

8/85

2ex

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electrotechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Contribution à l'Etude
des Mises à la Terre
en Haute et Basse Tension

Proposé et dirigé par :

D^R J. GOTTFRIED

Etudié par :

BOUZIANE Allel
MATALLAH Mohamed

المكتبة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

Promotion Janvier 1985

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electrotechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Contribution à l'Etude
des Mises à la Terre
en Haute et Basse Tension

Proposé et dirigé par :

D^r J. GOTTFRIED

Etudié par :

BOUZIANE Allel
MATALLAH Mohamed

Promotion Janvier 1985

- R E M E R C I E M E N T S -

NOUS EXPRIMONS NOS PLUS VIFS REMERCIEMENTS
ET NOTRE SINCERE RECONNAISSANCE A NOTRE PROMOTEUR
MONSIEUR GOTTFRIED POUR SON AIDE PRECIEUSE.

NOUS REMERCIONS EGALEMENT TOUS LES PROFESSEURS
QUI ONT CONTRIBUE A NOTRE FORMATION.

NOUS REMERCIONS DE MEME MESSIERS KADDOUR -
MATALLAH . B. ET OTMANI M. POUR LEUR AIDE MATERIELLE.

A. BOUZIANE ET M. MATALLAH

-oOo- D E D I C A C E S -oOo-
-+--+--+--+--+--+--+--

A MES PARENTS

A MES FRERES ET SOEURS

A TOUTE MA FAMILLE

A TOUS MES AMIS

Je dédie ce travail

MOHAMED

A MES PARENTS

A MES FRERES ET SOEURS

A TOUTE MA FAMILLE

A TOUS MES AMIS

Je dédie ce modeste travail

ALLEL

Etudiants: MATALLAH Mohamed ; BOUZIANE Allel
Promoteur: Dr.Pr. GOTTFRIED Jan

Titre: Contribution à l'étude des mises à la terre en haute et basse tension.

Résumé: Cette étude a pour objet de présenter l'essentiel pour établir un projet de mise à la terre, à savoir le choix de la méthode, du matériel et des calculs nécessaires. En plus, elle permet d'effectuer la vérification et l'entretien des installations de prises de terre.

Title: Contribution to the study of low and high voltage earthing.

Summary: The objective of this scheme is to present the essential for establishing a project of earthing and to know the choice of the method, the materials and the necessary calculations. And more this allow to carryout the check and upkeep of the installations of earth connections.

العنوان: اسهام في دراسة توصيلات الارضية في الجهد العالي والمنخفض

الغرض من هذه الدراسة هو تقديم القواعد الأساسية لقامة مشروع التوصيل للأرض وذلك باختيار الطريقة والمواد والحسابات اللازمة •
زيادة على ذلك، تسمح لنا بحراسة ومراجعة محطات التوصيلات الأرضية •

TABLE DES MATIERES

	Page
Intrduction.....	1
Chap.I:Mises à la terre dans les installations B.T....	2
I:Neutre relié directement à la terre.....	3
1:Masses de l'installation mises à la terre....	3
2:Masses de l'installation mises au neutre....	12
II:Neutre relié à la terre par une impédance ou isolé.....	19
Chap.II:Mise à la terre des points neutres des réseaux haute tension.....	26
I:Réseau à neutre isolé.....	26
II:Réseau à neutre mis à la terre par circuit résonnant.....	30
1:Mise à la terre du neutre par bobine de Petersen.....	32
2:Réseau à neutre mis à la terre par un trans- formateur.....	33
III:Réseau à neutre relié directement à la terre	36
IV:Réseau à neutre mis à la terre par résistance	38
Chap.III:Mise à la terre dans les postes de transfor- mation.....	39
Chap.IV:Mise à la terre contre les effets de la foudre	44
I:Généralités.....	44
II:Mise à la terre des supports des lignes aériennes.....	44
III:Mise à la terre des parafoudres.....	45

Chap.V:Les prises de terre.....	48
1:Résistance d'une prise de terre.....	48
2:Écoulement du courant et ses effets à travers une prise de terre.....	49
3:Calcul des résistances de prises de terre.....	49
4:Couplage entre prises de terre voisines.....	52
5:Mise en parallèle des prises de terre.....	57
6:Conducteurs de protection.....	58
Chap.VI:Mesure des résistances des prises de terre.....	63
1:Principe de mesure.....	63
2:Méthodes de mesure.....	63
a)Méthode des trois terres.....	64
b)Méthode potentiométrique.....	64
c)Méthode de mesure en ligne dite des "62 %"..	64
3:Mesure du facteur de couplage entre 2 prises de terre.....	66
Conclusion.....	69

INTRODUCTION

La mise à la terre constitue un des plus importants éléments de protection des personnes et des matériels en électrotechnique . En général on distingue deux objectifs essentiels des mises à la terre :

-Statique: En vue de fixer à un potentiel invariable des appareils ou des masses conductrices . C'est le cas de divers appareils de laboratoire , de machines ou parties d'installations ou de canalisations susceptibles d'accumuler des charges statiques .

-Dynamique: En vue d'écouler à la terre des courants de nature et d'intensités diverses pouvant atteindre , par exemple dans le cas des courants de foudre , des grandeurs extrêmes .

Dans cette catégorie , on cite les mises à la terre des installations et des réseaux de production , de transport et de distribution d'énergie intéressant soit le réseau lui même en vue de permettre le fonctionnement des dispositifs de protection du matériel (terres du neutre , des parafoudres , et éclateurs) soit les masses métalliques en vue d'éviter qu'elles puissent être portées à des potentiels dangereux pour assurer la sécurité des personnes .

C'est le deuxième objectif que nous allons analyser dans notre étude .

CHAPITRE I

MISE A LA TERRE DANS LES INSTALLATIONS B.T

L'objectif de la mise à la terre dans les installations basse tension est la protection des personnes contre les contacts indirects .

On va analyser les différentes méthodes de protection contre les contacts indirects .

On a utilisé la nomenclature suivante :

U_l : Tension de sécurité

$I_{\Delta n}$: Seuil du dispositif différentiel

R_m : Résistance de prise de terre des masses de l'installation

I_s : Courant assurant le fonctionnement du dispositif de

protection dans le temps spécifié

E : Tension entre phase et neutre

R_{ph} : Résistance du conducteur de phase

R_{pe} : Résistance du conducteur de protection

S_{ph} : Section du conducteur de phase

U : Tension entre phases (composée)

I-NEUTRE RELIE DIRECTEMENT A LA TERRE:

1-Masses de l'installation mises à la terre (Schéma TT):

a)Principe: Le schéma TT est conçu de telle manière que la boucle de défaut soit partiellement constituée par la terre et que l'impédance de cette boucle limite la valeur du courant de défaut. Dans ce schéma, le neutre est relié directement à la terre et les masses de l'installation sont reliées à des prises de terre électriquement distinctes de celle du neutre (Voir fig1)

b)Règles de protection: DANS ce schéma, la protection contre les contacts indirects est assurée par des dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel qui mesurent directement l'intensité du courant qui s'écoule vers la terre. Dans de tels schémas, la protection n'est assurée que si:

1-La résistance des prises de terre des masses est bien choisie.

2-Toutes les masses à protéger par un même dispositif sont reliées à une même prise de terre.

1-La prise de terre des masses doit avoir une résistance qui n'excède pas le quotient du potentiel de sécurité par le courant minimal assurant le fonctionnement du dispositif de coupure automatique. Cette condition se traduit par la relation:

$$R_m \leq U_l / I_{\Delta n}$$

2-Toutes les masses associées à un même dispositif de coupure automatique doivent être reliées à une même prise de terre. S'il n'en était pas ainsi, le courant de défaut affectant une masse M1 pourrait être supérieur à celui traversant le dispositif de coupure: En effet, s'il existe dans une autre masse M2 un défaut affectant le conducteur neutre, le courant de défaut pour-

rait porter M1 à un potentiel dangereux en se refermant en partie par le deuxième défaut sans traverser le dispositif de coupure automatique. C'est pourquoi donc, il est nécessaire d'interconnecter toutes les masses protégées par un même dispositif de coupure automatique. Par contre on peut relier à une même prise de terre différentes masses à condition d'assurer la coordination pour tous les dispositifs, c'est à dire déterminer la résistance de la prise de terre selon le dispositif possédant le plus grand seuil.

c) Analyse des conditions de protection: Dans ce type de schéma, le but du dispositif est de réagir à chaque fois que la tension de contact entre la masse siège d'un défaut d'isolement et tout conducteur qui lui est directement accessible est proche de la tension de sécurité c'est à dire dès que la condition

$$R_m \cdot I_s \leq U_l \text{ n'est pas respectée.}$$

Une deuxième condition pourrait s'ajouter à la première:

Le temps de fonctionnement du dispositif ne doit pas dépasser 5s en cas d'un défaut franc phase-masse; cela se traduit par la relation:

$$Z \cdot I_s \leq E$$

avec Z: impédance de la boucle de défaut.

Cette condition a été introduite par prudence, considérant que la circulation de courants de défaut dans des conducteurs de protection dans les éléments conducteurs et dans des prises de terre pouvait provoquer des échauffements locaux et entraîner des risques d'incendie.

Signalons que si le conducteur neutre est affecté d'un défaut, il ne peut être décelé à priori.

L'apparition de deux défauts simultanés l'un affectant le conducteur neutre d'une masse B, l'autre affectant la phase d'une masse A (Voir fig.2) provoquerait la naissance de deux courants:

-If: Courant se refermant par les prises de terre.

-I₁: Courant se refermant par la masse B.

Etant donné que le courant I₁ revient par le conducteur neutre, le dispositif différentiel D étant sensible seulement au courant s'écoulant à la terre, ne détectera que If.

Les conditions imposées par la norme se traduisent par:

$$(R_m + R_a) \cdot I_s \leq U_l \quad (1)$$

$$(R_m + R_b) \cdot I_s \leq U_l \quad (2)$$

et

$$(R_m + R_a + Z_a + R_n) \cdot I_s \leq E \quad (3)$$

$$(R_m + R_b + Z_b + R_n) \cdot I_s \leq E \quad (4)$$

La tension de défaut de la masse A est:

$$U_a = R_a \cdot (I_1 + I_f) + R_m \cdot I_f$$

Celle de la masse B est:

$$U_b = R_m \cdot I_f + R_b \cdot I_1$$

Des relations (1) et (2), on en déduit (Compte tenu que I_s=I_f):

$$(R_m + R_a) \cdot I_f \leq U_l \implies U_a \leq U_l + R_a \cdot I_1$$

$$(R_m + R_b) \cdot I_f \leq U_l \implies U_b \leq U_l + R_b \cdot I_1$$

On voit que la valeur maximale de U_a dépasse U_l par la valeur (R_a . I₁), ainsi que celle de U_b la dépasse de (R_b . I₁). Ce dépassement dépend donc de la valeur de I₁. Ce courant est égal à:

$$I_1 = \frac{(R_m + R_n) \cdot E}{(R_m + R_n + R_b + Z_b) \cdot (R_a + Z_a + \frac{(R_m + R_n) \cdot (R_b + Z_b)}{R_m + R_n + R_b + Z_b})}$$

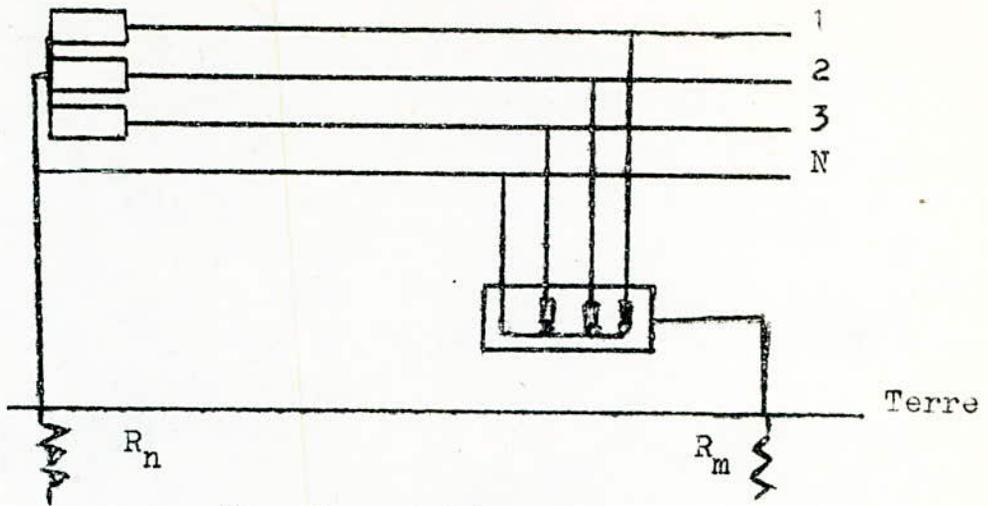


Fig. 1 Schéma TT

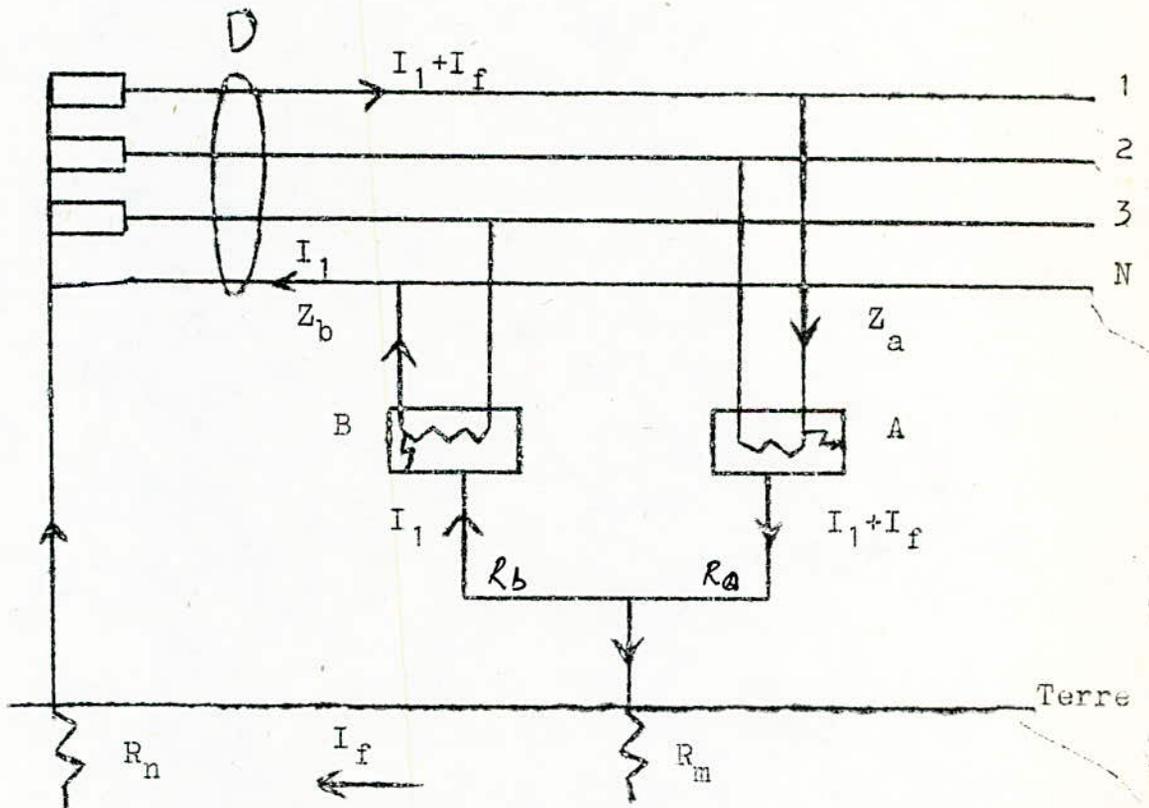


Fig. 2

Puisque $R_m + R_n \gg R_b + Z_b$ alors la valeur de I_1 se simplifie à

$$I_1 = \frac{E}{R_a + Z_a + R_b + Z_b}$$

De même, on trouve les valeurs maximales de R_a et R_b et ceci afin d'éviter les tensions supérieures à U_l :

$$R_a \leq \frac{U_l - R_m \cdot I_s}{I_s} \quad \text{et} \quad R_b \leq \frac{U_l - R_m \cdot I_s}{I_s}$$

d) Choix des dispositifs de protection: Vu que la nature du dispositif de protection installé dépend de la résistance de prise de terre des masses, le choix de ce dispositif doit être fait en fonction de cette résistance.

Le tableau "I" résume, suivant la nature des dispositifs de protection, le calibre maximal du dispositif en fonction de la valeur de la résistance de la prise de terre.

Le tableau commence par une valeur de résistance de prise de terre de 0,50hms qui correspond déjà à une bonne prise, toute valeur inférieure serait purement illusoire et n'aurait aucun sens car il faut tenir compte des changements possibles de ces résistances en fonction de l'humidité, du vieillissement et tout changement de l'état du sol. On remarque que si la résistance de prise de terre est faible, le courant de défaut sera relativement intense et la protection sera assurée par un coupe-circuit à fusibles ou un disjoncteur à maximum de courant. Or, une telle prise de terre est difficile à réaliser (nature du sol, sécheresse, variation de l'humidité).

