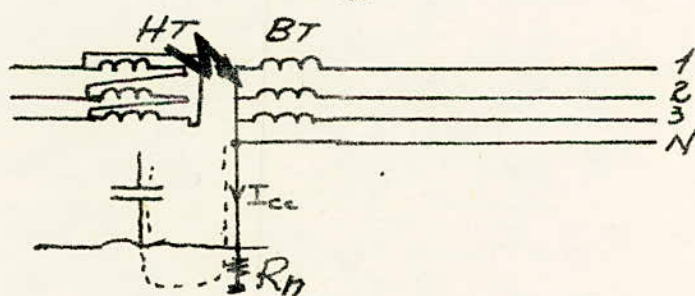
Un raisonnement analogue à celui étudié dans le cas du neutre isolé amènerait à la détermination de la tension de contact. L'éclateur a pour but d'éliminer les surtensions dû au passage de la HT sur la BT. En général, ces surtensions sont limités par la tension d'amorçage de l'éclateur installer sur le réseau à BT. Pour les réseaux dont la tension ne dépasse pas 250 V, cette tension d'amorçage est de 2500 V.

### 3 - Résistance de la mise à la terre du neutre.

La mise à la terre du point neutre est obligatoire si le transformateur est alimenté d'une tension dépassant 1 kv. Il ya le danger d'apparition de la HT du côté BT dans le cas d'un court-circuit HT-BT. Du côté HT il ya des protections qui coupe le circuit mais cela peut être trop lent.

La mise à la terre doit être faite de telle manière que la tension sur le conducteur neutre BT ne dépasse pas la valeur admissible donc :

$$R_n \leq \frac{U_{adm}}{I_{cc}}$$



On en déduit la résistance maximale de la mise à la terre du neutre des réseaux à BT :

5 \$\Omega\$ pour les réseaux aériens

1,5 \$\Omega\$ pour les réseaux souterrains.

Il est interdit d'appliquer la mise du neutre d'un transformateur de séparation ou dans le cas de la BT.

## chap. III. A. Mesures de protection supplémentaire de premier degré.

L'adaptation et le choix du régime du neutre du transformateur dépend essentiellement de la manière dont les masses sont connectées à la terre et entre eux et des disponibilités réelles offertes par l'installation ; ainsi deux moyens de protection supplémentaires de 1<sup>er</sup> degré sont définis.

- La Neutralisation

- La Mise à la terre.

Le but de cette protection est d'installer des dispositifs qui permettent de diminuer la tension de contact et de les couper dans un temps conforme à la courbe de sécurité.

Notons que les deux modes de protection nécessitent des conducteurs supplémentaires de protection.



## I. Neutralisation.

La neutralisation consiste à connecter directement les masses métalliques du réseau qui est mis à la terre et adapté à la neutralisation (dénommée TN)

### 1. Principe.

En cas de mise sous tension accidentelle d'une masse ou d'un élément conducteur, le courant de défaut se referme par le conducteur neutre et devient un courant de court-circuit phase-neutre qui mène à la coupure du circuit avarié. Ce schéma ne peut être utilisé que dans des installations alimentées par des postes de transformation ou source autonome et nécessite des mesures pour empêcher toute montée dangereuse du potentiel et ceci par la mise en place :

- des liaisons équipotentielles de toutes les masses et de tous les éléments conducteurs accessibles.
- liaison du conducteur neutre à un système de prise de terre réparti dans l'installation aussi régulièrement que possible.

Deux procédés de connections des masses au neutre sont possibles :

- Le conducteur neutre et le conducteur de protection sont confondus et les masses sont reliées localement au conducteur "TN-A" (voir fig 3a)
- Le conducteur neutre et le conducteur de protection sont distincts et sont seulement reliés à l'origine de l'installation (schéma TN-B, voir fig 3b).

Le schéma TN-A est celui de la véritable mise au neutre tandis que le schéma TN-B est un

fig: 3a

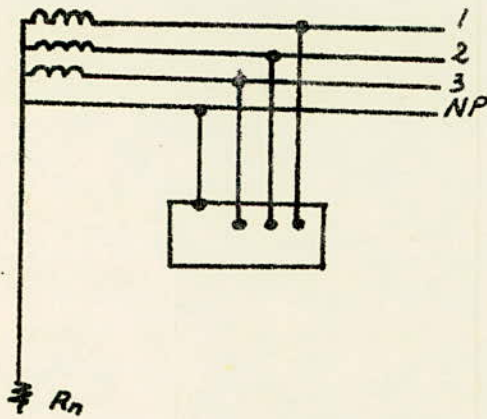


fig: 3b

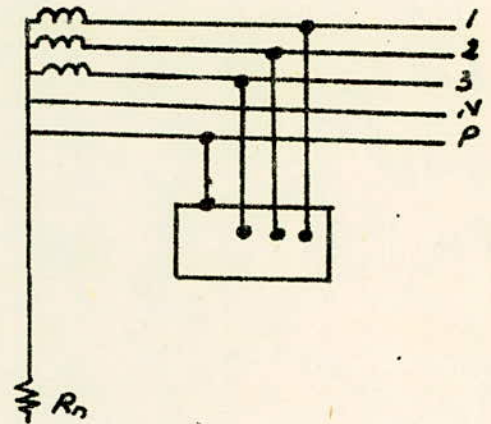


fig: 4

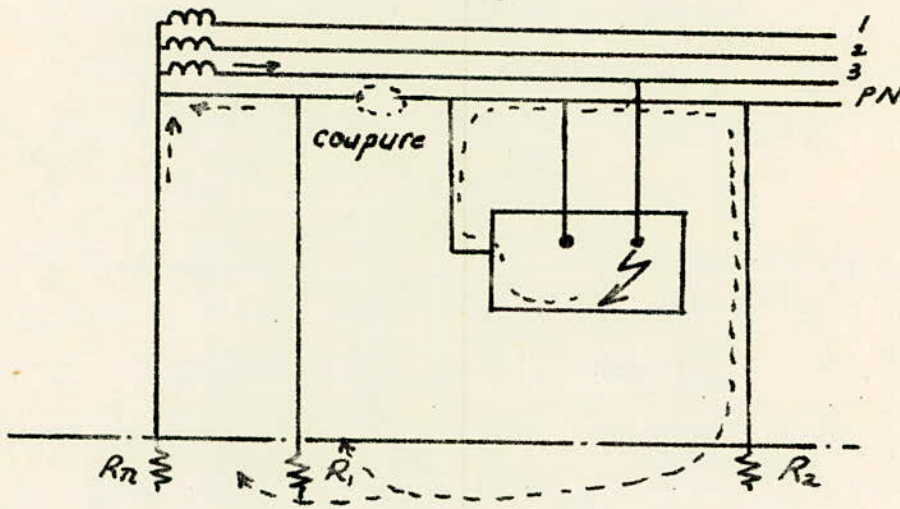
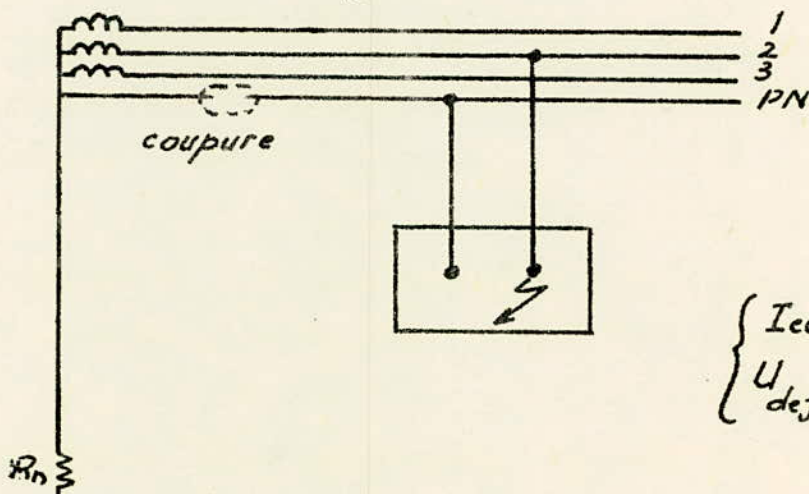


fig: 5



$$\begin{cases} I_{cc} = 0 \\ U_{\text{defaut}} = V \end{cases}$$



25

schéma qui ne présente pas les avantages de simplicité et d'économie. En effet c'est seulement dans le TNA qu'on fait l'économie d'un conducteur et d'un pôle sur l'appareillage de protection de commande ou de sectionnement.