D'autre part, on constate que si la résistance de prise de terre est grande, le courant de défaut sera faible et ne peut être détecté que par des appareils de protection sensibles. Donc, l'installation d'un dispositif différentiel est nécessaire.

TABLEAU "I"

Calibre maximal du dispositif de coupure automatique

Résistance de la prise de terre des masses en Ohms	Inominal du coupe-circuit à fusibles en Ampères	Courant de réglage des disjoncteurs à maximum(A)	Seuil du dispositif 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 CONVIENT PAS		10 A
10	"	"	5 A
17	"	"	3 A
50	"	"	1 A
100	"	"	0,5 A
167	"	"	0,3 A
500	"	"	0,1 A
1670	"	"	30 mA
4150	"	"	12 mA
8300	"	"	6 mA

Disjoncteurs différentiels: (Voir fig.3)

Principe de fonctionnement: Les conducteurs d'alimentation traversent un noyau de transformateur. Si dans l'installation en aval, aucun défaut de terre n'existe, la somme des courants est nulle et aucune tension n'est induite dans l'enroulement secondaire. Si au contraire un courant de défaut est dévié à la terre le déséquilibre du courant dans les fils provoque une tension au secondaire qui, à partir d'une intensité donnée, fait déclencher un relais sensible qui commande l'ouverture du circuit ainsi protégé.

Caractéristiques:

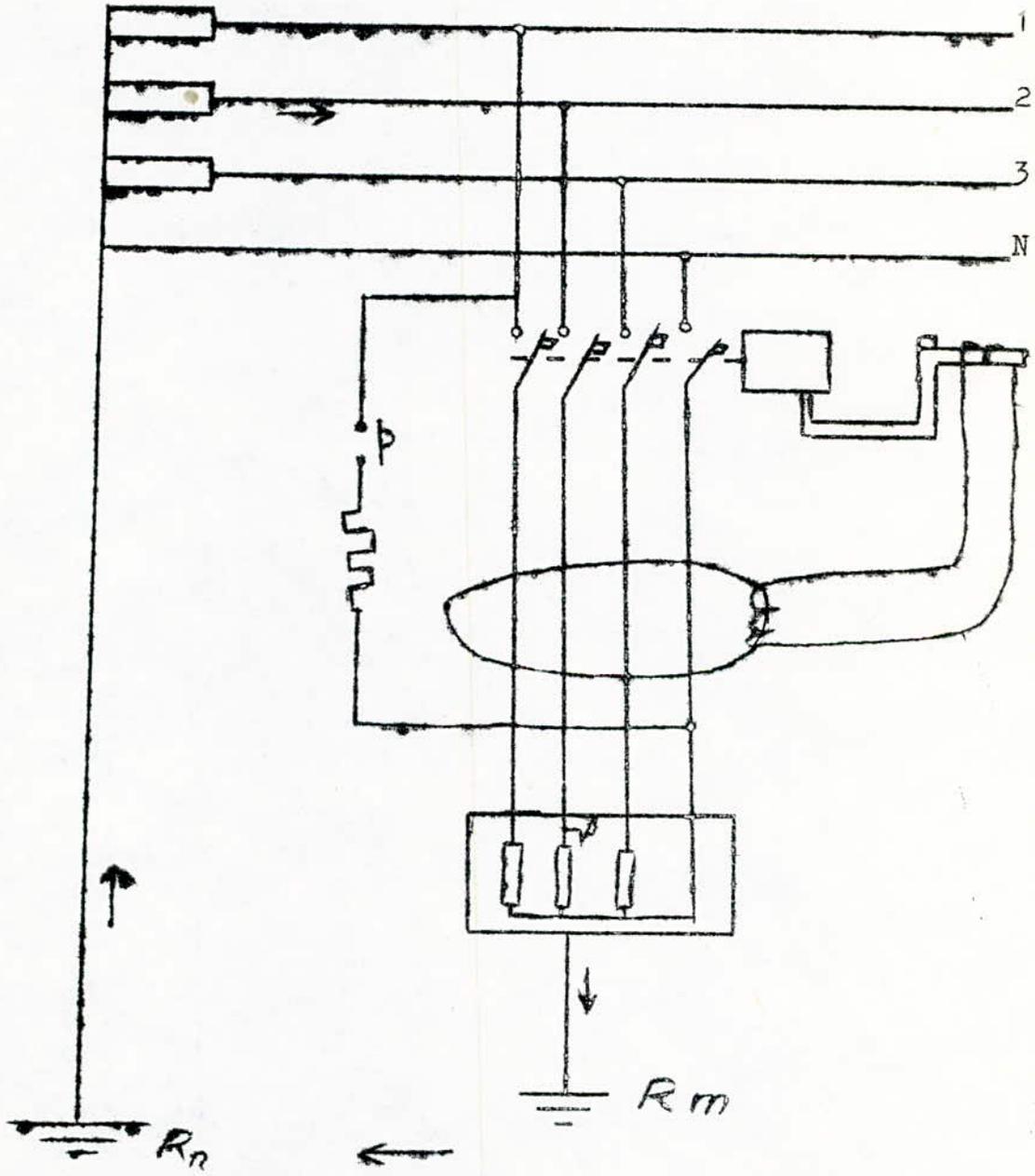
a) Sensibilité: C'est l'aptitude de l'appareil à détecter les plus faibles courants de défaut. La sensibilité est d'autant plus grande que la valeur du seuil de fonctionnement est faible. Elle doit être adaptée à la résistance de prise de terre pour que le potentiel des masses en défaut ne peut dépasser la tension de sécurité.

La haute sensibilité a l'avantage de protéger contre les contacts directs mais le couplage de protection de courant de défaut doit être établi de manière à ce que les déclenchements intempestifs n'apparaissent pas. Ces déclenchements sont dus au courant de fuite apparaissant normalement dans l'installation en raison de son étendue ou du nombre d'appareils qu'elle alimente. Pour cela, il faut un subdivisionnement de façon que les courants de fuite normaux soient inférieurs au seuil de fonctionnement du disjoncteur.

b) En cas de défaut, le disjoncteur doit procéder à une coupure omnipolaire.

FIG. 3

Schéma du dispositif de protection à
courant différentiel-résiduel



c) Le disjoncteur différentiel doit être à action rapide et doit agir dans un temps au plus égal à 0,2s .

d) De plus, le disjoncteur différentiel est équipé d'un dispositif magnéto-thermique qui provoque la coupure en cas de surintensité ou court-circuit.

e) 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. Il doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé au point où cet appareil est installé.

f) Sélectivité: Avec les augmentations de puissance, la sélectivité des protections électriques devient de plus en plus nécessaire. Chaque zone d'un réseau étant protégé par un appareil déterminé, on dira qu'il y'a sélectivité lorsque, cette zone étant le siège d'un défaut, c'est elle et elle exclusivement qui est éliminée par l'appareil le plus proche chargé de sa protection. Elle présente l'avantage de maintenir la partie saine de l'installation en service pendant le déclenchement de la partie en défaut. De plus, la recherche du défaut est grandement facilitée, du fait que seul l'appareil protégeant la zone en défaut déclenche. Pour assurer un déclenchement sélectif, on installe en tête de l'installation un disjoncteur temporisé tandis qu'à chaque départ, on installe un disjoncteur instantané et on réalise les deux conditions suivantes:

-Le courant de déclenchement du disjoncteur placé en tête de l'installation doit être au moins égal à 2 fois celui de chaque disjoncteur placé sur un départ.

-Le retard du dispositif amont doit être supérieur au temps

de fonctionnement du dispositif aval sans dépasser un temps compatible avec la sécurité.

2- Masses de l'installation mises au neutre (Schéma TN):

a) Principe: Le principe est basé sur le fait que: lorsqu'une masse est le siège d'un défaut, le courant résultant est un courant de court-circuit franc phase-neutre qui provoque le déclenchement des dispositifs de coupure.

Afin que les masses ne soient pas portées à un potentiel supérieur au potentiel de sécurité, il faut que:

-Le neutre soit lié à un système de prises de terre régulièrement réparties dans l'installation.

-Toutes les masses soient mises au même potentiel (Liaisons équipotentielles).

La mise des masses au neutre peut être effectuée de 2 façons

1-Les masses sont reliées à un seul conducteur qui représente simultanément le conducteur neutre et le conducteur de protection (conducteur PEN). Ce schéma est dénommé TN-A (voir fig.4).

2-Les masses sont reliées au conducteur de protection distinct du conducteur neutre. Ce schéma est dénommé schéma TN-B (voir fig 5)

Economiquement, on utilise la première solution, mais pour des raisons techniques (risques de rupture du conducteur de protection) cette méthode n'est pas admise dans les câbles souples, ni dans les canalisations fixes de section inférieure à 10 mm^2 . Ces 2 schémas peuvent d'ailleurs être utilisées dans une même installation. Le schéma A ne peut pas être en aval du schéma B car dans le cas contraire, le courant du neutre pourrait circuler dans le conducteur de protection.

b) Règles de protection: Ce genre de mise à la terre ne peut

être appliqué que si les quatre conditions ci-dessous sont satisfaites:

-Le point neutre de l'installation doit être relié à une prise de terre dont la valeur est appropriée.

-Le conducteur neutre doit avoir un système de prises de terre multiples et régulièrement réparties.

-Le conducteur neutre doit avoir une section bien déterminée.

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

1) La résistance de prise de terre du neutre doit être bien choisie puisque c'est elle qui permettra la construction de la boucle de défaut que parcourera le courant de défaut pour déclencher le dispositif de protection et ceci en cas de coupure du conducteur de protection.

2) Le conducteur neutre doit être relié à plusieurs prises de terre (voir fig.6) puisque si on utilise une seule prise de terre, et, en cas où le conducteur neutre est coupé, un défaut ne sera pas signalé et il n'y aura aucun déclenchement puisque le courant de défaut est nul et la tension apparaissant à la masse est E (nettement supérieure à la tension de sécurité) (voir fig. 7) .

3) La section du conducteur de protection (PEN ou PE):

La section minimale d'un conducteur neutre utilisé comme conducteur de protection est donnée comme suit: Dans une installation triphasée: - Sa section est égale à celle du conducteur de phase lorsque la section de ceci est inférieure ou égale à 16mm^2 avec un minimum de $2,5\text{mm}^2$ - égale à 16mm^2 si la section du conducteur de phase est supérieure à 16mm^2 sans excéder 35mm^2

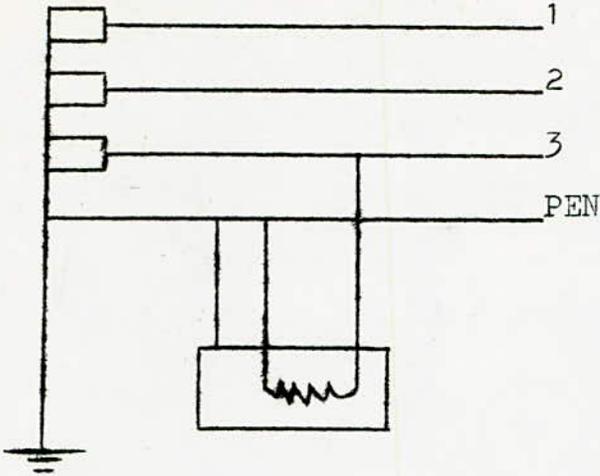


Fig. 4 Schéma TN-A

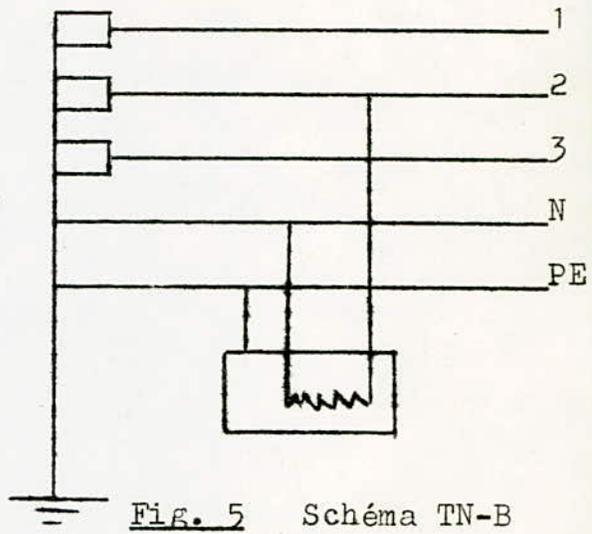


Fig. 5 Schéma TN-B

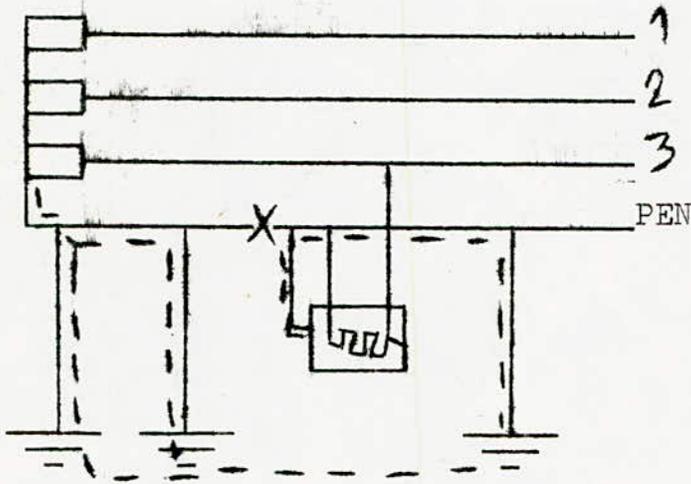


Fig. 6

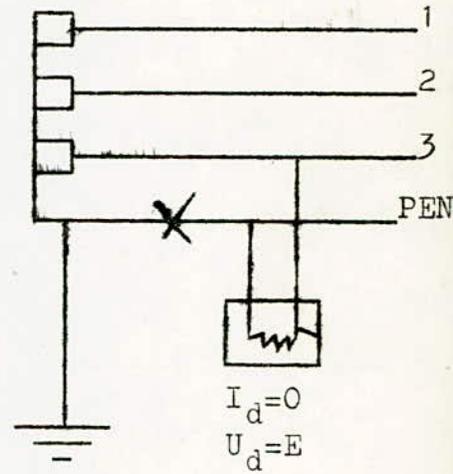


Fig. 7

-Egale à la moitié du conducteur de phase lorsque cette dernière est supérieure à 35 mm^2 .

Installation monophasée: Dans de telles installations les deux sections du conducteur de phase et de celui de protection sont égales.

c) Analyse des conditions de protection: Lors d'un défaut, le dispositif doit réagir automatiquement et durant un temps suffisamment court pour que le fil ne sera pas porté à une température trop élevée. Mais cette protection n'est pas aussi efficace puisque durant le fonctionnement du dispositif la tension de contact est supérieure à la tension de sécurité.

d) Choix et analyse du dispositif de protection: Puisque le courant de défaut pouvait être assimilé à un courant de court-circuit, les dispositifs de protection à utiliser sont ceux à maximum de courant:

- Coupe circuit à fusibles.
- Disjoncteur à maximum de courant.

Le choix du dispositif se repose sur:

-Le pouvoir de coupure: Il doit être au moins égal au courant de défaut.

-Il faut que la tension de contact qui apparaît lors d'un défaut soit éliminée durant un temps conforme à la courbe de sécurité et que le conducteur n'atteint pas une température qui peut détruire une isolation.

Coupe circuit à fusible: Ce sont des appareils de protection contre les surintensités. A cet effet ils comportent un élément conducteur qui, dans certaines conditions s'échauffe et fond sous l'effet de passage du courant. Il en résulte une coupure.

re du circuit dans lequel le fusible est inséré, d'où la protection des appareils situés en aval. Un coupe-circuit comprend:

-Un fusible: On utilise surtout l'argent qui est inoxydable, très bon conducteur et dont le point de fusion n'est pas trop élevé: 960,8°. On utilise également des alliages de plomb, d'étain, d'aluminium...

-Un porte fusible: Et ceci pour faciliter le remplacement du fusible.

-Un socle raccordé au circuit et de forme appropriée pour recevoir le porte fusible.

Un fusible est caractérisé par son courant nominal I_n qu'il peut supporter sans que l'échauffement dépasse les limites, par son intensité $I_f = K \cdot I_n$ de fusion. K dépend du temps que met le dispositif pour couper le circuit ainsi que de sa nature.

On distingue trois types de fusibles:

-gF: fusible à action rapide.

-gT: fusible à action temporisée.

-aM: n'assure que la protection contre les courts-circuit.

Les fusibles répondent à la relation: $I^4 \cdot t = \text{Constante}$.

Pour un temps de coupure $t=5s$, K peut être égal à:

Fusible gT:	$I_n \leq 100A$	$K_5 = 5,5$
	$100A < I_n \leq 200A$	$K_5 = 6,5$
	$200A < I_n \leq 500A$	$K_5 = 7$
	$I_n > 500A$	$K_5 = 9$

Fusible aM: Quelque soit I_n $K_5 = 8,5$

Pour un temps quelconque de coupure $K_t = K_5 \cdot \sqrt[4]{5/t}$

Le choix du fusible se fait tel que $I_{cc} > I_f$

Les coupe-circuits à fusible présentent l'avantage d'être des

appareils simples, économiques, peu encombrants, d'entretien réduit ils assurent une coupure rapide et une bonne protection contre les court-circuits donc ils nous permettent de remplacer les disjoncteurs qui sont devenus insuffisants. Mais, ils ont l'inconvénient d'être inaptes à la protection contre les surchargés, provoquent des surtensions au moment de la coupure et nécessitent le remplacement du fusible après fusion.

Disjoncteur à maximum de courant:

Tout disjoncteur possède un courant de déclenchement magnétique I_m . Pour installer un tel disjoncteur afin de protéger une portion de circuit, il faut le prévoir de façon à ce que son courant I_m soit au plus égal au courant de défaut I_d . Sachant que $E = Z_d \cdot I_d$ avec Z_d : impédance de la boucle de défaut, il faut que $Z_d \leq E / I_d$ pour que le temps de coupure du disjoncteur sera conforme à la courbe de sécurité. Au cas où on a un défaut phase-masse, il faut que le courant de défaut soit supérieur ou égal au courant assurant le fonctionnement du disjoncteur en 5s au plus. Cela se traduit par : $I_d > K \cdot I_n$. K dépend du type du disjoncteur et du temps de coupure exigé: Pour un temps $t = 5s$ on a:

-Disjoncteur du type L: $K = 2,7$

-Disjoncteur du type U: $K = 4$

-Autres types: $K = 15$

On va calculer la longueur maximale de canalisation que peut protéger un coupe-circuit à fusible ou un disjoncteur:

En cas de défaut phase-masse, on a: $E_c = (R_{ph} + R_{pe}) \cdot I_d$

on pose $m = R_{pe} / R_{ph}$ alors $E_c = R_{ph} \cdot (1 + m) \cdot I_d$

puisque $R_{ph} = \rho \cdot L / S_{ph}$ donc $E_c = \rho \cdot L \cdot (1 + m) \cdot I_d / S_{ph}$

D'après la norme NF C15 100 et en cas de court circuit

$E_t = 0,8$ fois la tension nominale en service normal d'où:

$$L = \frac{0,8 \cdot E \cdot S_{ph}}{\rho \cdot (1+m) \cdot I_d}$$

-Pour un coupe-circuit à fusible, on a $I_d \geq I_f$ d'où la longueur maximale de canalisation:

$$L_{max} = \frac{0,8 \cdot E \cdot S_{ph}}{\rho \cdot (1+m) \cdot I_f}$$

-Pour un disjoncteur à maximum de courant, on a vu que $I_d \geq K \cdot I_n$ d'où la longueur maximale de canalisation:

$$L_{max} = \frac{0,8 \cdot E \cdot S_{ph}}{\rho \cdot (1+m) \cdot K \cdot I_n}$$

II-NEUTRE RELIE A LA TERRE PAR UNE IMPEDANCE OU ISOLE:

a)Principe: Ce schéma (IT) est conçu de telle façon que l'apparition du courant de premier défaut affectant une masse est limité par les impédances de fuite à une valeur suffisamment faible pour que la masse affectée du défaut ne soit pas portée à un potentiel dangereux.L'apparition du second défaut alors que le premier n'est pas éliminé donne naissance à un courant de défaut assimilable à celui d'un court-circuit entraînant ainsi le fonctionnement du dispositif de protection (Voir Fig.8).

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

b)Règles de protection: Vu que le courant de défaut dépend des impédances de fuite naturelles de l'installation,il est nécessaire de limiter l'étendue d'une telle installation avec l'installation d'un contrôleur permanent de l'isolement qui surveille l'isolement et signale toute diminution du niveau d'isolement ce qui nécessite un service d'entretien permettant l'élimination rapide des défauts.

En cas d'un 2^{ème} défaut,la protection doit être assurée par:

-Des dispositifs de protection contre les surintensités normalement prévus dans l'installation.

-La liaison équipotentielle des masses et des éléments conducteurs qui permet d'une part à transformer le courant de double défaut en courant de court-circuit assurant le fonctionnement des dispositifs de protection contre les surintensités et d'autre

part à affirmer que pendant le temps de fonctionnement de ces dispositifs de protection, aucune différence de potentiel dangereux ne puisse apparaître entre 2 éléments simultanément accessibles.

Deux modes du schéma IT peuvent être réalisés:

-Masses non interconnectées.

-Masses interconnectées.

-Masses non interconnectées: (Voir fig.9) Si un 2^{ème} défaut apparaît dans une masse M1 avant qu'un 1^{er} défaut affectant une masse M2 ne soit éliminé, l'ensemble donnerait naissance à la circulation de 3 courants:

-Les courants I_1 et I_2 se referment par l'impédance Z installée entre le point neutre et la terre, ces courants sont des courants de premier défaut. Et l'impédance Z est telle que les produits $R_{m1} \cdot I_1$ et $R_{m2} \cdot I_2$ sont inférieurs à la tension de sécurité.

-Le courant I_3 se referme par les résistances des prises de terre des masses M1 et M2, la tension U entre phases se répartit entre les chutes de tension dans les résistances R_{m1} et R_{m2} et l'une au moins des masses M1 et M2 est portée à un potentiel supérieur à U_1 . La protection est assurée en protégeant chacun des circuits alimentant les masses M1 et M2 par un dispositif tel que

$$R_{m1} \cdot I_1 = U \quad \text{ou} \quad R_{m2} \cdot I_2 = U$$

Un disjoncteur différentiel peut assurer cette fonction.

-Masses interconnectées: (Voir fig.10) On effectue une liaison entre les masses M1 et M2. De ce fait le courant I_3 devient un véritable courant de court-circuit car il ne passe pas par les résistances R_{m1} et R_{m2} . La protection est assurée par les dispositifs de protection contre les surintensités.

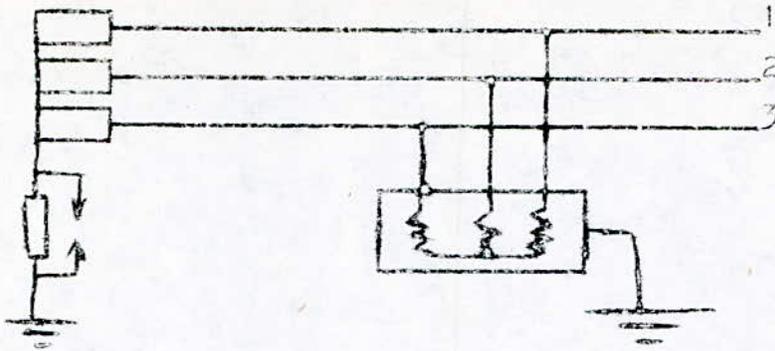


FIG. 8 Schéma IT

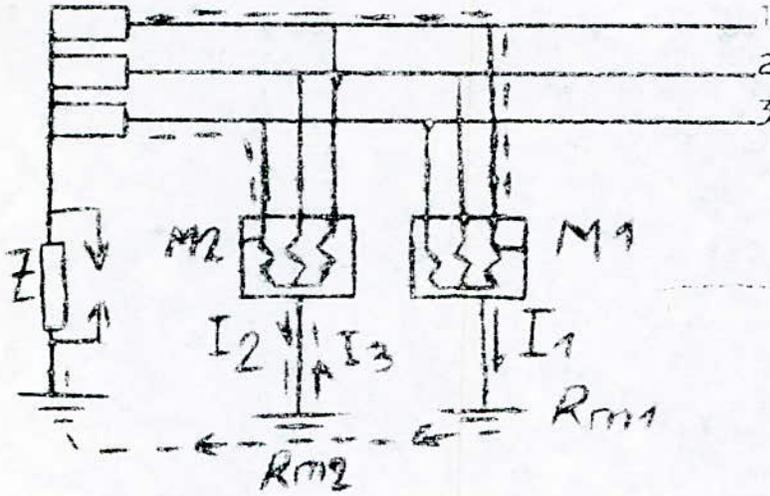


FIG. 9 Masses non interconnectées

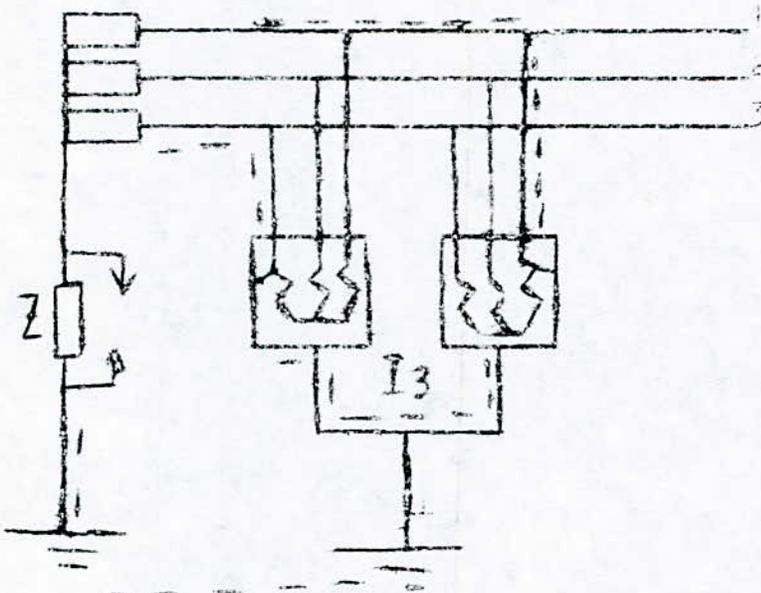


FIG. 10 Masses interconnectées

c) Analyse des conditions de protection. La coupure du circuit ne s'effectue qu'après l'apparition d'un 2^{ème} défaut, d'où la nécessité du calcul du courant de double défaut (Voir fig.11).

2cas peuvent être rencontrés:

1^{er} cas: Le conducteur PE a la même section que le conducteur de phase .On va calculer les courants de court-circuit diphasé aux points A et B :

$$I_{cc_A} = \frac{U}{2 \cdot Z_A} \quad \text{avec } Z_A = (R_{SO} + R_{OA}) + (X_{SO} + X_{OA}) \cdot j$$

$$I_{cc_B} = \frac{U}{2 \cdot Z_B} \quad \text{avec } Z_B = (R_{SO} + R_{OE} + R_{EB}) + j \cdot (X_{SO} + X_{OE} + X_{EB})$$

Le courant de double défaut qui se referme par les conducteurs de protection est égal à:

$$I_d = \frac{U}{2 \cdot Z_A + 2 \cdot Z_B - 2 \cdot Z_0}$$

$$\text{avec } Z_0 = R_{SO} + j \cdot X_{SO}$$

$$\text{Donc: } \frac{1}{I_d} = \frac{1}{I_{cc_A}} + \frac{1}{I_{cc_B}} - \frac{1}{I_{cc_0}} \quad \text{avec } I_{cc_0} = U / (2 \cdot Z_0)$$

$$\text{En prenant } C = I_{cc_A} / I_{cc_B} \quad \text{et} \quad A = (Z_B - Z_0) / Z_B$$

$$\text{On trouve } I_d = \frac{I_{cc_A}}{1 + C \cdot A}$$

2^{ème} cas: Le conducteur PE a une section inférieure à celle des conducteurs actifs: Soit $m = S_{ph} / S_{pe}$ avec $m > 1$

$$\text{On trouve } I_d = \frac{U}{Z_A + m \cdot Z_A - Z_0 + Z_B + m \cdot Z_B - Z_0}$$

$$\text{d'où } I_d = I_{cc_A} \cdot \frac{1}{(1+m) \cdot (1 + A_4 \cdot C)} \quad \text{avec } A_4 = 1 - \frac{2 \cdot m \cdot Z_0}{Z_B \cdot (1+m)}$$

Si $I_{cc_A} < I_{cc_B}$, le rapport $C < 1$ donc $A / (1+C) > 1/2$. Donc le courant I_d est au moins égal à la moitié de I_{cc_A} ou I_{cc_B} .

Réglage du contrôleur permanent d'isolement: Le contrôleur

permanent d'isolement est réglé de telle façon à signaler toute diminution du niveau d'isolement avant l'apparition d'un 2^{ème} défaut qui fait perdre tous les avantages du système.

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.

Supposons un défaut franc entre la phase 1 et la terre (Voir fig.12). Le courant de premier défaut I_d est égal à :

$$I_d = I_0 + I_2 + I_3 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} \cdot (R_m + R_n + Z_0)} + \frac{U_{12}}{R_m + Z_2} + \frac{U_{13}}{R_m + Z_3}$$

Or, d'après la norme NF C15 100 le potentiel de la masse ne doit atteindre le potentiel de sécurité c'est à dire :

$$R_m \cdot I_d \leq U_l \quad \text{d'où} \quad I_d \leq U_l / R_m$$

En pratique, on admet que I_0 est très faible devant I_1 et I_2 surtout si l'un des deux courants I_1 ou I_2 est dû à un défaut direct phase-terre donc :

$$I_d \leq \frac{U_{12}}{R_m + Z_2} + \frac{U_{13}}{R_m + Z_3}$$

$$\text{Supposons que } Z_2 = Z_3 = Z \text{ alors : } I_d \leq \frac{U \cdot \sqrt{3}}{R_m + Z} \leq U_l / R_m$$

Donc, le seuil minimal de réglage du C.P.I. est :

$$Z \geq R_m \cdot (U \cdot \sqrt{3} - U_l) / U_l$$

Si un défaut d'isolement est dû à un défaut direct phase-terre, alors $Z \geq R_m \cdot (U \cdot \sqrt{3} - U_l) / (2 \cdot U_l)$ c.à.d la moitié de la précédente. Si I_0 peut être négligé devant I_1 et I_2 , il faut au moins que I_1 et I_2 soient au moins égaux à 10 fois I_0

$$\text{Ce qui donne : } \sqrt{3} \cdot (R_m + R_n + Z_0) \geq 10 \cdot (R_m + Z)$$

En remplaçant Z par la valeur trouvée précédemment, on aura :

$$Z_0 \geq 10 \cdot R_m \cdot \frac{U}{U_l} - (R_m + R_n) \text{ . Soit en négligeant } R_m + R_n \text{ devant}$$

$$Z_0, \text{ on trouve la valeur minimale de } Z_0 \text{ soit } Z_{0\text{min}} = 10 \cdot R_m \cdot U / U_l$$