Du fait du rôle de sécurité du conducteur PN le schéma TNA n'est pas admis dans les câbles souples ni dans les canalisations fixes de section inférieure à  $10\text{mm}^2$  en raison des risques de rupture du conducteur de protection.

Dans une installation on utilise en pratique les 2 schémas; le schéma "A" pour les distributions principales et le schéma "B" pour les circuits terminaux et les canalisations mobiles. Le schéma "B" doit être toujours utilisé en aval du schéma "A" sinon le courant du neutre pourrait circuler dans le conducteur de protection.

## 2 - Règles du réseau adapté au Neutralisation.

La neutralisation est applicable si les quatre conditions sont réalisées :

- Le point neutre du transformateur doit être relié à une prise de terre dont la valeur appropriée.

- Le conducteur neutre doit avoir des prises de terre supplémentaires régulièrement réparties.

- Le conducteur neutre doit avoir une section bien déterminée.

- La protection est assurée par un dispositif à maximum de courant.

a/ Le secondaire du transformateur HT/BT doit être relié à la terre par une résistance de prise de terre  $R_T$  qui permet de reconstituer la boucle de défaut en cas de coupure du conducteur de protection; d'où



l'établissement d'un courant de défaut qui fait agir le dispositif de protection

b/ Dans ce type de schéma le conducteur neutre doit avoir toujours de multiples mises à la terre (fig 4) si cette dernière consigne n'est pas respectée et un défaut d'isolement entre une phase et la masse apparaît et le conducteur neutre se trouve couper la tension de défaut sera donc égale à la tension de phase ; à un dispositif de protection ne peut éliminer ce défaut du fait que le courant de défaut est nul (voir schéma 5).

Donc l'avantage des mises à la terre supplémentaires est de reconstituer la boucle de défaut, en cas de coupure du conducteur neutre, et un courant de court-circuit s'établit pour faire agir le dispositif de protection : la tension de défaut se trouve ainsi réduite.

c/ Section du conducteur de protection (PNe ou P).  
La section minimale du conducteur neutre utilisé comme conducteur de protection est donnée comme suit ; dans une installation triphasée ;

- Egale à celle du conducteur de phase lorsque sa section est inférieure ou égale à  $16 \text{ mm}^2$ , avec un minimum de  $2,5 \text{ mm}^2$  ;

- Egale à  $16 \text{ mm}^2$  si la section du conducteur de phase est supérieure à  $16 \text{ mm}^2$  sans excéder  $35 \text{ mm}^2$  ;

- Egale à la moitié de la section du conducteur de phase lorsque cette dernière est supérieure à  $35 \text{ mm}^2$ .



Dans une installation monophasée la section du conducteur de phase est égale à celle du conducteur neutre.

Dans le cas de certaines installations, où le courant de défaut peut atteindre des valeurs trop dangereuses, l'application des prescriptions données précédemment nous donne des sections insuffisantes.

Les sections sont alors déterminées d'après la formule :

$$S_{Pr} = \frac{I}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{T}}$$

$S$ : [ $\text{mm}^2$ ] section du conducteur.

$I$ : [ $A$ ] courant de défaut.

$t$ : [ $s$ ] temps de fonctionnement du dispositif de protection.

$T$ : [ $^{\circ}C$ ] température maximale admissible dans les conducteurs.

$\alpha$ : coefficient de proportionnalité.

$$T = \begin{cases} 100^{\circ}C & \text{pour les conducteurs isolés} \\ 150^{\circ}C & \text{" " " nus} \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} 13 & \text{pour les conducteurs en Cu} \\ 8,5 & \text{" " " Al} \\ 4,5 & \text{" " " Fe} \end{cases}$$

En outre l'exigence sur la section des conducteurs de protection; ces derniers doivent être protégés contre les détériorations et ne doivent en aucun cas comporter des coupe-circuits ni interrupteurs. Lorsqu'il est fait usage de conducteur blindés; la gaine extérieure peut être utilisée comme conducteur de protection des circuits correspondants. La continuité doit être parfaitement assurée.

## d) La protection.

Lors d'un contact d'un conducteur de phase et d'une masse le courant doit être coupé automatiquement dans un temps suffisamment bref pour que les conducteurs ne soient pas portés à une température trop élevée mais cette protection contre les contacts indirects n'est pas suffisante car il y a lieu en outre de vérifier que pendant le temps de fonctionnement la tension de contact doit être inférieure à la tension limite de sécurité:

## i - calcul du courant de court-circuit

(Cas d'une ligne radiale).

Pour calculer le courant de court-circuit monophasé on assimile un contact franc à un court-circuit monophasé et on a :

$$I_{cc} = \frac{3V}{Z_0 + Z_s + Z_1} = \frac{3V}{Z_1}$$

$$\text{avec : } Z_1^2 = (2R_T + 2R_L + R_{T0} + R_{L0} + 2R_1 + R_{10})^2 + (2X_T + 2X_L + X_{T0} + X_{L0} + 2X_1 + X_{10})^2$$

on a pris :  $Z_1 = Z_s$ .

Selon les prescriptions de la NFC 15-100, on peut toujours pour des sections inférieures à  $25 \text{ mm}^2$  et souvent à  $150 \text{ mm}^2$  négliger la valeur de la réactance devant celle de la résistance et  $Z_1$  devient :

$$Z_1 = 3(R_T + R_1 + R_L + R_N)$$

$$\text{donc : } I_{cc} = \frac{V}{R_T + R_1 + R_L + R_N}$$



$(R_T + R_Y + R_L + R_N)$  représente la résistance de la boucle de défaut, généralement si la puissance du transformateur est inférieure à 250 kVA ( $Z_T = 0,04 \text{ su}$ ) on prend en considération l'impédance interne du transformateur.

## ii. Calcul de la tension de contact.

La tension de contact est égale à la chute de tension dans le conducteur PN entre la masse et le point neutre de la source.

$$U_c = R_N \cdot I_{cc} \quad \text{avec} \quad I_{cc} = \frac{V}{R_a + R_N}$$

et  $R_a = R_T + R_L$

$$U_c = \frac{V}{1 + R_a/R_N}$$

En supposant que le conducteur PN passe par la même canalisation que le conducteur actif ( $L_a = L_{NP}$ ) et qu'ils aient la même résistivité  $\rho$ .

on prend :  $\frac{R_a}{R_N} = \frac{S_N}{S_a} = \frac{1}{m}$

$$U_c = \frac{m}{1+m} V.$$

Exemple :

Selon les prescriptions de la NF.C. 15-100  $m$  peut varier de 1 à 4.

Dans une installation 220/380 V et pour  $m=1$ , la tension de contact  $U_c = 0,5 V_{ph} = 110 \text{ Volts}$ .

A partir de la courbe de sécurité  $U_c = f(t)$  on détermine le temps maximum de coupure pour un dispositif de protection  $t = 0,2 \text{ s. (fig 2)}$



### 3- Dispositif de protection.

comme on l'a souligné un peu plus haut à savoir que le courant de défaut est un courant de court-circuit, les dispositifs de protection ainsi installés sont donc des dispositifs à maximum de courant:

- coupe-circuit à fusibles
- disjoncteur à maximum d'intensité.

Le choix du dispositif de protection dépend essentiellement de deux points:

a/ Le dispositif doit posséder un pouvoir de coupure au moins égale au courant de défaut.

b/ La tension de Contact qui apparaît lors d'une mise sous tension accidentelle d'une masse doit être coupée dans un temps conforme à la courbe de sécurité, et que la température atteinte par le conducteur ne dépasse pas une valeur dangereuse pour la conservation de l'isolation. Cette dernière condition se trouve toujours rejetée du fait qu'elle se trouve moins sévère que la première.

#### - Analyse du dispositif de protection:

##### a/ coupe-circuit à fusible:

Un fusible est caractérisé par son courant nominal  $I_n$  qu'il peut supporter indéfiniment sans que l'échauffement dépasse les limites, par son intensité

$I_f = K I_n$  de fusion;  $k$  dépend du temps qu'on a du dispositif de protection pour couper le circuit, ainsi que par sa nature.

On distingue trois types de fusibles:

type gF : à action rapide

type gT : à action tempérée



type aM : n'assure que la protection contre les court-circuits

Dans la zone de fonctionnement du coupe-circuit, les fusibles répondent à la caractéristique :

$$I^4 t = C_{ste}$$

Pour un temps de coupure égale à 5s,  $K$  peut prendre les valeurs suivantes :

type gI	$I_n \leq 100A$	$K_s = 5,5$
	$100A < I_n \leq 200A$	$K_s = 6,5$
	$200A < I_n \leq 500A$	$K_s = 7$
	$I_n > 500A$	$K_s = 9$

type aM :  $\forall I_n$   $K_s = 8,5$

Pour un temps  $t$  quelconque de coupure  $K_t$  vaut :

$$K_t = K_s \sqrt[4]{\frac{5}{t}}$$

pour choisir le fusible il faut que  $I_{cc} > K I_n = I_t$

- Longueur maximale de canalisation protégée par le coupe circuit :

Comme on l'a montré précédemment, le courant de court-circuit vaut :

$$I_{cc} = \frac{V}{R_a + R_N} = \frac{V}{R_a (1+m)}$$

$$\text{or : } R_a = \rho \frac{L}{S_a}$$

D'après la norme française NFC 15-100 ; on suppose qu'en cas de court-circuit la tension de la source serait égale à 0,8 fois la tension nominale en régime normal.

D'où la longueur maximale de canalisation protégée par un coupe-circuit à fusible :

$$L = \frac{0,8 V}{\rho(1+m)} \frac{S_a}{I_{cc}}$$

or  $I_{cc} > I_t$  ; avec  $I_t$  courant de fonctionnement du dispositif de protection.

$$L_{max} = \frac{0,8 V}{\rho(1+m)} \times \frac{S_a}{I_t}$$

En calculant la longueur maximale de canalisation  $L_1$  pour  $m=1$  (donc un certain temps de coupure  $t_1$ ) on peut en déduire la longueur maximale de canalisation pour une valeur quelconque de  $m$  (pour un temps  $t_m$ ).

$$L_m = L_1 \cdot \frac{2}{1+m} \sqrt[4]{\frac{t_m}{t}}$$

b - Disjoncteur à maximum de courant.

Le courant de défaut doit être supérieur ou égal au courant du déclenchement magnétique  $I_m$ .

$$\text{or } V = Z_d \cdot I_d$$

De ce fait ; le temps de coupure du disjoncteur sera conforme à la courbe de sécurité si  $Z_d \leq \frac{V}{I_m}$  et le courant de défaut phase-neutre est au moins égale au courant assurant le fonctionnement du disjoncteur en 5 secondes au plus.

$$\text{Donc } I_{cc} > K I_n$$

$K$  dépend du type de disjoncteur et du temps de coupure exigé :

Pour  $t = 5 \text{ s}$  ; on a les valeurs de  $K$  pour les disjoncteurs ;

$$\text{type L : } K = 2,7.$$



type U :  $K=4$

Autres types :  $K=15$ .

Pour déterminer les longueurs maximales de canalisation afin que le système de protection contre les surintensités, placé à l'origine d'une installation assure également la protection contre les défauts d'isolement: il faudrait connaître le courant de fonctionnement selon le type du disjoncteur

$$I_{cc} > K I_n$$

$$\text{donc; } L_{\max} = \frac{0,8 V S_a}{\rho(1+m) K I_n}$$

#### 4- Mesures particulières nécessaires.

- Analyse des conditions de protections lors de la coupure du conducteur de protection:

Le dispositif de protection, contre les surintensités, précédemment dimensionné suivant le temps de coupure exigé et le courant de court-circuit calculé, assureront également la protection dans le cas où il y aurait coupure du conducteur de protection si :

$$\begin{cases} U'_c \leq U_c \\ I'_{cc} \geq I_{cc} \end{cases} \quad \begin{array}{l} U'_c \text{ et } I'_{cc} \text{ tension de contact} \\ \text{et courant de c.c avec coupure} \end{array}$$

Ces deux dernières conditions nous amènent à choisir des valeurs de prises de terre supplémentaires appropriées pour que le dispositif de protection

Contre les surintensités agisse lors d'un défaut d'isolement.

Cependant un dispositif différentiel assure une protection sans que les valeurs des prises de terre supplémentaires soient faibles.

Avec une sensibilité de 30mA, un dispositif différentiel assure une protection contre les contacts indirects même si la résistance des prises de terre est anormalement élevée :

800  $\Omega$  dans les locaux humides,

1670  $\Omega$  dans les locaux secs.

- Cas des grandes longueurs de câbles.

Dans le cas où l'impédance de la boucle de défaut est trop élevée, l'intensité de court-circuit est trop faible pour faire fonctionner les dispositifs de protection à maximum de courant dans un temps voulu; on installe alors un disjoncteur différentiel tel que son seuil de fonctionnement soit inférieur au courant de défaut :

$$I_{Dn} < I_{\text{défaut}}$$



## II Mise à la terre

Ce moyen de protection supplémentaire consiste à relier les masses métalliques directement à la terre. Deux régimes du neutre du transformateur peuvent être définis :

- Neutre du transformateur relié à la terre (T.T)
- " " " isolé (ou impédant) : TN

### A- Schéma T.T

#### 1- Principe :

En cas de mise sous tension accidentelle d'une masse ou d'un élément conducteur le courant de défaut se referme en parcourant la boucle de défaut qui comprend les prises de terre du neutre du transformateur et des masses (fig 6)

#### 2- Réseau adapté au schéma TT

- a- La résistance des prises de terre des masses doit être choisie convenablement.
- b- Toutes les masses protégées par un même dispositif, doivent être reliées à la même prise de terre.
- c- La protection est assurée par un dispositif différentiel.

a- Lors d'un contact direct avec une masse se trouvant en défaut ; la tension de contact ne doit en aucun cas dépasser la tension de sécurité ; cette condition est formulée par l'inégalité :

$$R_m \cdot I_a \leq U_L$$

b- Un dispositif possédant un courant de fonctionnement  $I_a$  ne peut protéger une installation électrique que si les masses soient interconnectées à une même prise de terre  $R_m$ . Dans le cas contraire il faudrait installer des prises de terre à chaque masse dont la valeur doit être inférieure au quotient  $U_L / I_a$ . En pratique cette condition s'avère difficile sinon impossible à réaliser, en plus du problème économique qu'elle pose.

### c. Protection

La nature du dispositif de protection installé pour assurer la protection contre les contacts indirects dépend de la valeur des prises de terre des masses.

On remarque que si  $R_m$  est très faible, le courant de défaut peut atteindre une valeur suffisante pour pouvoir installer un dispositif à maximum de courant; sinon l'installation d'un dispositif différentiel est nécessaire pour éliminer l'apparition de toute tension de contact dangereuse.

Suivant la valeur de cette prise et un temps de fonctionnement, pour les coupes circuit et disjoncteurs à maximum de courant, inférieur à 5s; le tableau III dimensionne le calibre maximal du dispositif de protection.

D'après les résultats obtenus dans le tableau ; on peut signaler que les dispositifs à maximum d'intensité nécessitent de faibles résistances des prises de terre, qui sont souvent difficiles à réaliser (nature du sol, sécheresse, variation de l'humidité...)

De ce fait, un dispositif différentiel est indispensable pour assurer la protection contre les contacts indirects.