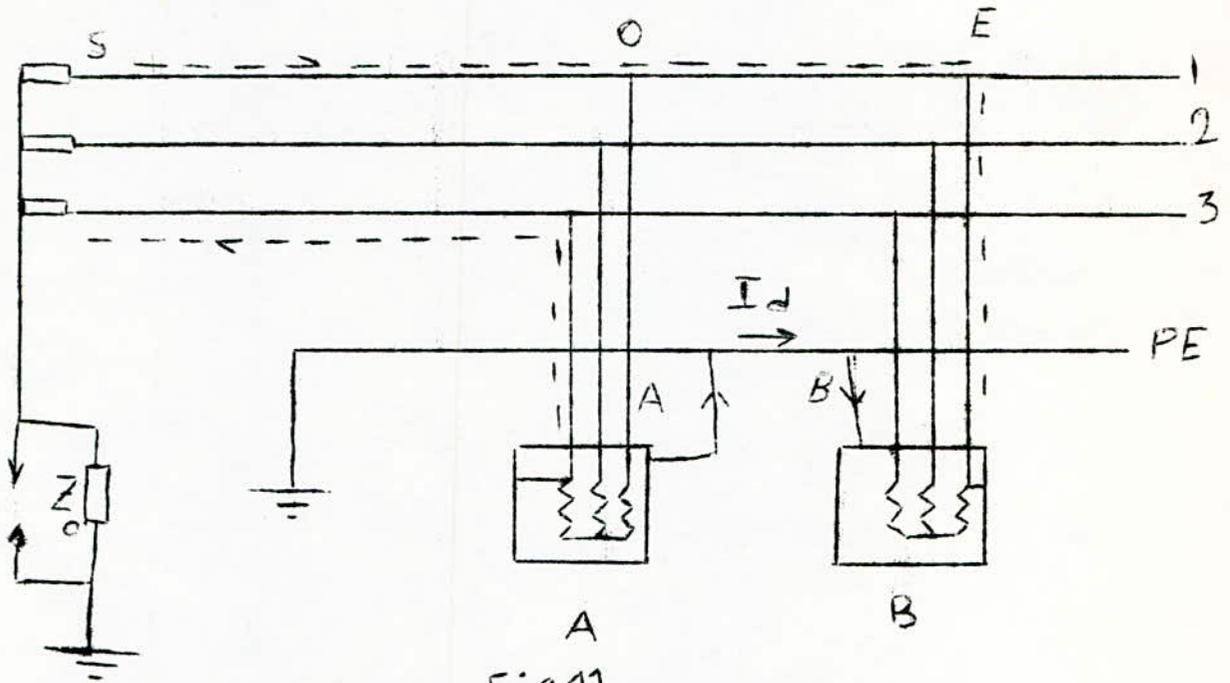


Fig 11

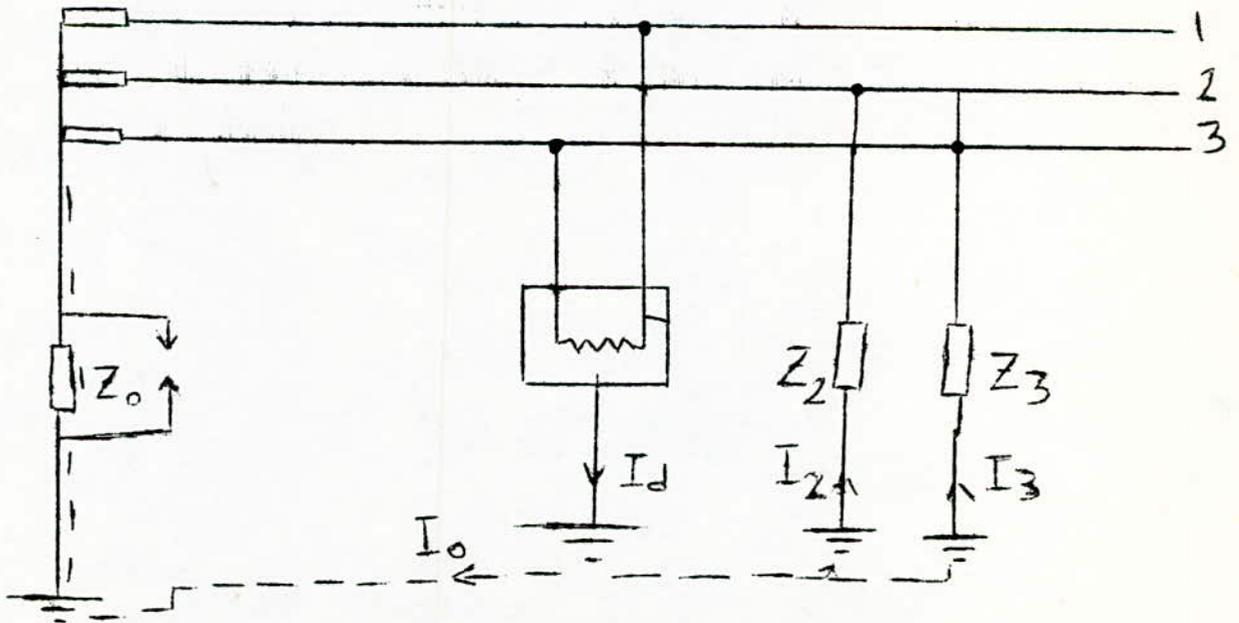


Fig.12

Exemple: Pour un réseau triphasé 220/380 V et $U_l=50$ V on donne quelques valeurs de Z et Z_0 en fonction de R_m dans le tableau ci-dessous:

R_m en Ohms	Z en Ohms	Z_0 en Ohms
1	6	76
5	30	380
10	60	760
20	120	1520
50	300	3800

Mais la norme recommande de régler le seuil de fonctionnement du C.P.I. à 0,8 fois la résistance de l'isolement de l'ensemble de l'installation.

-1,25 fois la limite supérieure du domaine de réglage du seuil de fonctionnement du C.P.I.

d) Choix des dispositifs de protection: En cas de double défaut le choix du dispositif se fait selon que les masses sont interconnectées ou non.

-Masses non interconnectées: La protection est assurée de la même façon qu'au schéma TT c.a.d par des dispositifs différentiels.

-Masses interconnectées: La protection est assurée par des dispositifs à maximum de courant.

Remarque: Pour le schéma IT, on shunte l'impédance de la mise à la terre du neutre par un parasurtenseur (un éclateur) qui permet la protection en cas d'un contact HT/BT.

CHAPITRE II

MISE A LA TERRE DES POINTS NEUTRES DES
RESEAUX HAUTE TENSION

I-Réseau à neutre isolé:

Si on isole le point neutre de la terre, son potentiel par rapport à la terre ainsi que les potentiels des phases ne seront plus définis. Ils dépendront essentiellement de la disposition, de l'étendue et de l'état d'isolement du réseau, autrement dit des capacités et des perdittances des lignes.

Généralement les réseaux haute tension sont bien isolés et on peut par conséquent négliger les perdittances devant les capacités et de ne tenir compte que de ces dernières.

Pour un réseau triphasé, il existe 6 capacités, 3 entre phases et les 3 autres entre les phases et la terre (voir fig.13)

Dans le cas où le réseau est symétrique, on aura:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_t \quad \text{avec} \quad C_t = C_{to} \cdot l \quad \text{et} \quad C_{to} = \frac{0,02415}{\text{Log}(2h/r)} \quad \text{F/Km}$$

$$\text{et} \quad C_{12} = C_{23} = C_{31} = C_p$$

$$\text{avec} \quad C_p = C_{po} \cdot l \quad \text{et} \quad C_{po} = \frac{0,02415}{\text{Log}(b_m/r)} \quad \text{F/Km}$$

avec

l: longueur du réseau

h: hauteur des cables par rapport à la terre

r: rayon des conducteurs

$$b_m = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \quad D_{ij}: \text{distance entre } i \text{ et } j$$

Les courants capacitifs sont égaux à:

$$I_1 = I_{t1} + I_{C31} + I_{C12}$$

$$I_2 = I_{t2} + I_{C12} - I_{C23}$$

$$I_3 = I_{t3} + I_{C23} - I_{C31}$$

avec

$$I_{t1} = j C_1 \omega V_1$$

$$I_{t2} = j C_2 \omega V_2$$

$$I_{t3} = j C_3 \omega V_3$$

et

$$I_{C12} = j C_{12} \omega U_{12}$$

$$I_{C23} = j C_{23} \omega U_{23}$$

$$I_{C31} = j C_{31} \omega U_{31}$$

On peut représenter ainsi le diagramme vectoriel des tensions et des courants en cas de l'état normal: (voir fig.14)

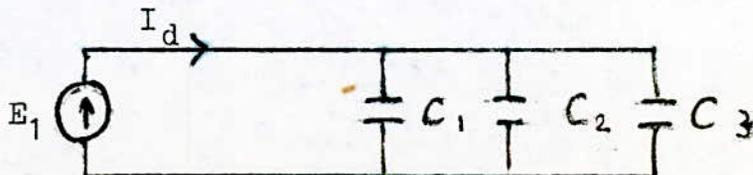
En cas du réseau symétrique, la somme vectorielle des courants est nulle.

Traisons maintenant le cas où une phase est affectée d'un défaut franc avec la terre. On peut, pour calculer le courant de défaut superposer deux états: Un état normal et l'autre état suppose que seule la tension de la phase en défaut agit sur le système (voir fig.15)

Le courant de défaut se referme par les capacités des phases saines avec la terre, donc ce courant est égal à:

$$I_d = 3 j C_t \omega E_1$$

On remarque que I_d ne dépend pas du lieu de défaut. On peut représenter le système par un schéma équivalent (et ceci en négligeant les résistances et les inductances de la ligne).



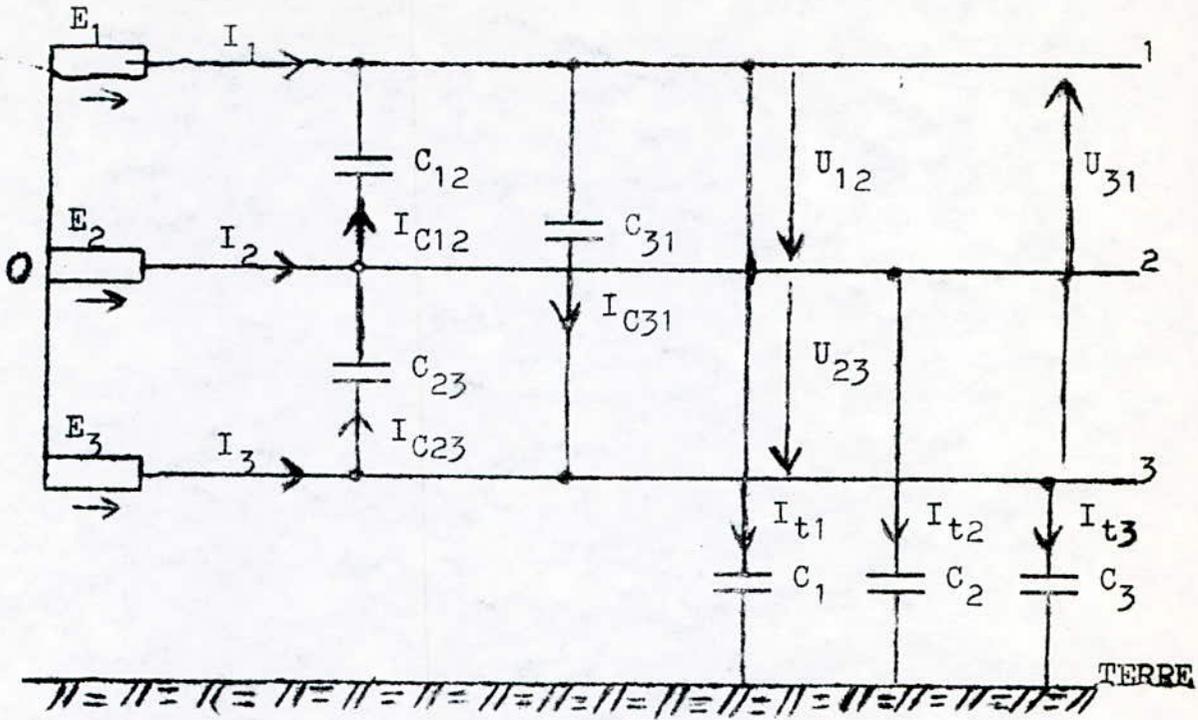


Fig. 13

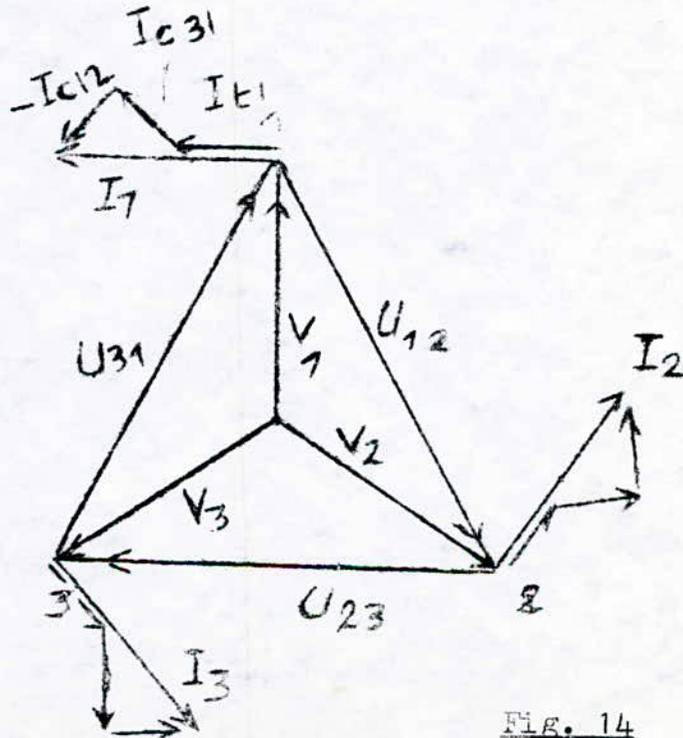


Fig. 14

En général le défaut n'est pas dû à un contact franc, mais à un arc franchissant un intervalle d'air entre le conducteur de ligne et un conducteur relié à la terre par ex. un contact entre le conducteur de ligne et la branche d'arbre humide. Cet arc s'éteint et s'allume provoquant ainsi des surtensions dangereuses. En outre, la superposition de la tension $-E_1$ sur le diagramme des tensions porte les potentiels des phases saines par rapport à la terre à $\sqrt{3}$ fois plus que la tension simple, mais les tensions entre les phases sont restées inchangées.

L'arc électrique est autoextincteur si le courant ne dépasse pas les valeurs suivantes:

30 A pour les tensions de 10kV

5 A pour les tensions au dessus de 10kV

Ce qui revient à réduire l'étendue du réseau compte tenu que le courant de l'arc est un courant capacitif.

Le calcul de la longueur admissible de la ligne se fait en prenant en considération le courant admissible:

$$I_{adm} = 3 C_{to} l \omega E \quad \text{d'où} \quad l_{adm} = \frac{I_{adm}}{3 C_{to} \omega E}$$

Le tableau suivant nous donne les différentes capacités par rapport à la terre en fonction de la nature et la disposition des lignes:

Genre du cable	C_{to} en nF/Km
Conducteur aérien sans cable de garde	2,8
Conducteur aérien avec cable de garde	3,2
Cable à ceinture	70
Cable à surfaces métalliques	130

Exemple:

Pour $C_{to} = 10^{-6}$ S/Km ; $I_{adm} = 30A$; $U = 10kV$ on aura:

$$l_{adm} = \frac{30}{3 \cdot 10 / \sqrt{3}} = 1700Km$$

Pour la ligne aérienne avec cable de garde; $I_{adm} = 5A$;

$U = 30kV$ on aura $l_{adm} = 93Km$

Pour un cable à ceinture ; $I_{adm} = 5A$; $U = 30kV$ on aura

$$l_{adm} = 42Km$$

On en déduit que pour des tensions supérieures à 10kV, si on veut étendre notre réseau il faut éteindre l'arc .Ceci se fait en installant une bobine entre le neutre et la terre. La norme française exige qu'il faut déclencher le système lors d'un défaut phase-terre. Ceci peut se faire en installant un transformateur de potentiel raccordé aux trois phases du réseau à protéger qui détecte le déséquilibre provoqué par le défaut et le transmette à un relais sensible commandant un disjoncteur qui coupe ainsi le courant (voir fig.16).

On munit ce système avec un système de réenclenchement automatique qui réenclenche le système en cas où le défaut est éliminé.

II-Réseau à neutre mis à la terre par circuit résonnant:

Etant donné que dans le système à neutre isolé ,le courant de défaut a pour retour les capacités de la ligne, et, si on veut éliminer ce courant ou éteindre l'arc, il faut supprimer son chemin de retour c'est à dire éliminer le courant capacitif.

Pour ceci, on installe entre le neutre et la terre une bobine dont le courant inductif sert de retour au courant capacitif Cette méthode peut se faire de deux façons suivant que le neutre est accessible ou non .

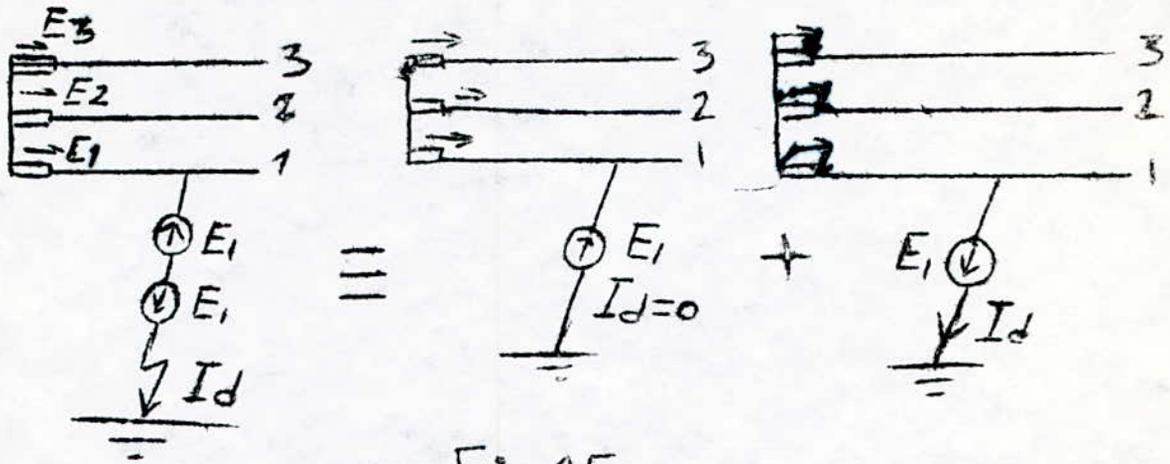
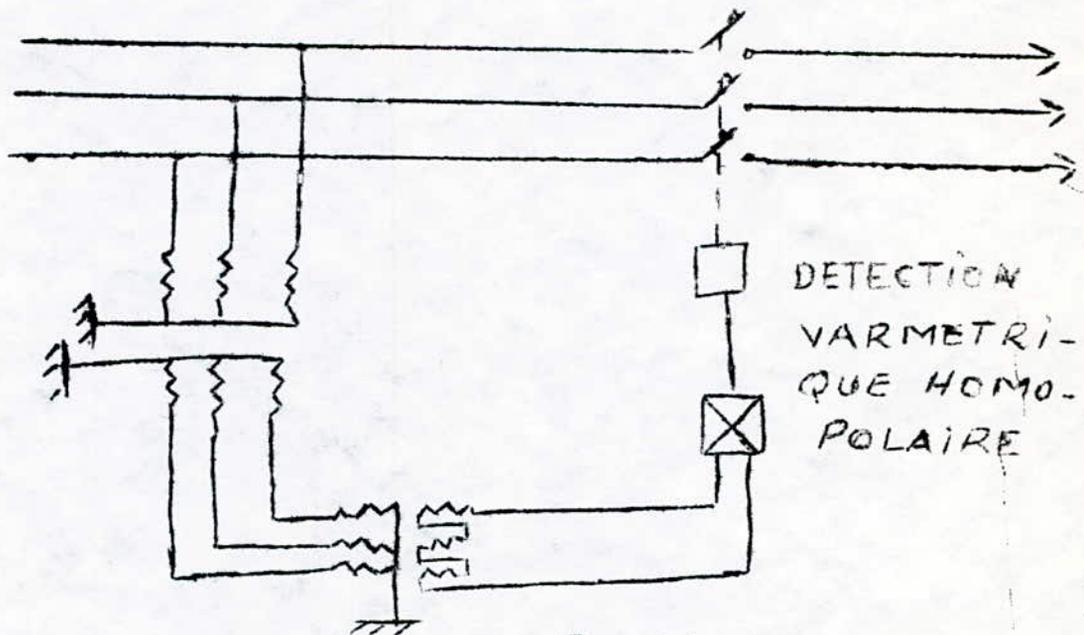