Tableau III Calibre maximal du dispositif  
de coupure automatique associe  
avec  $U_L = 50V$

Resistances maximales des prises des masses ( $\Omega$ )	I nominal du coupe circuit d fusible (A)	Courant de reglage à maximum deco (A)	seuil de fonctionnement du différentiel $I_{\Delta N}$
0,5	32	32	$\sqrt{I_{\Delta N}}$
0,6	25	32	"
0,7	20	32	"
0,75	20	25	"
0,9	16	25	"
1,1	16	16	"
1,3	10	16	"
1,6	10	10	"
1,9	6	10	"
2,5	6	6	20 A
5	ne conviennent pas		10 -
10	"	"	5-
17	"	"	3-
50	"	"	1-
100	"	"	0,5-
167	"	"	0,3-
500	"	"	0,1-
1670	"	"	30mA
4150	"	"	12mA
8300	"	"	6mA

### 3- Disjoncteurs différentiels:

fig 6

Le principe de la protection est basé sur le fait que dans un circuit polyphasé ne présentant pas de défaut d'isolement la somme géométrique des courants parcourant les conducteurs actifs est nulle.

En cas de défaut entre une masse reliée à la terre et un conducteur dans lequel circule un courant, le courant de défaut en se refermant par la terre s'ajoute au courant normal dans le conducteur en défaut et crée un déséquilibre; la somme géométrique des courants parcourant les conducteurs n'est plus nulle, il reste un courant résiduel qui est détecté par un transformateur torse à l'intérieur duquel passent les conducteurs actifs. Ils constituent le circuit primaire du transformateur. Aux bornes du circuit secondaire, bobiné sur le transformateur torse, apparaît une tension contrôlée par un relais à seuil qui commande l'ouverture du circuit ainsi protégé.

#### Caractéristiques des disjoncteurs différentiels

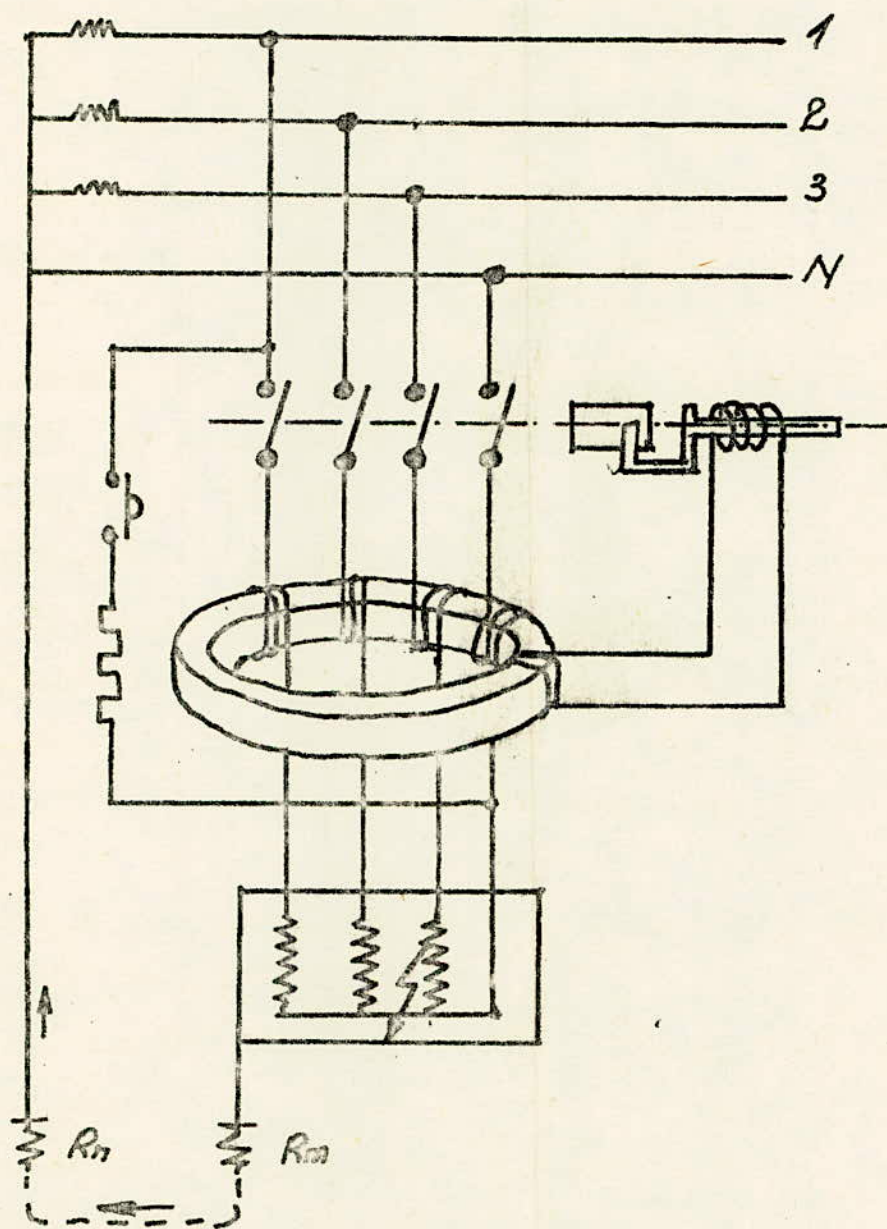
##### a) Sensibilité:

C'est la plus petite valeur du courant de défaut qui peut actionner le disjoncteur. La sensibilité est d'autant plus grande que la valeur du seuil de fonctionnement est faible.

La sensibilité doit être adaptée à la prise de terre pour que le potentiel des masses en défaut ne puisse dépasser la tension de sécurité  $R_m \leq U_0 / I_{AN}$ . L'utilisation de la haute sensibilité est un moyen contre les contacts directs, mais le couplage de



fig 6 Schema d'un dispositif de protection à courant différentiel résiduel



protection à courant de défaut doit être établie de façon à ce qu'il ne faille pas s'attendre à un déclenchement intempestif qui serait provoqué par un courant de fuite apparaissant normalement dans l'installation en raison de leur set points ou du nombre d'appareils qu'elle alimente; pour cela il faut procéder à un subdivisionnement de telle façon que le courant de fuite des appareils installés soient inférieur au seuil de fonctionnement du disjoncteur.

b- Le disjoncteur différentiel doit être à action rapide; agir dans un temps au plus égal à 0,2 s

c- En cas de défaut, le disjoncteur doit procéder à une coupure omnipolaire.

d- pouvoir de coupure: c'est la valeur maximale du courant de fonctionnement, sans risque et quelque soit le courant de réglage, lors d'un court circuit.

e- Sélectivité:

La sélectivité de protection consiste à s'assurer qu'en cas de défaut seul le dispositif de protection situé immédiatement en amont du défaut fonctionne. Pour éviter l'inconvénient d'une coupure générale, il serait préférable d'obtenir une sélectivité des déclenchements en plaçant à l'origine de l'installation un dispositif différentiel légèrement temporisé et sur chaque dérivation des disjoncteurs non retardé. Il peut être nécessaire prévoir des dispositifs différentiels de sensibilité différente pour



protéger des parties différentes de l'installation.

Il existe deux modes de sélectivités

i - Sélectivité verticale :

Celle-ci doit satisfaire les 2 conditions suivantes :

- Le courant différentiel nominal de fonctionnement du dispositif placé en amont doit être au moins égale au double de celui du dispositif placé en aval

$$I_{\Delta \text{amont}} / I_{\Delta \text{aval}} \geq 2$$

- Le retard du dispositif amont doit être supérieur au temps de fonctionnement du dispositif aval, sans toute fois dépasser un temps compatible avec la sécurité.

ii - Sélectivité horizontale :

Dans ce cas, seul le circuit ou groupe de circuit protégé par le même dispositif différentiel est coupé, en cas de défaut, dans l'un des circuits, le reste de l'installation demeurant alimenté.

#### 4 - Mesures particulières nécessaires dans le schéma TT

1°) Supposons l'existence de deux défauts simultanés, l'un du au neutre mis à la terre et l'autre à un défaut franc phase-masse. ( fig. 7 )

Un dispositif différentiel placé à l'origine de l'installation n'est sensible qu'au seul courant  $I_f$  se refermant par les prises de terre. Le courant de double défaut  $I_d$  revenant par le conducteur neutre est équivalent à un courant absorbé par un quelconque

consommateur.