Fig.15

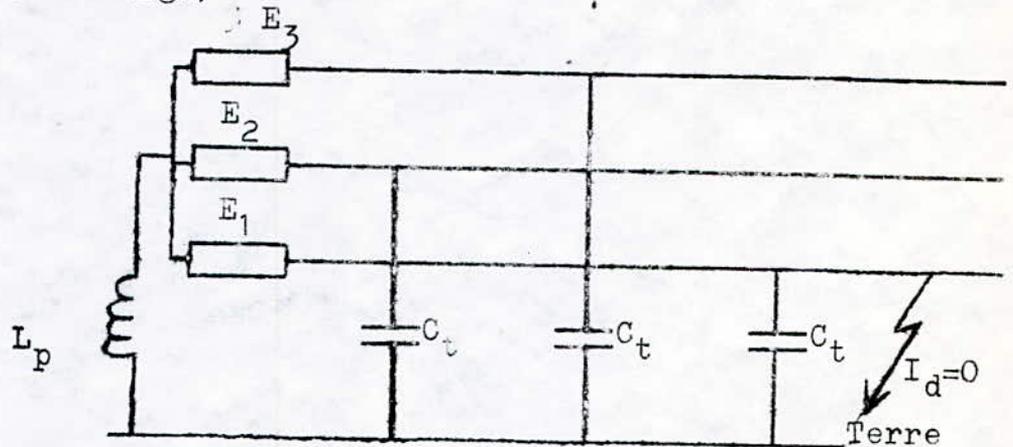


DETECTION
VARMETRI-
QUE HOMO-
POLAIRE

Fig 16

1-Mise à la terre du neutre par bobine de Petersen:

On met le neutre à la terre par l'intermédiaire d'une bobine réglable (voir fig.)



En négligeant les résistances, le réseau se comporte comme un circuit bouchon:

Puisque $I_d=0$, donc $L_p = \frac{1}{3 C_t \omega^2}$

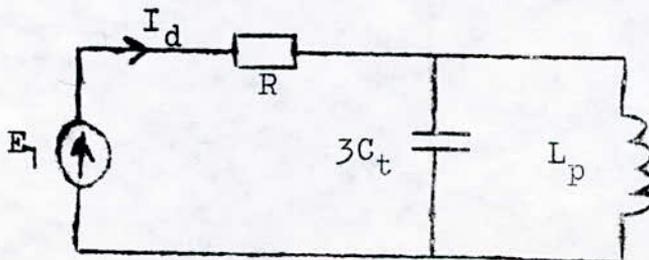
Si on tient compte des diverses inductances de la ligne, soit leur somme L alors on aura:

$$L_p = \frac{1}{3 C_t \omega^2} - L/3$$

Exemple:

Soit une ligne dont la capacité unitaire est $C_{t0}=3,2nF/Km$
 $l=60Km$ alors $L_p=17,6 H$

En réalité, on a toujours une résistance R (de l'arc, de contact de mise à la terre) alors le système peut être représenté par



Le courant de défaut passe par la terre, le neutre et la capacité et ceci du fait que le potentiel de la phase affectée du défaut (ici phase 1) n'est pas nul. On peut calculer ce courant

$$I_d = E_1 / Z \quad \text{avec} \quad Z = R + \frac{jL_p \omega + 1/3jC_t \omega}{jL_p \omega + 1/3jC_t \omega}$$

$$\text{d'où} \quad I_d = E_1 / (R - j \frac{L_p C_t \omega^2 - 1}{L_p C_t \omega^2 - 1})$$

La formule du courant présente un cercle dont la droite de projection est $D(R) = R + j \frac{L_p \omega}{3 L_p C_t \omega^2 - 1}$

Le centre se calcule comme suit:

$$OC = E_1^2 / 2ON = \frac{3 L_p \omega E^2}{3 L_p C_t \omega^2 - 1}$$

Le tracé du cercle est sur la fig. 17

De ce cercle on voit que pour R croissant, le courant I_d correspondant diminue en module et en déphasage.

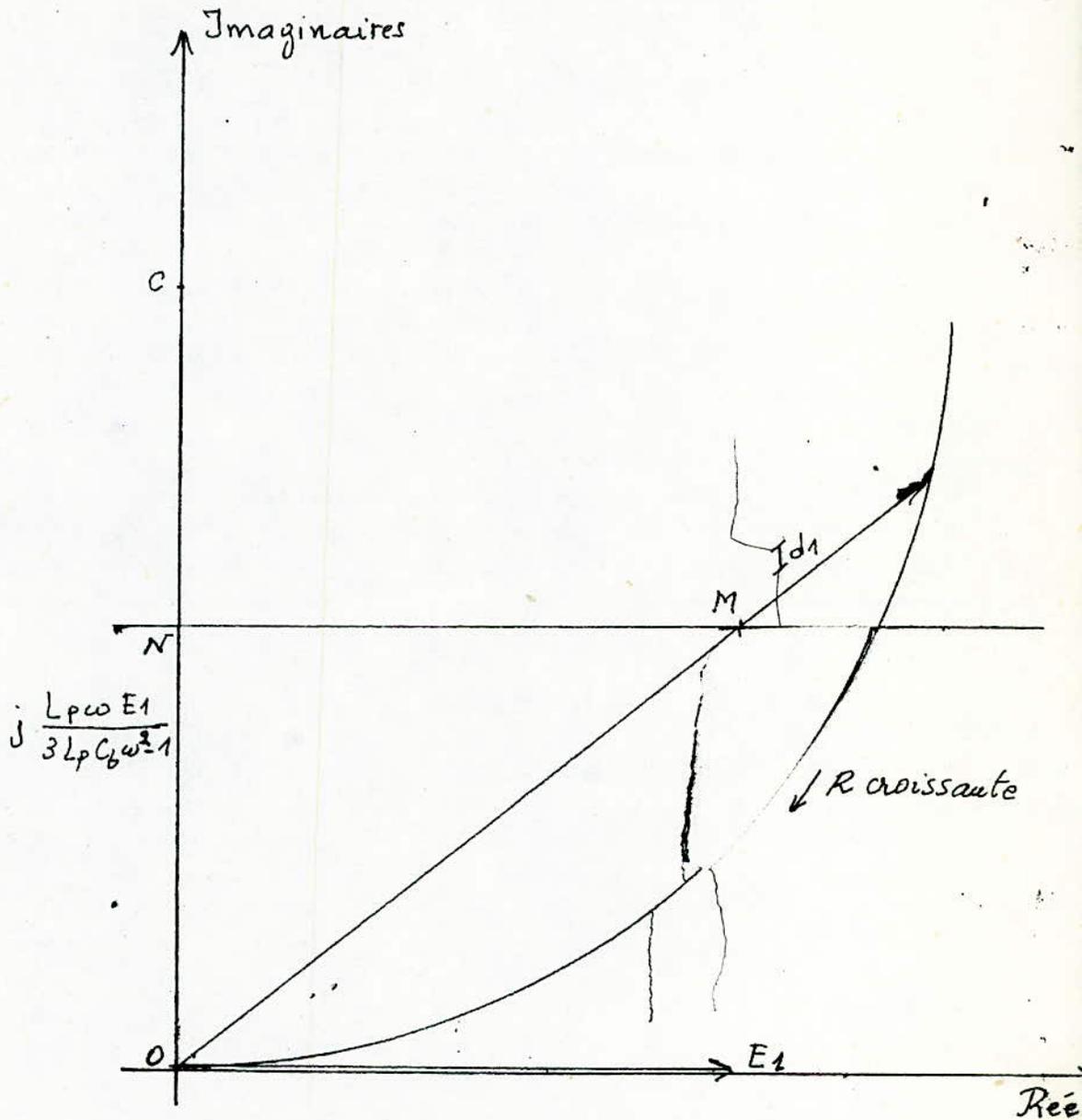
2-Réseau à neutre mis à la terre par un transformateur:

Si le neutre n'est pas accessible, on peut créer un neutre artificiel à l'aide d'un transformateur spécial. (~~voir fig. 18~~)

Le transformateur dont le primaire est en étoile est branché en dérivation au début de la ligne. Son neutre est relié à la terre. Son secondaire dont les bobinages sont connectés en série est fermé sur une charge R_r réglable qui sert à varier le courant I_0 . La norme française exige que le courant passant par le neutre du transformateur spécial (I_0) soit égal à deux fois le courant capacitif total de la ligne.

En cas de défaut franc entre une phase et la terre le courant I_d est égal à la somme géométrique des deux courants I_0 et I_c . Puisque I_0 est inductif et I_c capacitif $I_d = I_0 / 2$.

Donc, en cas de défaut, on détecte un courant qui est double du courant de défaut ce qui assure une sécurité double.



On prend E_1 comme origine des phases.

(E_1 réel)

$$\overline{ON} = j \frac{L_p \omega E_1}{3L_p C_f \omega^2 - 1}$$

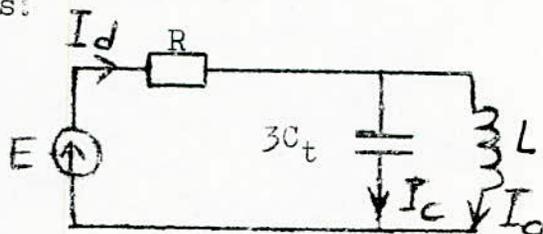
$$\overline{OC} = \frac{2 L_p \omega E^2}{3L_p C_f \omega^2 - 1}$$

Connaissant la résistance R , on peut tirer I_d .

ex: si $R = \overline{NM}$, alors $I_d = I_{d1}$

Fig. 17

Le déclenchement en cas de défaut est assuré par un transformateur tore : Le courant I_0 passe à travers le transformateur tore et induit une f.e.m dans celui-ci qui fait agir le relais commandant le disjoncteur général qui coupe l'alimentation par la suite. Le schéma équivalent en cas où le défaut affecte une phase et ceci en tenant compte de la résistance de défaut est représenté ci-dessous :



Soit $X_L = L\omega$ et $X_C = 1/(3 C_t \omega)$

Puisque $I_o = -2 I_c$ donc $X_L = X_C/2$ et $I_d = E/(R + j X_C)$

Le courant I_o est égal à :

$$I_o = 2 E / (R + j X_C)$$

Le courant I_d varie suivant un cercle dont la droite de projection est $D(R) = R + j X_C$ et le centre $OC = -E^2/2 X_C$

Si on veut améliorer les conditions d'exploitation, on installe sur chaque départ un transformateur tore auquel on associe un relais. Si un défaut affecte un départ, seul le départ affecté de défaut est mis hors tension.

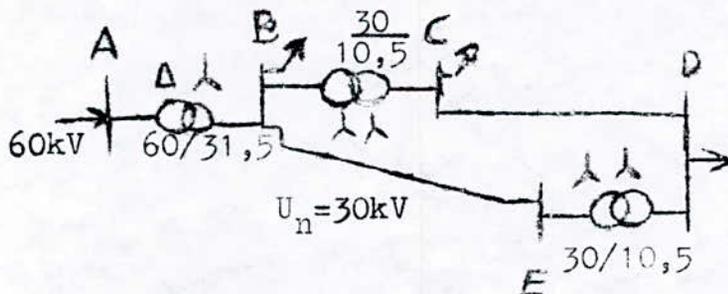
La mise à la terre par transformateur présente certains avantages par rapport à la bobine de Petersen qui résident dans le fait que le 1^{er} étant placé entre la ligne et le générateur et donc, les décharges à la terre ne seront pas ressenties par le transfo comme le cas de la bobine de Petersen, de plus on peut vérifier le potentiel de chaque phase par rapport à la terre à chaque instant.

III-Réseau à neutre relié directement à la terre/

Dans ce cas le neutre est connecté directement à la terre. Suivant l'A.I.E.E, le point neutre d'un réseau ne peut être considéré comme mis à la terre directement que si le rapport de la réactance homopolaire à la réactance directe vues du point de court-circuit est inférieur à 3 et le rapport de la résistance homopolaire à la réactance directe n'est pas supérieur à 1. Pour ce régime, un défaut à la terre se traduit par un court-circuit homopolaire. Le courant de défaut qui en résulte est très intense et peut provoquer des dérangements dans les lignes de communication téléphoniques voisines. Ces dangers peuvent être évités en limitant la valeur du courant de défaut ceci en insérant entre la terre et le neutre une résistance ou une inductance de valeur modérée ou bien en coupant le circuit en installant des disjoncteurs à grande vitesse de coupure.

Exemple: Mise à la terre du point neutre d'un réseau 30kV

Le réseau étudié est le suivant:



$$S_{cc}(A) = 15 \text{ MVA}; X_d'' = 12\%$$

Il y'a trois possibilités de la mise à la terre: On peut mettre à la terre soit le neutre du transfo AB, soit celui de BC, soit celui de ED.

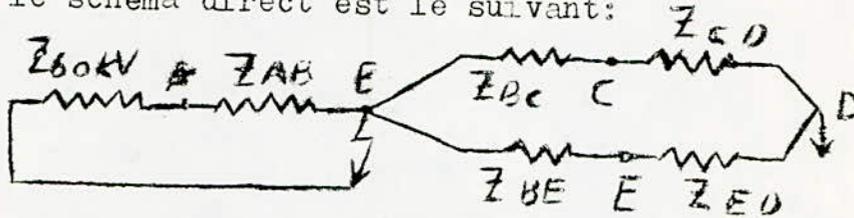
Pour que la mise à la terre soit efficace, il faut mettre autant de points neutres à la terre jusqu'à avoir $X_0/X_d \leq 3$ et $R_0/X_d \leq 1$

R_0, X_0 et X_d sont les impédances vues du point de court circuit

-Mise à la terre du neutre du transformateur AB:

1-Court-circuit en B:

le schéma direct est le suivant:



$$Z_d = Z_{AB} + Z_{60kV} = 0,79 + j7,94 + j7,94 = (0,79 + j15,88) \text{ Ohms}$$

$$\text{d'où } X_d = 15,88 \Omega$$

le schéma homopolaire est le suivant: (Les transformateurs sont à flux forcés)

$$R_0 = R_{OAB} + 3R_n \quad R_{OAB} = 0,85R_{AB} = 0,85 \cdot 0,79 \quad \text{On prend } R_n = 0,5 \Omega$$

$$\text{d'où } R_0 = 2,17 \Omega$$

$$3R_n \quad R_{OAB} + jX_{OAB}$$

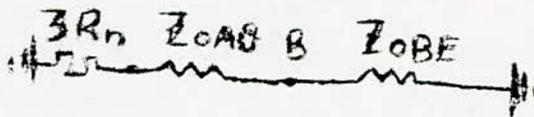
$$X_0 = X_{dAB} \cdot 0,85 \text{ d'où}$$

$$X_0/X_d = 0,85 \leq 3 \quad \text{et} \quad R_0/X_d = 0,13 \leq 1$$

2-Court circuit au point E

Le schéma direct est le même que précédemment après calcul on trouve: $X_d = 17,63 \Omega$

Le schéma homopolaire est le suivant:



$$X_0 = 0,85 \cdot X_{AB} + 3,8 \cdot X_{EB} = 13,6 \Omega$$

$$R_0 = 3 \cdot R_n + 0,85 \cdot R_{AB} + (R_{BE} + 0,15) = 3,72 \Omega$$

$$\text{d'où } X_0/X_d = 13,6/17,63 \leq 3 \quad \text{et} \quad R_0/X_d = 3,72/17,63 \leq 1$$

Etant donné que les conditions sont vérifiées, la mise à la terre du transformateur AB seule est efficace.

IV-Réseau à neutre mis à la terre par résistance:

Il suffit de placer entre le neutre et la terre une résistance qui permettra de limiter le courant de défaut monophasé à la terre et d'éviter des surtensions qui pourraient apparaître si le neutre était isolé. La valeur de cette résistance dépend généralement de la tension et de la puissance circulant dans le réseau, elle limite le courant de défaut à la terre à une valeur inférieure à celle d'un court circuit triphasé.