Les conditions de protection exigées par la NFC 15-100 se traduisent par

$$(R_m + R_1) I_a \leq U_L$$

$$(R_m + R_2) I_a \leq U_L$$

$$(R_m + R_n + Z_1 + R_1) I_a \leq V$$

$$(R_m + R_n + Z_2 + R_2) I_a \leq V$$

Où la tension de défaut de la masse B est égale à :

$$U_{Bf} = (R_m + R_1) I_f + R_1 I_d$$

ce qui nous donne :

$$U_{Bf} \leq U_L + R_1 I_d$$

de même pour  $U_{Af} \leq U_L + R_2 I_d$

De ce fait, bien que les conditions soient respectées, les masses A et B peuvent être portées à une tension de défaut supérieure à la tension de sécurité.

Le sur dépassement de la tension de sécurité est évalué à  $R_1 I_d$  avec

$$I_d = \frac{V (R_m + R_n)}{(R_m + R_n + R_2 + Z_2) \left( R_1 + Z_1 + \frac{(R_1 + Z_1)(R_2 + R_3)}{R_2 + Z_2 + R_n + R_m} \right)}$$

Si  $R_m + R_n \gg R_1 + Z_1$

$$I_d = \frac{V}{R_1 + Z_1 + R_2 + Z_2}$$

Dans ce cas, les mêmes conditions que celles de la neutralisation se présentent, on choisit alors des dispositifs de protection contre les surintensités.

Valeurs maximales de  $R_1$  et  $R_2$

Pour éviter des surtensions de sécurité on pourrait envisager de réaliser des liaisons telles que la résistance





entre toute masse et la prise de terre commune soit inférieure à une valeur donnée

à partir de la condition 
$$R \leq \frac{U_0 - R_0 I_a}{I_a}$$

ou, 
$$U_{N,B} \leq U_0 + R I_a \leq U_0$$

donc 
$$R \leq \frac{U_0}{2 I_a}$$

2°) Si dans une installation électrique le neutre du transformateur HT/BT et toutes les masses sont reliées à un même réseau d'eau, un défaut d'isolement affectant l'une des masses se transforme en un court-circuit phase-neutre (fig. 8). Dans ce cas on doit choisir un même dispositif de protection qu'en cas de la neutralisation à savoir les dispositifs contre les surintensités.



## B Schema I.T

### 1-Principes:

Le courant de premier défaut qui apparait en cas de mise sous tension accidentelle d'une masse, est limité par les impedances de fuite, à une valeur telle que le potentiel qui prend naissance sur la masse ne présente aucun danger. Si un second défaut d'isolement se manifeste sur une autre masse, alors que le premier défaut n'est pas éliminé, le courant de défaut qui en résulte prend une valeur assimilable à un court-circuit et provoque le fonctionnement du dispositif de protection (fig 9)

Le schéma avec neutre isolé ne présente pas d'avantages par rapport au schéma à neutre impedant; Au contraire, la recherche des défauts nécessite une liaison impedante entre le neutre et la terre pour permettre une localisation rapide des défauts et un control d'isolement de l'installation.

### 2-Exécution:

2 modes du schéma I.T peuvent être réalisés:

- Masses non interconnectées
- Masses interconnectées.

a- Masses non interconnectées: (fig 10a)

Si après l'apparition d'un premier défaut d'isolement, apparait un deuxième défaut, l'ensemble donnerait lieu à la circulation de 3 courants:

- $I_1, I_2$  se referment par l'impedance  $Z$ , ces courants sont en fait des courants dus au premier défaut.
- $I_3$  se referme par les resistances des prises de terre

fig: 9

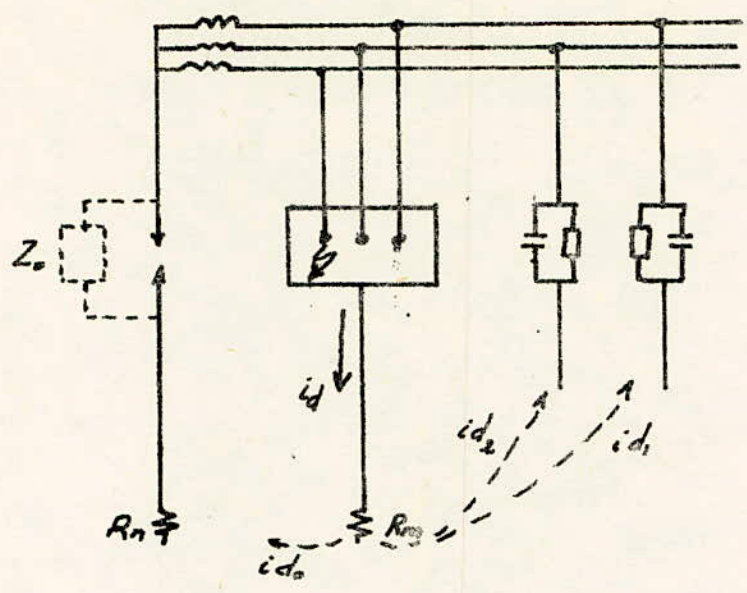


fig: 10a

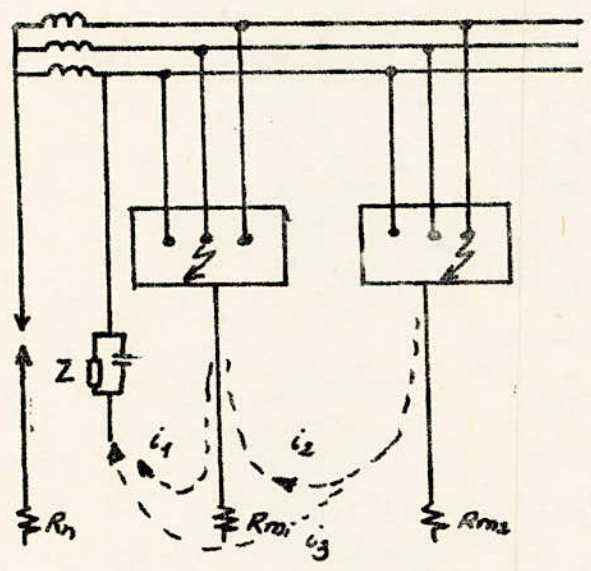
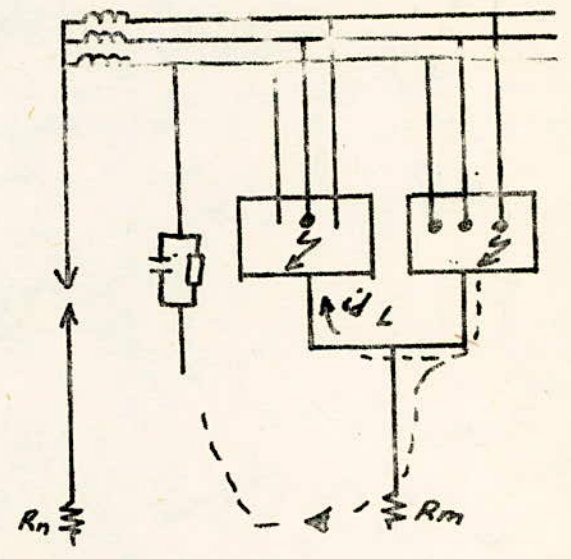


fig: 10b





des deux masses; alors l'une des deux masses peut être portée à un potentiel supérieur à la tension de sécurité. La protection est assurée en protégeant chacun des circuits alimentant les 2 masses par un dispositif tel que:

$$R_m \frac{I_1}{a} \text{ où } R_m \frac{I_2}{a} \leq U_c(t).$$

$I_{a1}, I_{a2}$  courants de fonctionnement des dispositifs de protection.

Ces conditions sont celles du schéma T.T, La protection est donc assurée par un dispositif différentiel.

b. Masses Interconnectées: (fig 10b)

Ce mode d'exécution diffère du précédent par la présence de la liaison L; de ce fait le courant  $I_d$  devient un véritable courant de court-circuit, car il n'est plus limité par les résistances des prises de terre des masses. La protection est assurée, comme dans le schéma TN, par des dispositifs à maximum de courant alimentant les deux masses.