La mise à la terre résistive nous permet d'avoir des courants de défaut assez intenses pour pouvoir utiliser une protection sélective et élimine les arcs à la terre.

Pour provoquer le déclenchement général, on associe à un transformateur tore monté sur le câble principal un relais qui commande l'ouverture du disjoncteur général.

Dans le cas où il n'y a pas de câble, le transformateur tore ne peut pas être utilisé, alors on a la possibilité d'utiliser trois transformateurs d'intensité.

Dans le cas où un déclenchement sélectif est nécessaire, on installe sur chaque départ un transformateur tore auquel on associe un relais, seulement le relais installé en tête de l'installation doit être légèrement temporisé.

CHAPITRE III

MISE A LA TERRE DANS LES POSTES DE TRANSFORMATION

Les mises à la terre dans les postes de transformation sont réalisées en vue de contribuer à la sécurité des personnes et à la protection du matériel électrique dans ces postes.

Chaque poste doit posséder une prise de terre destinée aux masses et s'il comprend un transformateur de puissance, une prise de terre destinée aux circuits BT. Ces deux prises de terre peuvent être distinctes ou confondues. Dans certains cas pour la mise à la terre des éclateurs à HT il est nécessaire d'installer une prise de terre supplémentaire. Au regard des masses du poste on distingue deux types d'installations:

a) Installations à masses du poste dites séparées: dans lesquelles les masses n'ont aucune liaison électrique:

-Ni avec le point neutre du réseau BT

-Ni avec les masses d'appareils d'utilisation (voir fig. 18)

b) Installations du poste à masses dites reliées: dans lesquelles ces masses sont reliées à un ou plusieurs éléments cités ci-dessus (voir fig. 19)

Dans le poste de transformation, il est nécessaire à la prise de terre des masses les éléments suivants:

-La cuve métallique des transformateurs.

-Les points communs des enroulements primaires des transformateurs de mesure HT/BT et le point commun des circuits secondaires de ces transformateurs.

-Les parafoudres à résistances variables ou les éclateurs des circuits HT

-Les couteaux des sectionneurs de mise à la terre.

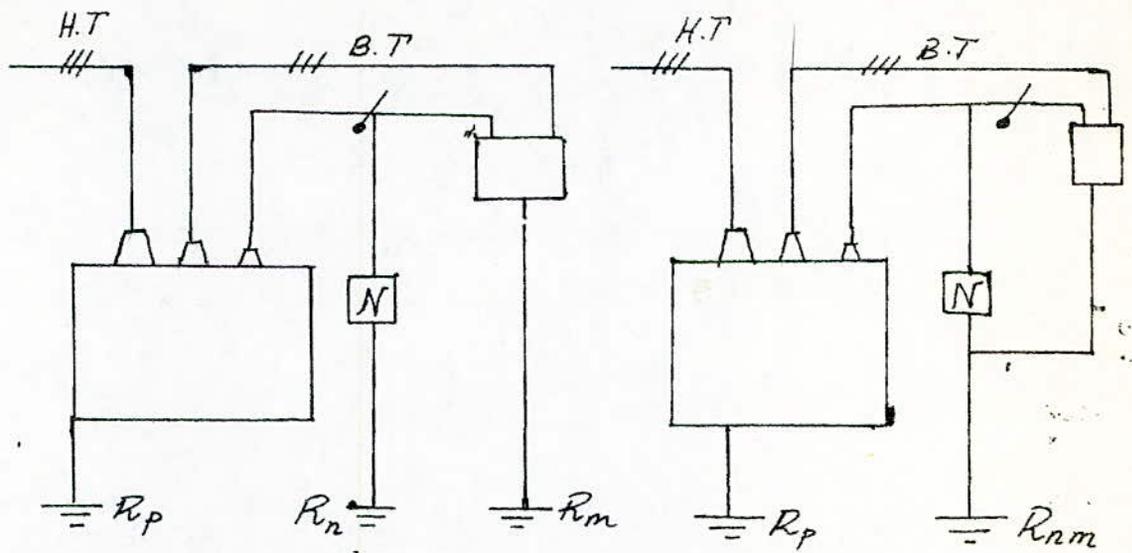


Fig. 18 Masses du poste dites séparées

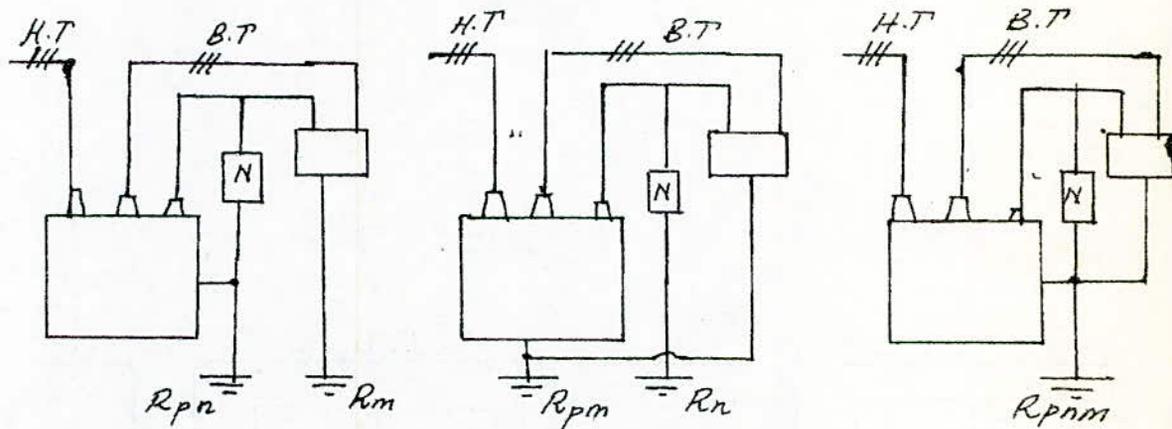


Fig. 19. Masses du poste dites reliées

R_p : Prise de terre des masses du poste

R_n : Prise de terre du neutre

R_m : Prise de terre des masses de l'installation B.T.

\boxed{N} ceci symbolise l'un quelconque des 3 régimes du neutre.

- Neutre mis directement à la terre.

- Neutre isolé

- Neutre impédant.

- Les extrémités des diviseurs capacitifs.
- Les masses de tous les circuits HT et BT y compris les gaines ou écrans conducteurs des cables.
- Les écrans ou panneaux grillagés de protection.

Dans le cas où le poste est connecté à un autre poste ou à un local d'utilisation par un ou plusieurs cables avec gaine ou écran conducteur, il est nécessaire d'établir une liaison électrique convenable entre les masses des deux installations soit par la gaine des cables sinon par un conducteur de protection bien défini.

Conditions à respecter pour l'installation des prises de terre des masses du poste:

Pour assurer aux personnes une sécurité suffisante, il est souhaitable d'installer pour les masses du poste une prise de terre de résistance assez faible, puisqu'une valeur assez grande de celle-ci fera augmenter le potentiel auquel l'écoulement du courant est capable de porter ces masses lors d'un amorçage accidentel entre HT et masse, donc on est obligé pour chaque type d'installation d'utiliser des prises de terre dont la résistance ne dépasse pas les valeurs prescrites ci-dessous:

-Cas où les masses du poste sont reliées au neutre et aux masses de l'installation: soit R_{pnm} la résistance de terre commune

il faut que $R_{pnm} \leq U_l / I_l$ c.a.d il ne faut pas qu'elle engendre une tension supérieure à la tension de sécurité U_l lorsque le courant assurant le fonctionnement du dispositif de protection de l'installation le traverse (en 5s) puisque la tension apparaissant aux masses du poste apparaît aussi aux masses de l'installation.

-Cas où les masses du poste sont reliées uniquement au neutre BT: Il ne faut pas que le neutre sera porté à un potentiel supérieur à U_l lors de l'écoulement du courant de défaut à travers sa résistance de prise de terre ce qui impose $R_{pn} \leq U_l/I_i$
 En plus, il faut éviter de détruire l'isolation des appareils BT ce qui implique que la surtension apparaissant au neutre due au passage du courant de défaut I_i dans R_{pn} augmentée de la tension entre phase et neutre ne dépasse pas la tension de tenue la plus faible des matériels de l'installation c'est à dire

$$R_{pn} \leq (U_{tm} - E)/I_i$$

où: U_{tm} : tension de tenue des matériels BT

E : tension entre phase et neutre

-Cas où les masses du poste sont reliées aux masses de l'installation: Il ne faut pas que les masses seront portées à une tension supérieure à U_l . Et, il ne faut pas que la tension de tenue soit dépassée quand le neutre est parcouru par un courant de défaut.

-Cas où les masses du poste sont isolées: Il ne faut pas que la masse sera portée à un potentiel supérieur à U_l lors d'un défaut en outre, il ne faut pas que l'isolement des matériels du poste soit détérioré c'est à dire: $R_p \leq (U_{tp} - E)/I$ où:

I : est le courant de premier défaut à la terre

U_{tp} : tension de tenue des matériels du poste.

Valeurs de la résistance de prise de terre pour la protection du poste contre les surtensions atmosphériques provenant du réseau d'alimentation HT:

Généralement, la protection est assurée en choisissant des valeurs convenables de la résistance de la prise de terre des masses du poste afin d'éliminer les amorçages en retour avec la

BT .Sinon l'utilisation des parafoudres devient nécessaire.

1) Choix de la résistance de la prise de terre des masses du poste: Ce choix est effectué suivant que les masses du poste sont connectées ou non au neutre de la BT:

a) Masses du poste et neutre reliés: Il ne faut pas que le courant de défaut passant à travers la résistance de la prise de terre du poste engendre une surtension supérieure à la tension de tenue aux ondes de choc du matériel BT de l'installation.

Ceci se traduit par:

$$3 R_p \frac{2 U_c}{3 R_p + Z_0} \leq U_{tbc} \quad \text{d'où:}$$
$$R_p \leq Z_0 / 3 \left(\frac{2 U_c}{U_{tbc}} - 1 \right)$$

avec:

Z_0 : impédance d'onde homopolaire du réseau HT

U_c : Valeur de crête de la tension de choc

U_{tbc} : tension de tenue aux ondes de choc du matériel BT de l'installation

b) Masses du poste et neutre non interconnectés: Il ne faut pas que le courant de défaut passant à travers la résistance R_p engendre une surtension supérieure à la tension de tenue aux ondes de choc du matériel BT du poste:

$$R_p \leq Z_0 / 3 \left(\frac{2 U_c}{U_{tpc}} - 1 \right)$$

avec U_{tpc} : tension de tenue aux ondes de choc du matériel BT du poste.

En général, on prend $Z_0 = 1000$ Ohms ; le niveau de surtensions transmises par les lignes aériennes ne dépasse pas généralement 120kV valeur de crête, d'où pour le cas a) on a pratiquement $R_p \leq 4$ Ohms et pour le cas b) $R_p \leq 30$ Ohms si on a double isolation

CHAPITRE IV

MISE A LA TERRE CONTRE LES EFFETS DE LA Foudre

I-Généralités:

La foudre présente un danger permanent sur les lignes électriques aériennes et les installations électriques. Son mode d'action sur les lignes peut être:

- Soit par un coup de foudre direct.
- Soit par un coup de foudre indirect.

a) Coup de foudre direct: C'est le cas où la décharge de foudre atteint les conducteurs actifs directement. L'onde de choc se propage le long de la ligne et atteint par la suite les appareils alimentés par cette ligne. Pour réduire ses effets néfastes, on installe des parafoudres qui absorbent cette onde avant qu'elle n'atteigne ces appareils, ou bien, on emploie des fils de garde qui reçoivent la décharge évitant ainsi les coups de foudre directs.

b) Coup de foudre indirect: C'est le cas où la décharge atteint les câbles de garde ou les supports des lignes aériennes; pour cela, ils doivent être reliés à la terre afin de permettre l'écoulement du courant de foudre à la terre.

II-Mise à la terre des supports des lignes aériennes:

Lorsque la foudre atteint directement un câble de garde ou un support métallique, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques. La tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateurs dépend alors de la résistance aux ondes de choc de la prise de terre, de l'inductance L du pylône et de la forme du courant de foudre. Si $k_i(t)$ est la fraction du courant s'écoulant par un pylône, la tension aux bornes de la chaîne d'isolateurs sera:

$$U(t) = k (R_{dt} i(t) + L \frac{di(t)}{dt})$$

Lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage de l'isolement de la ligne ,il se produit un amorçage en retour. Donc, les prises de terre des supports doivent être exécutées avec de grandes précautions afin d'éviter ces amorçages . Généralement, il n'y a pas à craindre ces amorçages si la condition suivante est satisfaite: $U(t) \leq U_{dt}$

où U_{dt} : tension de tenue aux ondes de choc de l'isolement

III-Mise à la terre des parafoudres:

Les parafoudres sont des appareils électriques destinés à protéger le matériel électrique en limitant les surtensions transitoires élevées imposées à ce matériel par les coups de foudre. Le type le plus répandu des parafoudres est celui à résistance variable . Il se compose de :Un éclateur , une résistance variable et un boitier . La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne et sa partie inférieure est reliée à la terre . Le but du parafoudre se résume donc en ceci:

- Limiter la surtension pendant la décharge de foudre en présentant la plus petite résistance possible , et par la suite de couper le courant de suite en présentant la résistance maximale.

La tension maximale U_{max} aux bornes du parafoudre en fonction du courant maximal I_{max} pour une telle résistance variable est représenté dans la figure ci dessous:



Avec une bonne approximation, elle peut être exprimée par la formule :

$$U_{\max} = K \cdot I_{\max}^a$$

dans laquelle K et a sont des constantes ($a \approx 0,2$).

Les performances d'un parafoudre à résistance variable sont considérées selon leur :

-Pouvoir de décharge nominal ,c'est à dire le plus grand courant de décharge qu'il supporte en abaissant convenablement la surtension au niveau prescrit,

-Courant de suite qui est le courant fourni par le réseau et, qui reste dans le parafoudre après le passage du courant de décharge .

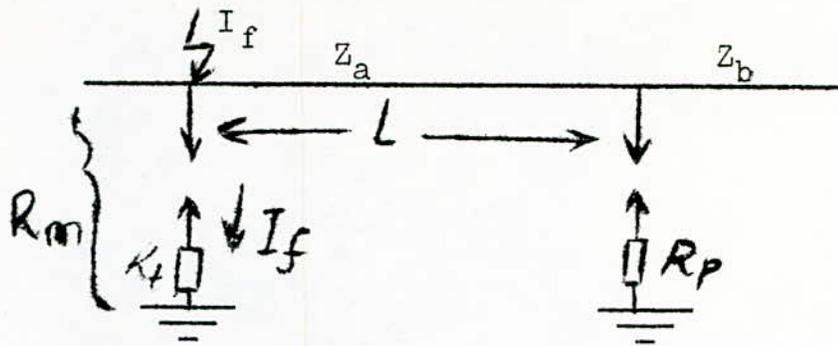
-La tension d'extinction qui est la tension de désamorçage c'est à dire la plus grande valeur de la tension de service pour laquelle un parafoudre interrompt son courant de suite.

-La tension résiduelle qui est la tension maximale qui peut apparaître aux bornes du parafoudre lors de la décharge.

Pour les surtensions courantes ,on trouve le pouvoir de décharge nominal de 1,5 à 25 kA.

Notons que la surtension admissible dans les installations basse tension est de 3kV.

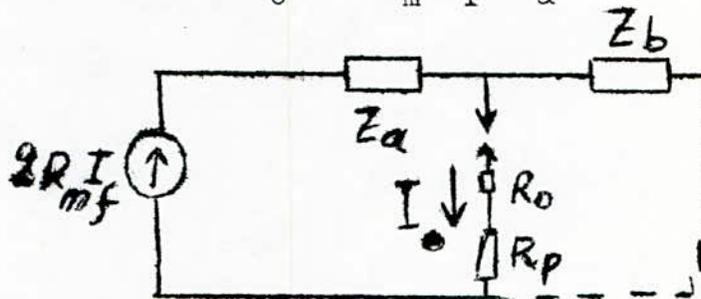
Le mécanisme de fonctionnement d'un parafoudre installé dans une ligne est le suivant:Admettons qu'un coup de foudre atteint la ligne (voir fig. en dessous)dans un endroit éloigné de l du parafoudre.Elle provoque normalement une décharge sur la chaîne d'isolateurs du pylône le plus proche. Appelons Z_a l'impédance d'onde de la ligne d'arrivée du parafoudre et Z_b l'impédance d'onde d'une autre ligne de sortie dans la station protégée par ce parafoudre. Tout d'abord le courant de décharge I_f provoque une



onde de surtension de valeur $U_f = R_m \cdot I_f$

R_m étant à peu près égale à la résistance de terre du pylône R_t

Sur le schéma équivalent de la figure en dessous la tension $2U_f$ agit sur les impédances d'onde qui limitent le courant I_0 dans le parafoudre à $I_0 \approx 2 R_m I_f / Z_a$



Par la suite, l'impédance d'onde Z_a est remplacée par l'inductance de la ligne $L = L_0 \cdot l$. La constante de temps τ du circuit s'exprime par :

$$\tau = \frac{L}{R_t + R_p + R_0}$$

Pour les grandes valeurs de τ on peut obtenir alors que le courant de la décharge peut s'éteindre plus vite que le courant dans le parafoudre. Le raisonnement présenté ici met en évidence le rôle présenté par les résistances des prises de terre /

La bonne mise à la terre de la ligne diminue la surtension provoquée par l'onde de choc. Une valeur trop faible de la résistance de mise à la terre du parafoudre R_p contribue beaucoup à l'extinction du courant I_0 puisque est inversement proportionnelle à cette résistance.

CHAPITRE V

LES PRISES DE TERRE

La mise à la terre de toute partie électrique consiste à établir une liaison électrique entre cette partie et la masse terrestre. Cette liaison est composée des conducteurs de protection et de terre et de la terre proprement dite.

Les prises de terre peuvent être constituées par:

-Des câbles, piquets, tubes, rubans, grillages, plaques ou autres conducteurs en métal enfoncés dans le sol de telle à résister à l'action du terrain.

-Un réseau étendu des conduites métalliques enterrées si sa continuité est parfaitement assurée.

-Le plomb des câbles d'un réseau de canalisations électriques enterrées de première catégorie si la continuité de la gaine de plomb est parfaitement assurée.

Les canalisations de gaz, de chauffage central et les conduites de vidange, de fumée ou d'ordures ménagères ne peuvent être utilisées comme prises de terre.

1-Résistance d'une prise de terre:

La résistance d'une prise de terre est la grandeur essentielle caractérisant cette prise. Elle dépend de plusieurs facteurs qui sont: lieu d'implantation, profondeur, forme, nature du terrain... La résistivité qui est liée directement à la nature du terrain et aux conditions climatiques est la grandeur la plus déterminante de la résistance: c'est la résistance en Ohms d'un cylindre de terrain de 1 m^2 de section et de 1 m de longueur. Puisque cette résistivité dépend des conditions climatiques (humidité et température), elle est extrêmement variable. Pour

cela, on doit la corriger : On peut se servir de la formule :

$$\rho = K \cdot \rho_M \text{ où}$$

ρ résistivité corrigée.

ρ_M résistivité moyenne estimée.

K: Coefficient de correction. (Voir tableau II).

Le tableau III donne les valeurs de la résistivité suivant la nature du terrain.

2-Ecoulement du courant et ses effets à travers une prise de

terre: L'écoulement du courant dans une prise de terre dépend de la nature du sol. Si ce dernier est homogène c'est à dire présentant la même résistivité dans chacun de ses points, alors le courant se propagera de la même façon dans toutes les directions. Donc tous les points situés à une même distance du centre de l'électrode de prise de terre seront au même potentiel; ils forment alors une surface équipotentielle. A partir de cette première surface, le courant se diffusera de la même manière pour former d'autres surfaces dont la superficie augmente en fonction de la distance au centre de l'électrode. L'apparition des surfaces équipotentielles fait introduire la notion de tension de pas. Si une personne touche le sol en deux points différents, un pied sera porté à un potentiel V_1 , l'autre pied sera porté à un autre potentiel V_2 , V_1 et V_2 appartiennent à deux surfaces équipotentielles différentes: Cette personne sera soumise à la tension ($V_1 - V_2$) qui peut être dangereuse.

3-Calcul des résistances de prise de terre:

Puisque le choix des dispositifs de protection est basé sur la valeur de la résistance de la prise de terre, son calcul devient nécessaire. Ce calcul se fera sur un cas particulier: c'est

TABLEAU II

Valeurs du coefficient de correction de la
résistivité du sol K

Nature du sol	Profondeur en m	Degré d'humidité		
		Elevé	moyen	faible
Sol argileux	0,5 à 0,8	3	2	1,5
Sol argileux	0,8 à 3,8	2	1,5	1,4
Argile	0 à 2	2,4	1,56	1,2
Sable	0 à 2	2,4	1,36	1,2
Tourbe	0 à 2	1,4	1,1	1
Cailloutis avec du sable	0 à 2	1,5	1,3	1,2
Cailloutis avec de l'argile	0 à 2	1,8	1,2	1,1

TABLEAU III

Résistivité de différents terrains

Nature du terrain	Résistivité en .m	Valeur moyenne en .m
Terrain marécageux	1 à 30	
Limon	20 à 100	100
Humus	10 à 150	
Tourbe humide	5 à 100	
Argile plastique	50	
Marnes et argiles compacts	100 à 200	100
Marnes du jurassique	30 à 80	
Sables argileux	50 à 500	300
Sables siliceux	200 à 300	
Sol pierreux nu	1500 à 3000	
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500	
Calcaire tendre	100 à 300	
Calcaire compact	1000 à 5000	500
Calcaire fissuré	500 à 1000	
Micaschistes	800	
Schistes	50 à 300	
Granit et gres	1500 à 10000	800
Granit et gres très altérés	100 à 600	

le cas d'une electrode de prise hémisphérique à la surface d'un sol homogène. Les filets de courant s'écoulent radialement dans toutes les directions de la même manière. Les surfaces équipotentiellles sont des demi-sphères concentriques (Voir fig. 20). La densité de courant à un point distant de x du centre de l'electrode est: $J_x = I / (2 \cdot \pi \cdot x^2)$ et le gradient de potentiel entre deux points écartés de dx est:

$$dV = -\left(\frac{I}{2 \cdot \pi \cdot x^2}\right) \cdot dx$$

On voit que J_x varie comme l'inverse du carré de la distance au centre de la prise. En integrant le gradient de potentiel de l'infini à la distance x , le potentiel étant nul à l'infini, on obtient: $V_x = \int I / (2 \cdot \pi \cdot x) \cdot dx$. On voit que V_x est inversement proportionnelle à la distance x et indépendante du rayon r de l'electrode. La représentation de $V_x = f(x)$ est donnée sur la fig. 20. La tension à laquelle l'écoulement du courant I porte l'électrode est $V_0 = \int I / (2 \cdot \pi \cdot r) \cdot dx$. La résistance qui s'oppose à l'écoulement du courant depuis la surface de l'électrode jusqu'à l'infini est $R = \int I / (2 \cdot \pi \cdot r) \cdot dx$.

Pour d'autres formes de prises de terre, la méthode est la même. Le tableau IV donne les formules de résistance pour les formes usuelles en prenant en considération que la résistivité du sol constante.

4-Couplage entre prises de terre voisines:

On a vu que le gradient de potentiel autour d'une prise de terre varie comme l'inverse du carré de la distance du point considéré au centre de l'électrode. On peut conclure qu'au delà d'une certaine distance, il n'existera pratiquement aucune différence de potentiel entre deux surfaces équipotentiellles successives.

sives lorsque la prise écoulera un courant. Cette distance nous définira la terre lointaine ou potentiel zéro. Théoriquement, ce potentiel zéro est atteint à l'infini mais en pratique quelques dizaines de mètres suffisent pour avoir cette terre lointaine.

Si on implante une autre prise de terre, à l'intérieur du domaine où le potentiel de la première prise n'est pas nul, elle sera portée à un potentiel non nul dû à la première prise. On dit alors qu'il y'a interpénétration des équipotentiellles des deux prises.

Pour savoir à quel potentiel sera portée une prise se trouvant à proximité d'une autre lorsque cette dernière sera parcourue par un courant ou quelle résistance globale permettra d'obtenir la mise en parallèle des prises de terre distinctes, on est amené à définir un facteur de couplage entre ces deux prises.

Le facteur de couplage entre un point X et une prise Y est la fraction de la tension de la prise Y à laquelle l'écoulement du courant I_y par cette prise a pour effet de porter le point X.

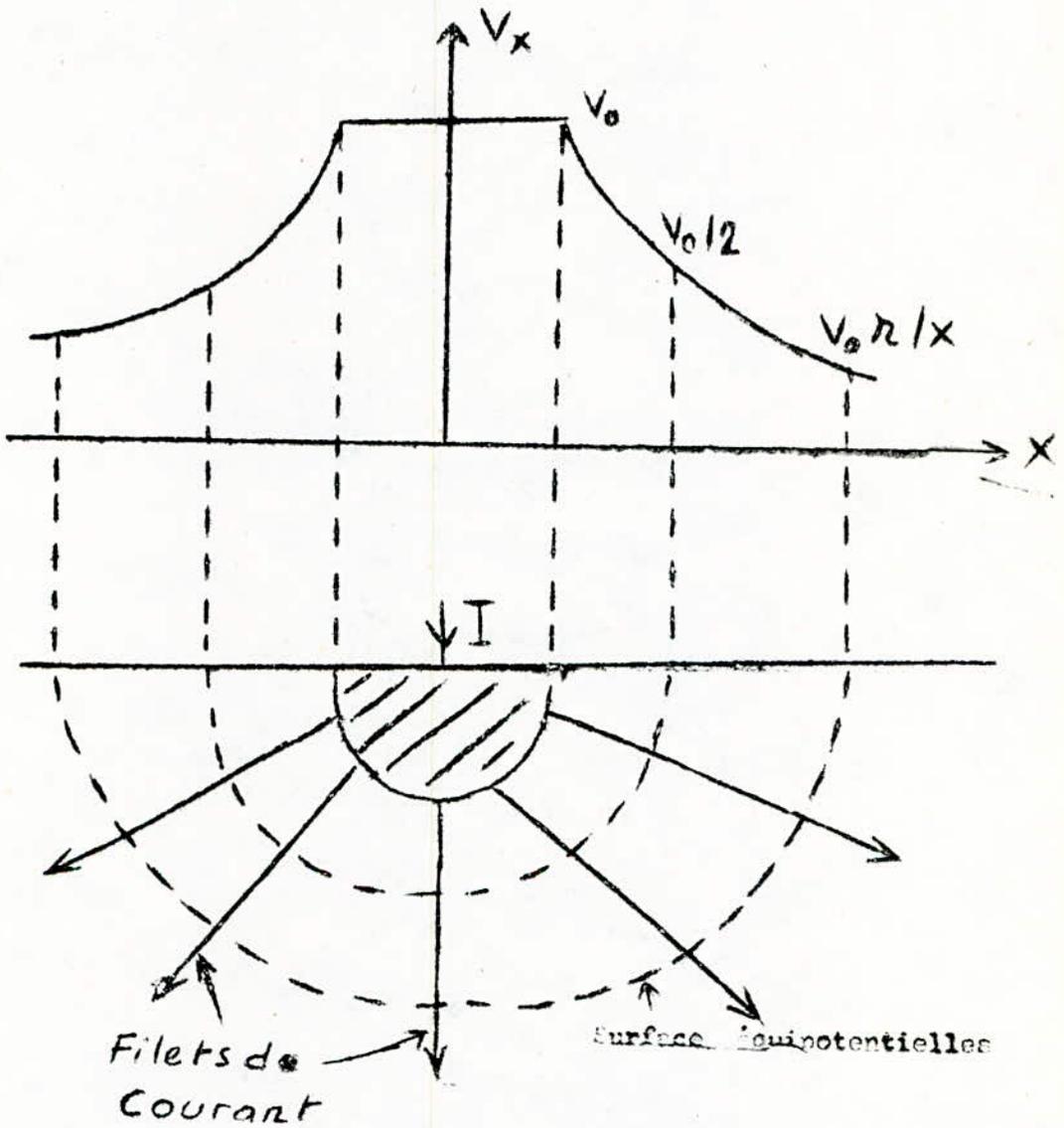
Cele se traduit par la relation:

$K_{x(y)} = U_{x(y)} / U_y = U_{x(y)} / R_y \cdot I_y$ L'indice entre parenthèses indique la prise de terre qui écoule du courant. $K_{x(y)}$ est le facteur de couplage entre X et Y. En revanche, si une prise de terre est implantée au point X, on peut de la même façon définir un facteur de couplage entre le point Y et la prise X lorsque celle-ci ecoule du courant.

$$K_{y(x)} = U_{y(x)} / U_x = U_{y(x)} / R_x \cdot I_x$$

Puisqu'il y'a interpénétration entre les surfaces équipotentiellles de X et Y on peut dire qu'ils ont une résistance commune soit cette résistance R_0 . Donc, la fraction de potentiel que prend le point X lorsque Y est parcourue par un courant est:

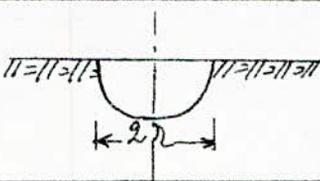
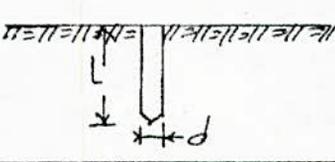
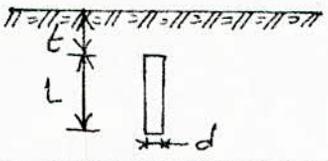
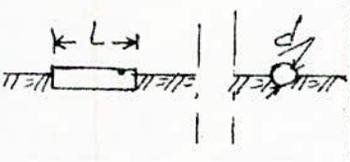
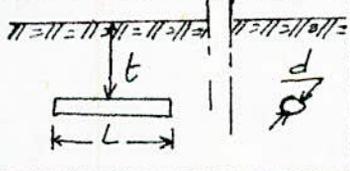
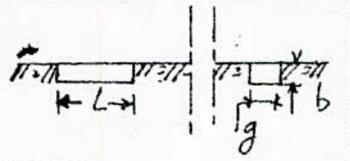
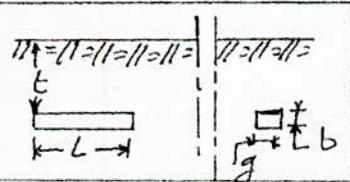
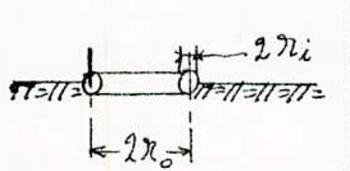
Fig. 20



Répartition de potentiel autour d'une electrode
hémisphérique à la surface d'un sol homogène.

TABLEAU IV

Formules des Résistances des prises de terre.

Type de la prise de terre	Forme des prises de terre	Formule de la résistance
Demi-sphère en surface		$R = \frac{\rho}{2\pi r}$
Tube vertical en surface		$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \frac{4L}{d}$ avec $L \gg d$.
Tube vertical enfoncé		$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \left(\frac{2L}{d} \sqrt{\frac{4t+3L}{4t+L}} \right)$ avec $L \gg d$ et $2t > L$.
Tube horizontal en surface		$R = 0,732 \frac{\rho}{L} \log \frac{2L}{d}$ avec: $L \gg d$
Tube horizontal enfoncé		$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \frac{L^2}{d \cdot t}$ avec: $t \gg d$ et $L \gg 2t$
Ruban en surface		$R = 0,732 \frac{\rho}{L} \log \frac{2L}{b}$ avec: $L \gg b$ et $b \gg g$
Ruban enfoncé		$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \frac{2L^2}{6t}$ avec: $t \gg b \gg g$ et $L \gg 2t$
Anneau en surface		$R = 0,732 \frac{\rho}{2\pi r_0} \log \frac{8r_0}{r_i}$ avec: $r_0 \gg r_i$

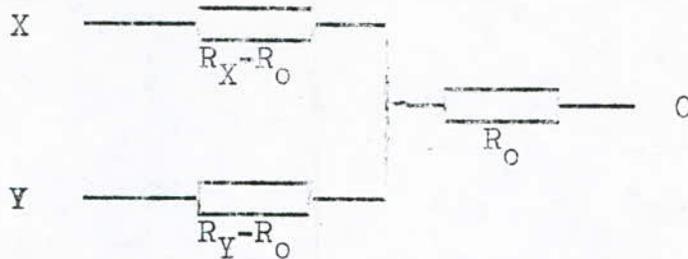
Suite du tableau IV

<p>Anneau enfoncé</p>		$R = 0,366 \frac{\rho}{2\pi r_0} \log \frac{128 r_0^2}{b \cdot t}$ <p>avec: $2t \gg b/2$ et $r_0 \gg t$</p>
<p>Plaque en surface</p>		$R = 8/2D$
<p>Plaque enfoncée verticalement</p>		$R = \frac{\rho}{8\sqrt{S/2\pi}} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{S/2\pi}}{\sqrt{4t^2 + \frac{S}{2\pi}}} \right) \right]$ <p>avec: $t > \sqrt{S/2\pi}$</p>
<p>Forme étoile à 3 rayons symétriques</p>		$R = 0,122 \frac{\rho}{L} \log \frac{21,3 L}{t \cdot d_i}$ <p>avec: $L \gg t$ et $t \gg d_i$</p>
<p>Forme L rectangulaire</p>		$R = 0,188 \frac{\rho}{l} \log \frac{5,85 L}{t \cdot d_i}$
<p>Forme étoile à 4 rayons symétriques</p>		$R = 0,092 \frac{\rho}{L} \log \frac{135 L^2}{t \cdot d_i}$ <p>avec: $L \gg t \gg d_i$</p>
<p>Griillage divisé en "n" et "m" conducteurs rectangulaires</p>		$R = \frac{\pi \rho}{4(L_1 + L_2)} + \frac{\rho}{mL_1 + nL_2}$ <p>avec $t \leq \sqrt{S/\pi}$ $S =$ Surface du griillage.</p>

avec ρ : résistivité du terrain supposé homogène

$$K_{x(y)} = R_0/R_Y \quad \text{de même} \quad K_{y(x)} = R_0/R_X$$

On peut représenter les 3 résistances en étoile:



5-Mise en parallèle des prises de terre:

Si on met en parallèle deux prises de terre non couplées X et Y, alors la résistance équivalente sera:

$$R_{nc} = R_X \cdot R_Y / (R_X + R_Y)$$

Si par contre, les deux prises étaient couplées alors la résistance équivalente sera:

$$R_c = R_0 + \frac{(R_X - R_0) \cdot (R_Y - R_0)}{R_X + R_Y - 2 \cdot R_0}$$

faisons le rapport R_c/R_{nc}

$$R_c/R_{nc} = \frac{1 - R_0^2 / (R_X \cdot R_Y)}{1 - 2 \cdot R_0 / (R_X + R_Y)}$$

Ce rapport est supérieur à 1.