3-Dispositif de surveillance du contrôleur d'isolement:

Le contrôleur permanent d'isolement est indispensable dans les installations IT, ainsi que la recherche et l'élimination des défauts d'isolement, sinon une telle installation dans laquelle se produit un défaut d'isolement se trouve dans les mêmes conditions qu'un schéma T.T ou TN; La coupure doit être suivie dès l'apparition d'un deuxième défaut.

Le contrôleur permanent d'isolement possède un réglage de fonctionnement qui dépend de la résistance des prises de terre des masses.

Le défaut d'isolement peut être dû à:

- un affaiblissement du niveau d'isolement de l'installation.

- un défaut direct entre la phase et la terre.

Lors d'un affaiblissement du niveau d'isolement, le courant  $i_d$  (fig 14) du premier défaut est égal à la somme géométrique de  $i_{d1}$ ,  $i_{d3}$ ,  $i_{d0}$ .

$$\vec{i}_d = \frac{\vec{U}_{12}}{Z_2 + R_m} + \frac{\vec{U}_{13}}{Z_3 + R_m} + \frac{\vec{U}_{10}}{\sqrt{3}(Z_0 + R_m + R_m)}$$

D'après la règle de protection contre les contacts indirects

$$i_d \leq U_L / R_m$$

En négligeant  $i_{d0}$  devant  $i_{d1}$  et  $i_{d3}$ , et en supposant que

$$Z_3 = Z_2 = Z_n$$

$$i_d \leq \frac{U \sqrt{3}}{R_m + Z_n} \leq \frac{U_L}{R_m}$$

ce qui nous conduit à la condition

$$Z_n \geq R_m \frac{U \sqrt{3} - U_L}{U_L}$$

Si la réduction du niveau d'isolement est dû à un défaut direct entre une phase et la terre

$$Z_n \geq \frac{R_m}{2} \frac{U \sqrt{3} - U_L}{U_L}$$

Dans nos calculs on a supposé que  $I_{d0}$  est négligeable devant  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$ . Pour qu'il soit ainsi, il faut que  $Z_{d1}$  soit au minimum égal à  $10 I_{d0}$ ; donc :

$$I_{d1} \geq 10 I_{d0}$$

$$\sqrt{3}(R_m + R_n + Z_0) \geq 10(R_m + Z_n)$$

En remplaçant  $Z_n$  par sa valeur, trouvée lors d'un affaiblissement du niveau d'isolement (cas le plus sévère) :



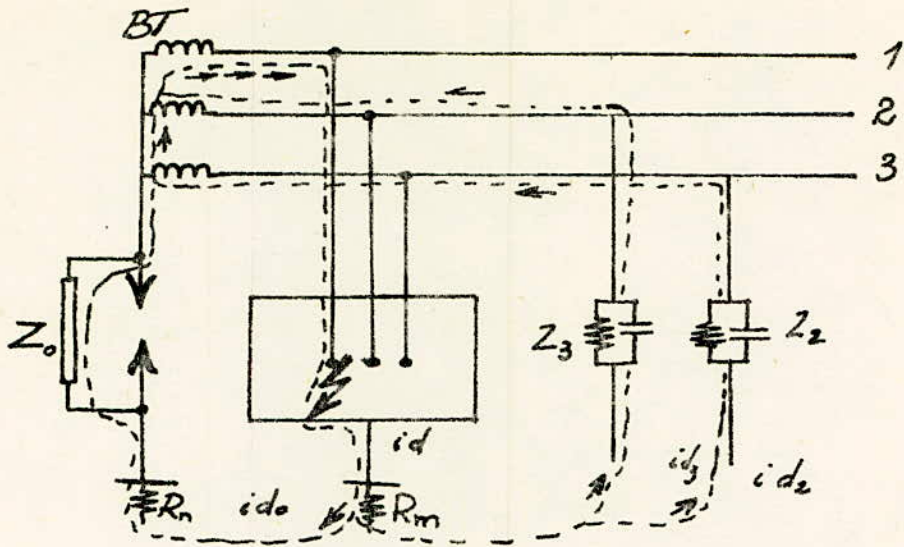


fig: 11

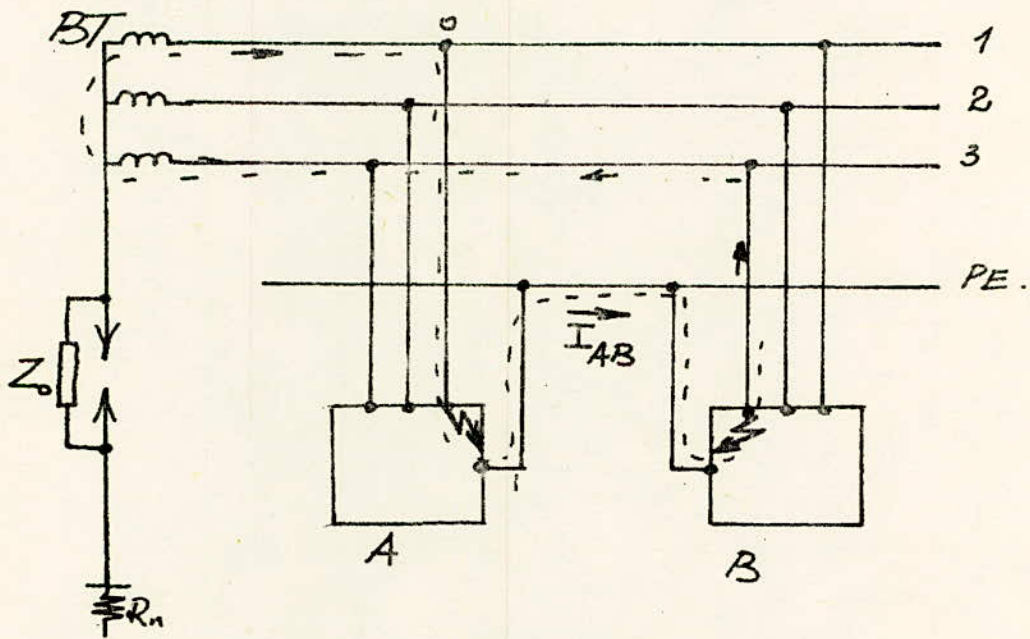


fig: 12

$$Z_0 \geq 10 R_m \frac{U}{U_L} - (R_n + R_m)$$

Exemple:

Dans une installation à tension nominale 220/380 et résistance de la prise de terre de la masse égale à  $100 \Omega$ , il faut un seuil minimal de l'impédance de fuite de  $600 \Omega$  et une impédance minimale de mise à la terre d'une neutre de  $7600 \Omega$ , pour que le courant du premier défaut soit non dangereux.

4- Analyse des conditions du schéma IT

a- calcul du courant du double défaut:

(fig 12).

1<sup>er</sup> cas: les conducteurs de protection ont la même section que les conducteurs actifs.

Lors d'un court-circuit diphasé en A

$$I_{ccA} = \frac{U}{2Z_A}$$

$$\text{avec } Z_A^2 = (R_T + R_L + R_i)^2 + (X_T + X_L + X_i)^2$$

$$\text{de même: } I_{cc0} = \frac{U}{2Z_0}$$

$$I_{cc} = \frac{U}{2Z_0}$$

$$\text{avec: } Z_0^2 = (R_T + R_0)^2 + (X_T + X_0)^2$$

Le courant de double défaut  $I_{AB}$

$$I_{AB} = \frac{U}{2Z_A + 2Z_B - 2Z_0}$$



$$\text{donc: } \frac{1}{I_{AB}} = \frac{1}{I_A} + \frac{1}{I_B} - \frac{1}{I_0}$$

En prenant  $c = I_A/I_B$  et  $a = (Z_B - Z_0)/Z_B$

$$I_{AB} = \frac{I_A}{1 + ca}$$

2<sup>ème</sup> cas: Les conducteurs de protection ont une section inférieure à celles des conducteurs de phase;  $m = S_{ph}/S_p$

$$I_{AB} = \frac{U}{(1+m)(Z_A + Z_B) - 2mZ_0}$$

Si on pose  $a' = 1 - \frac{2mZ_0}{Z_B(1+m)}$

$I_{AB}$  devient

$$I_{AB} = I_A \times \frac{2}{1+m} \times \frac{1}{1+a'c}$$

Si  $I_B > I_A$ ; le rapport  $c < 1$  et  $1/(1+c) > 1/2$   
Par conséquent le courant de double défaut est toujours au moins égal à la moitié de l'un des deux courants  $I_A$  ou  $I_B$

### b-Détermination de la tension de contact:

Une personne se trouvant en contact avec 2 masses interconnectées est soumise à une tension

$$U_c = I \cdot \frac{L_P}{S_p} \cdot I_3$$

$$\text{or } U_c = I \left( \frac{L_{11}L_2}{S_{ph}} + \frac{L_P}{S_p} \right) I_3$$

On suppose que: - La résistivité des conducteurs actifs et des conducteurs de protection est la même

- que  $m$  est égal au rapport  $S_{ph}/s_p$

$l_1$ : conducteur actif qui connecte la source à la masse (1)

$l_2$ : " " " " " " (2)

$$\text{donc } \tau_{lc} = \frac{m \tau_l}{m + \frac{l_1 l_2}{l_p}}$$

Cette formule peut être écrite, selon la NFC 15-100:

$$\tau_{lc} = c \cdot \frac{m \tau_l}{1 + m}$$

$$\text{avec } c = \frac{1 + m}{\frac{l_2 + l_1}{l_p} + m}$$

En pratique le coefficient  $c$  est pris égal à 0,8  
Donc on remarque, que le temps de fonctionnement  
du dispositif est lié directement à la valeur de la  
tension du réseau et à celle de  $m$ .

### 5-Choix du dispositif de protection:

Les conditions de protection en cas de double défaut  
dependent de la situation des masses. Lorsque les masses  
ne sont pas interconnectées; la protection est assurée,  
comme dans le schéma TT, par des dispositifs diffé-  
rentiels. Quand les masses sont interconnectées, la  
protection est assurée par des dispositifs de protection contre  
les surintensités (cas du schéma TN)

Le dispositif de protection doit agir selon le tableau I  
(à partir de la valeur de  $\tau_{lc}$ , on se reporte à la courbe de  
sécurité puis on tire la valeur maximale du temps  
de coupure du dispositif associé)



Exemple:

Dans un réseau 220/380V à neutre distribué avec un rapport de section  $m = 2$

La tension de contact:  $U_k = 0,53 U = 201,4 V$

Cette tension de contact doit être coupée dans un temps con forme à La courbe de securité.

on reporte cette valeur sur La courbe de securite; on trouve un temps de coupure maximal du dispositif de protection égal à 0,065 s

Longeurs maximales de canalisation:

En supposant que Les conducteurs de protection sont disposés dans la même canalisation des conducteurs actifs:

$$L_1 + L_2 = L_p = L$$

$$\text{done: } L = \frac{0,8 U}{f(1+m) I_A} S$$

On a fait remarquer que le courant de double defaut est au minimum egal à la moitié du courant du premier defaut, pour cela La valeur du courant  $I_t$  est doublé con formément à ce qui a été demonté:  $2 I_t > I_A$

$$L_{max} = \frac{0,8 U}{2 f(1+m) I_t} S$$

a- Protection par coupe circuit:

En introduisant La caracteristique de fonction-nement des fusibles a savoir que  $I^2 t = \text{constante}$ .

La formule prece dente devient

$$L_m = L_1 \frac{2}{1+m} \sqrt[4]{\frac{t_m}{t_1}}$$

Exemple:

Dans un reseau 220/380V et pour  $m = 3$

si le neutre non distribué

$$t'_3 = 0,045s \quad t'_1 = 0,1s$$

$$\text{donc } L_3 = 0,74L_1$$

si le neutre est distribué

$$t''_3 = 0,14s \quad t''_1 = 0,73s$$

$$\text{donc } L_3 = 0,52L_1$$

D'autre part on peut comparer les longueurs maximales de canalisation suivant que le schema est du type TN ou I.T. Pour une même section du conducteur actif et un même rapport  $m$

$$\text{TN:} \quad L_{\max} = \frac{0,8V}{f(1+m)} S$$

$$\text{I.T:} \quad \begin{cases} L'_{\max} = \frac{0,8U}{2f(1+m)} S \\ L''_{\max} = \frac{0,8V}{2f(1+m)} S \end{cases}$$

Donc

$$L'_{\max} = 0,86 \sqrt[4]{\frac{t'}{t}} L_{\max}$$

$$L''_{\max} = 0,5 \sqrt[4]{\frac{t''}{t}} L_{\max}$$

b- Disjoncteurs à maximum de courant:

Les mêmes longueurs de canalisation sont obtenus que pour le schema TN, mais avec un coefficient de reduction  $K$  (0,86 ou 0,5)



## - Connexions équipotentielles.

Réaliser des connexions équipotentielles ne suffisent pas pour assurer une protection absolue, mais un dispositif de coupure automatique doit être prévu.

Ces connexions équipotentielles sont conçues de telle manière à éviter l'apparition d'une tension de contact dangereuse pendant le temps d'élimination du défaut.

On distingue deux séries de connexions équipotentielles.

### a) Connexions équipotentielles principales.

Il s'agit de relier à l'entrée de chaque bâtiment tous les éléments conducteurs de celle-ci avec la prise de terre. Le but est d'éviter la propagation du potentiel venant de l'extérieur en cas de défaut.

### b) Connexions équipotentielles supplémentaires.

Si les conditions de réalisations d'un schéma donné ne peuvent pas être respectés, on peut réaliser une liaison équipotentielle supplémentaire entre les masses et les éléments conducteurs simultanément accessibles.

Ces liaisons équipotentielles sont nécessaires dans les schémas IT et TN dans lesquels les dispositifs de protection contre les surintensités possèdent des caractéristiques de fonctionnement moins sensibles et lents que les dispositifs différentiels.

Pour cela il faut procéder à un calcul de vérification des conditions de sécurité. Il est conseillé alors d'installer systématiquement des connexions équipotentielles supplémentaires dans ces types d'installations.



Le but est d'assurer sans modifier les conditions de protection des dispositifs.

De ce fait la tension de contact ne doit en aucun cas dépasser la tension limite de sécurité.

La résistance entre toute masse et la liaison équipotentielle la plus proche doit vérifier la condition:

$$R = \frac{U_c}{I_a}$$

$$\text{or } I_a = k I_n \quad \rightarrow \quad R = \frac{U_c}{k I_n}$$

Suivant le type du dispositif de protection on peut déterminer la résistance  $R$  en fonction de  $I_n$ .

$$\text{Pour le schéma TN : } R = \frac{U_c}{k I_n}$$

$$\text{Pour le schéma IT : } R = \frac{U_c}{2k I_n}$$

La résistance ainsi calculée est valable pour la température de fonctionnement; pour la mesure de la résistance à la température ambiante, un facteur  $k$  doit être introduit.

$$k = 0,66 \text{ pour le Cuivre.}$$

Il est possible donc de déterminer la longueur maximale de canalisation entre la masse et le point le plus proche de la prise de terre:

$$L_{\text{max}} = \frac{U_c}{k \gamma} \cdot \frac{S}{I_n} \quad \text{pour le schéma TN.}$$



## chap. III.B - Moyens de protection supplémentaires du 2<sup>nd</sup> degré

Le but de ces mesures de protection est de diminuer au maximum le risque de l'apparition d'un courant de défaut pouvant compromettre la protection.

Parmi ces moyens de protection, on peut citer:

- isolation du poste de travail
- séparation des récepteurs
- Abaissement de la tension de service
- Isolation supplémentaire.

### 1-Isolation du poste de travail:

On l'applique là où il est difficile d'assurer une protection efficace à l'aide d'autres méthodes et ce ci en assurant des conditions de travail tel que le courant de défaut ne puisse dépasser la valeur de  $4\text{mA}$  en courant alternatif.

Exemple:

pour un réseau 220/380V; il faut que l'isolation doit avoir une résistance supérieure à  $50\text{k}\Omega$ .

Cette isolation est obtenue, par exemple, par des revêtement en plastique du sol ou par des parquets en bois

Dans ce type de protection, un contrôle rigoureux de la résistance d'isolement doit être exigé pour une bonne sécurité des personnes de manière à limiter le courant de défaut à une valeur dangereuse.

### Resistances de quelques revêtements spéciaux du sol (extrait de La NFC-15-100)

Carrelage sur vide sanitaire	40 à 70 $k\Omega$
Revetements plastiques	40 à 100 $k\Omega$
Parquets en bois	400 à 1300 $k\Omega$
Tapis et moquettes	1 à 6 $\cdot 10^3 k\Omega$

## 2- Séparation des circuits:

On a vu que dans réseau à neutre isolé, le danger d'électrocution est d'autant plus réduit que le circuit présente une faible étendue et un bon niveau d'isolement.

En effet, en cas de défaut d'isolement, la masse correspondante se trouve portée à un certain potentiel non fixé; et un contact avec cette masse ne présente pas de danger puisque le circuit de défaut n'est pas fermé.

En alimentant un circuit peu étendu et très bien isolé par un générateur particulier ou un transformateur à enroulement séparé, le risque, lors d'un contact indirect sera nul; donc le circuit séparé est équivalent à une isolation double.

Le rôle de cette mesure trouve sa complète justification si l'alimentation du circuit séparé est limitée à un seul appareil d'utilisation, car elle ne nécessite aucune précaution particulière; par contre si un circuit séparé alimente plusieurs appareils, on reconstitue une petite installation du type IT et des mesures complémentaires sont nécessaires: masse d'un même circuit devront être reliées entre elles par un conducteur de protection dont la coupure au



deuxième défaut est nécessaire

Ce moyen de protection n'est pas destiné aux appareils présentant un faible niveau d'isolement tel que :  
Les fours et les appareils de chauffage de forte puissance.

### 3-A Baissement de la tension de service:

Le principe fondamental de cette règle de protection consiste à limiter la tension des circuits desservis. Cette tension ne doit en aucun cas (même en cas de défaut) dépasser la tension limite de sécurité  $U_L$ .

Les caractéristiques essentielles de la très basse tension de sécurité (TBTS) sont les suivantes:

la source d'alimentation ne doit pas dépasser la tension limite de sécurité  $U_L$ .

le circuit de la très basse tension ne doit pas avoir de points commun avec un autre circuit ou avec la terre susceptibles d'apporter un potentiel différent et de compromettre la sécurité

la séparation des circuits à très basse tension de sécurité de tout autre circuit; on évite alors tout défaut entre les deux circuits. En pratique, on a réalisé une double isolation.

La TBTS est obtenue par l'emploi des transformateurs appelés transformateur de sécurité.

Si l'une des trois conditions précédentes n'est pas remplie, la très basse tension ne peut être considérée comme de sécurité mais devient une très basse tension fonctionnelle et des mesures de protection complémentaires devront être prises: protection par enveloppe, obstacles, isolation...

#### 4-Isolation supplémentaire:

A la longue la matière isolante soumise à l'action de l'humidité, des variations brusques de température, des chocs ... perd ses qualités d'isolation.

De ce fait, l'affaiblissement de l'isolation, sinon l'annulation provoque un courant de fuite dont la valeur peut augmenter jusqu'au courant de court circuit (Defaut franc) qui est seul limité par l'impédance des conducteurs d'alimentation et des contacts. Le courant de défaut franc n'est pas aussi grave que l'on pense, car il provoque des effets extérieurs; d'où le fonctionnement du dispositif de protection. Par contre le courant de défaut non franc peut avoir une valeur insuffisante pour faire fonctionner les dispositifs de protection et les conséquences peuvent être fâcheuses.

Pour cela, les constructeurs ont adapté un moyen complémentaire, qui sert de secours, par l'introduction d'une isolation supplémentaire qui remplace temporairement l'isolation principale.

Toute isolation est soumise à un essai diélectrique qui permet de vérifier les qualités de l'isolation.

A titre d'exemple: la tension d'essai pour les matériels, dont la tension nominale n'excède pas 440V, est de 4000V.



## Appendice: Installations de prise de terre.

La mise à la terre d'une masse métallique ou d'un ensemble de masse métallique consiste à établir une liaison électrique entre cette masse ou cet ensemble de masse et la masse terrestre.

Cette liaison comporte généralement des conducteurs de protection, un ou plusieurs conducteurs de terre et la prise de terre proprement dite.

La mise à la terre est utilisée pour se prémunir des dangers des courants industriels et domestiques, de la foudre et de l'électricité statique.

Dans ce qui va suivre on s'intéresse plutôt à l'utilité des prises de terre pour la protection contre les dangers électriques.

La qualité d'une prise de terre est de laisser écouler des courants de défaut, de ce fait la résistance de prise de terre joue un rôle très important; elle est d'autant plus meilleure que sa résistance électrique est faible.

La résistance d'une prise de terre est fonction:

a/ sa résistivité qui est liée directement à la structure du terrain (sablonneux, porosité ...), au taux d'humidité et aux circonstances climatiques.

La résistivité d'une surface de  $1\text{m}^2$  pour différents terrains est donné par:

Terrain gras (remblais compact humide)	50 $\Omega/\text{m}$
Terrain maigres (graviers, remblais grossiers)	500 $\Omega/\text{m}$
Terrain pierreux (pierres nues, sables secs, roche)	3000 $\Omega/\text{m}$ .

b/ caractéristiques des prises de terre : lieu d'implantation, profondeur, forme ...

c/ caractéristiques des conducteurs de terre et de protection : section, nature du conducteur.

on peut distinguer deux types de prises de terre :

### A - Prises de terre naturelles.

Dans ce cas on utilise certaines structures métalliques telles que les conduites de distribution d'eau publique ou de piliers métalliques enterrés. Dans le cas de l'utilisation des conduites d'eau, il faut shunter les compteurs par des conducteurs de section appropriés ; la résistance obtenue est généralement inférieure à  $2\Omega$ .

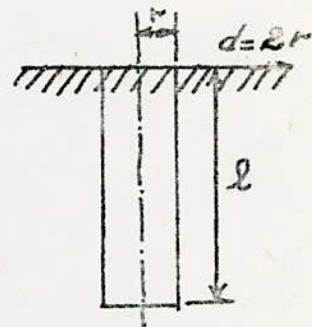
### B - Prises de terre artificielles.

Elles sont réalisées à l'aide de conducteurs enfouis ; plusieurs façons peuvent être envisager :

#### 1 - Tuyau enfoncé dans le sol.

La résistance pour un tuyau est donné par :

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$



#### 2 - Tuyau placé horizontalement.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{2rh}$$





## Conclusion.

Nous espérons que cette étude, qui se veut objective, contribuera à une meilleure compréhension du problème de la protection contre l'électrocution dans les installations à basse tension.

Bien qu'on puisse dire que les moyens de protections contribuent notablement à l'amélioration de la sécurité des personnes et bien que ces mesures soient mêmes les seules, qui dans certains cas, peuvent assurer la protection, il serait faux de les considérer comme une panacée pour l'électrocution; il faut les utiliser en harmonie avec les mesures qui sont données dans la réglementation générale de la protection.

L'application de chacun des trois schémas (TT, TN, IT) de protection assure le même niveau de sécurité pourvu que toutes les conditions imposées soient intégralement respectées.

De ce fait, le choix du schéma de protection appropriée doit résulter d'une étude approfondie des conditions d'alimentation et d'exploitation de l'installation, étude portant sur les différents aspects d'économie, de continuité d'exploitation, de qualité de maintenance et de l'entretien...

L'exploitant doit faire une étude comparative et estimer les avantages et inconvénients de chacun.

## Bibliographie.

1. A. Mauduit - : "Installations électriques à haute et basse tension" T.1.  
Dunod - Paris 1959.
2. Cl. Rémond - : " Les installations électriques dans le bâtiment"  
Eyrolles - Paris 1977.
3. Réunion de professeurs - : " Sécurité dans l'emploi des courants électriques."  
Eyrolles - Paris 1978.
4. NF C 15-100  
Editions 1976.
5. Cl. Rémond - : " L'équipement électrique des bâtiments."  
Eyrolles - Paris 1977.
6. E. Maurien - : " L'électricien d'usine".  
Eyrolles - Paris 1982.