Prenons un exemple de 2 prises hémisphériques dont les rayons sont r_1 et r_2 et dont les centres sont distants de D se trouvant dans un sol homogène de résistivité ρ

S'ils étaient couplés, alors on aura: avec $r_1 = r_2 = r$.

$$R_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot (1 + r/D)$$

Si les deux résistances étaient éloignées c.a.d pas de couplage entre elles, alors on aura:

$$R_{nc} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \text{donc: } R_c/R_{nc} = 1 + r/D > 1$$

On voit que $R_c > R_{nc}$. Ceci revient au fait suivant:

Les filets de courant écoulés par chaque prise de terre individuelle occupent une part du terrain et restreignent d'autant le domaine où peuvent s'épanouir ceux qui émanent des autres électrodes, d'où une augmentation des résistances de chaque prise de terre et de leur ensemble en parallèle par rapport aux cas où les prises de terre individuelles ne présenteraient pas de couplage appréciable entre elles.

Pour 3 prises hémisphériques, on trouve de la même façon et au cas où $r_1=r_2=r_3=r$ la résistance globale:

$$R_c/R_{nc}=1+2.r/D$$

Il arrive un certain stade où le terrain sera saturé et l'emplacement d'une prise supplémentaire n'influera plus.

6-Conducteurs de protection:

Le conducteur de protection est destiné à relier les masses soit entre elles soit à une prise de terre soit à des éléments conducteurs. Le conducteur de protection est appelé conducteur de terre s'il relie les masses à la terre. Il doit être isolé de la même façon que les autres conducteurs s'il fait partie de leur canalisation. ON ne peut relier au conducteur de protection que les masses. Le tableau V présente une liste des masses. Le tableau VI présente la liste des éléments à ne pas relier au conducteur de protection. Les éléments d'une charpente métallique ne peuvent être considérés comme conducteur de protection que si leur continuité électrique est assurée, et que leur conductibilité est au moins égale à celle des conducteurs de protection ainsi qu'ils doivent avoir une bonne liaison électrique avec la terre. Aucun appareil tel un interrupteur ne doit être intercalé sur les conducteurs de protection et ceci pour assurer leur con-

TABLEAU V

Eléments à relier aux conducteurs de protection

L I S T E D E S M A S S E S	CARACTERISTIQUES
<p><u>1-CANALISATIONS:</u></p> <ul style="list-style-type: none">-Conduits M ou F-Cables cuirassés (500VEZ,500VOZ)-Cables isolés au papier imprégné sous plomb nu ou sous plomb armé sans autre revêtement.-Conducteurs blindés à isolant minéral. <p><u>2-APPAREILLAGE:</u></p> <ul style="list-style-type: none">-Toutes les parties métalliques extérieures (sauf les rivets, vis,...). <p><u>3-APPAREILLAGE D'UTILISATION:</u></p> <ul style="list-style-type: none">-Parties métalliques extérieures des appareils de classe 0-01-10 <p><u>4-ELEMENTS NON ELECTRIQUES:</u></p> <ul style="list-style-type: none">-Huisseries métalliques: Si elles servent au passage de canalisations avec des conduites MRB,MSB,FRO; Si elles sont en contact d'appareils électriques; Si elles servent de support à l'appareillage électrique (interrupteurs, socles, prises,...).-Objets métalliques: à proximité de conducteurs aériens ou jeux de barres; au contact d'équipements électriques.	<p>Tout élément autre que les parties actives d'une installation répondant aux 4 conditions suivantes:</p> <ol style="list-style-type: none">1-Faire partie d'un matériel ou équipement électrique.2-Etre accessible à toute personne.3-Etre métallique.4-Pouvant être mis accidentellement sous tension.

TABLEAU VI

Eléments à ne pas relier aux conducteurs de protection

E L E M E N T S	C A R A C T E R I S T I Q U E S
<u>1-Canalisations:</u>	
<p>-Conduits I (IRO, ICO, ICD)</p> <p>-Moulure en bois ou matière isolante</p> <p>-Conducteurs et câbles comportant une gaine extérieure et dont la dernière lettre de la dénomination se termine par N ou V:</p> <p>500 V, 1000 CN, 500 VGFV</p>	Si l'une des 4 conditions situées au tableau n'est pas remplie l'élément considéré ne peut être défini comme une
<u>2-Appareillage:</u>	masse et n'a donc
<p>Les enveloppes isolantes extérieures des matériels électriques lorsqu'elles ne sont pas en contact avec un élément métallique.</p>	pas à être relié au conducteur de protection.
<u>3-Appareils d'utilisation:</u>	
<p>Tous les appareils de la classe II quelque soit leur type d'enveloppe extérieure.</p>	

continuité. Mais il faut prévoir sur ce conducteur un dispositif (une barette de coupure par ex.) qui permet la mesure de la résistance de prise de terre correspondante.

Signalons enfin que les masses à relier aux conducteurs de protection ne doivent pas être insérés en série.

Section des conducteurs de protection: Les sections des conducteurs de protection doivent être égales aux valeurs indiquées dans le tableau VII. Ces valeurs ne sont valables que si les conducteurs de protection et les conducteurs actifs sont constitués du même métal. S'il n'en était pas ainsi, les sections des conducteurs de protection sont déterminées de telle façon à présenter une conductibilité équivalente à celle qui résulte de l'application du tableau. Si le temps de fonctionnement t en cas de défaut franc du dispositif de coupure automatique n'exécède pas 2s la section peut être calculée par la formule:

$$S_{pe} = \frac{I}{k} \cdot \sqrt{t}$$

avec: I intensité du courant de défaut franc en A (efficace)

t en secondes

k échauffement en °C

S_{pe} section en mm^2

k peut prendre les valeurs suivantes: 13 pour Cu;

8,5 pour Al ; 4,5 pour Fe

Ces conducteurs doivent avoir une section au moins égale à:

- 2,5 mm^2 s'ils comportent une protection mécanique.

- 4 mm^2 s'ils ne comportent pas une protection mécanique.

Tableau V16 Section des conducteurs de protection

Section des conducteurs actifs S [mm ²]	Temps de coupure du dispositif de protection t [s]	Section minimale des conducteurs de protection S_{pe} [mm ²]		Section minimale des conducteurs de terre entre la prise de terre et la barette de coupure [mm ²]	
		avec protection mécanique	Sans protection mécanique	Cuivre	Aluminium
$S \leq 16$	Sans importance	2,5	4	28	50
$16 < S \leq 35$	Sans importance	16	16	28	50
$S > 35$	$t > 2$ formule obligatoire	$S/2$	$S/2$	$S/2$ avec minimum: 28	$S/2$ avec minimum: 50
	$t \leq 2$ formule économique	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$ avec: minimum: 28	$\frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$ avec: minimum: 50

-62-

CHAPITRE VI

MESURE DES RESISTANCES DES PRISES DE TERRE

Les règles de sécurité imposent la mesure de la valeur Ohmique des prises de terre des installations électriques.

1-Principe de mesure:

Soit à mesurer une résistance de prise de terre X. Pour cela, on fait circuler à l'aide d'un générateur approprié, un courant alternatif I constant à travers une prise auxiliaire Z dite prise d'injection courant, et le retour est assuré par la prise X. On mesure la tension V entre la prise X et une autre prise auxiliaire Y dite prise de potentiel OV. Afin d'éliminer les courants parasites, on doit mesurer la tension V après un redressement et synchronisation avec le générateur. Le quotient de la tension V par le courant constant injecté donne la résistance à mesurer. Pour rendre les appareils de mesure de terre pratiquement insensibles aux courants telluriques, on choisit des générateurs de courant dont la fréquence est différente de celle du secteur et de ses harmoniques et on bloque l'installation en installant un condensateur en série avec la prise Y (Voir fig. 4). La terre auxiliaire Z doit être toujours placée aussi loin que possible de X. La 2^{ème} terre auxiliaire Y doit être choisie de préférence à égale distance des 2 prises. Une connaissance de la résistivité des terrains concernés permettrait par l'intermédiaire de calculs complexes la détermination des distances minimales entre X, Y et Z. Le tableau VIII indique les distances minimales entre ces différentes prises.

2-Méthodes de mesure:

En général, on distingue trois méthodes qui sont:

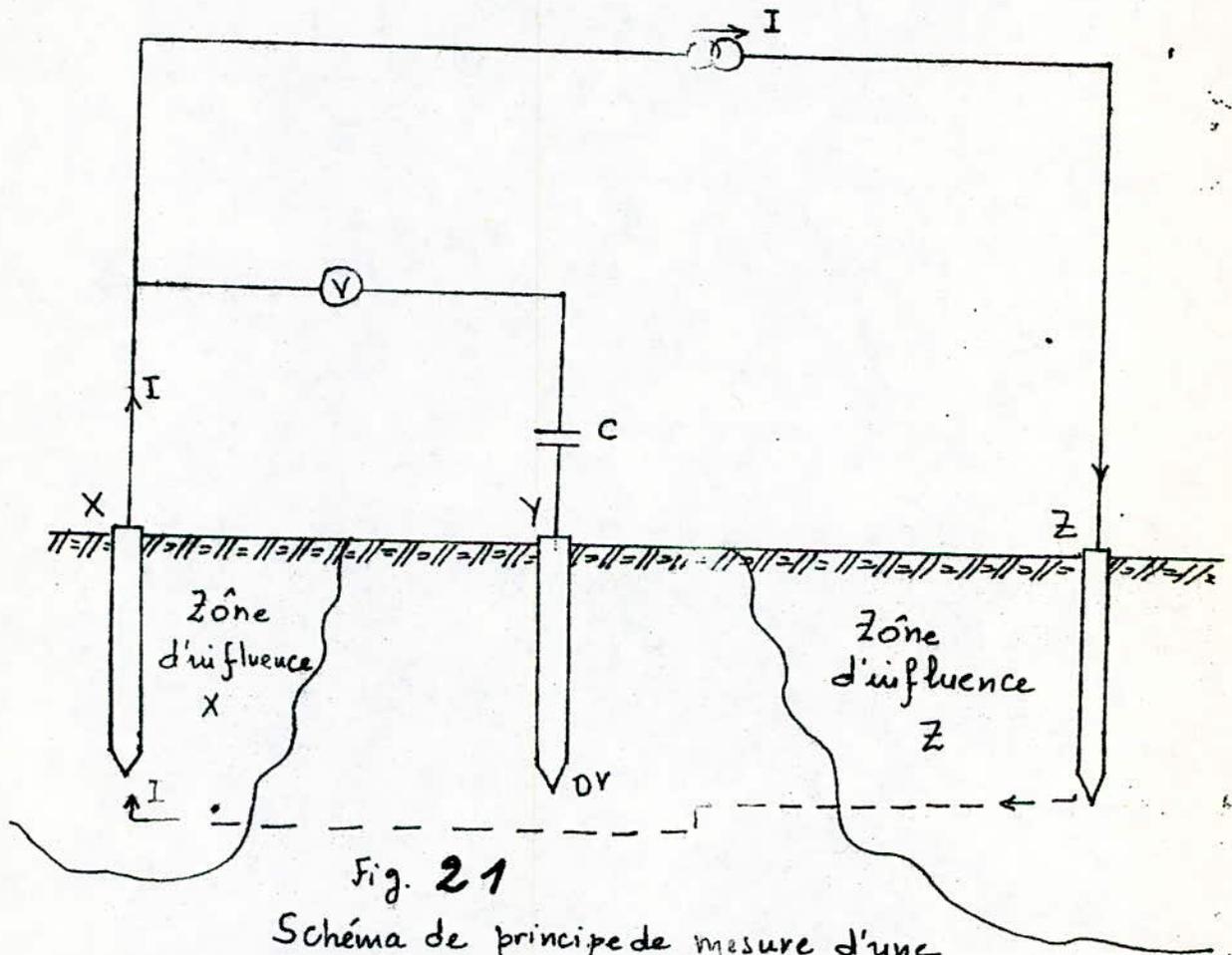


Fig. 21

Schéma de principe de mesure d'une résistance de prise de tirage X.

a) Méthode des 3 terres: Cette méthode n'est utilisée que dans des cas exceptionnels, elle exige que les prises auxiliaires aient toutes deux des résistances qui soient au plus du même ordre de grandeur que celle à mesurer.

Au moyen d'un appareil quelconque, on mesure les 3 résistances prises deux à deux en série:

$$R_{XZ} = R_X + R_Z$$

$$R_{XY} = R_X + R_Y$$

$$R_{YZ} = R_Y + R_Z$$

d'où

$$R_X = (R_{XZ} + R_{XY} - R_{YZ}) / 2$$

b) Méthode potentiométrique: (Voir fig. 22) Dans cette méthode il s'agit de comparer la résistance à mesurer R_X à une résistance connue r . Par régulation du potentiomètre, on fait varier R jusqu'à avoir $R_X \cdot I_1 = r \cdot I_2$. Ceci est vérifié quand le galvanomètre G indique zéro. Si $I_1 = I_2$, on aura $R_X = r$

Cette mesure peut être effectuée simplement à l'aide d'un appareil spécial appelé tellurhètre. Parmi les types assez variés de ce genre, nous présentons un exemple (voir fig. 23). Une magnéto Ma nous donne une f.e.m pour alimenter le transfo Tr . La mesure du courant électrique redressé mécaniquement se fait à l'aide d'un galvanomètre magnétoélectrique G . A l'aide du potentiomètre, on règle le courant à zéro et on lit la valeur de résistance correspondante.

c) Méthode de mesure en ligne dite "des 62%": Cette méthode nécessite un appareil spécial appelé contrôleur de terre.

Soit X la prise à mesurer, Y et Z deux autres prises auxiliaires. On aligne les prises X, Y et Z et on place Z à une distance

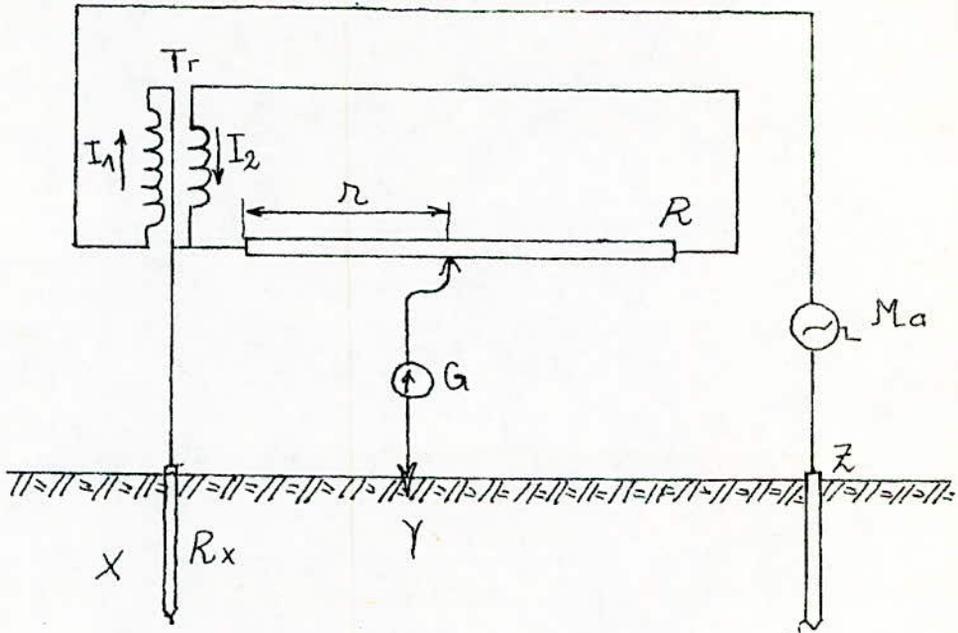


Fig. 22

Schéma de mesure de la résistance de Prise de terre R_x par la méthode Potentiométrique

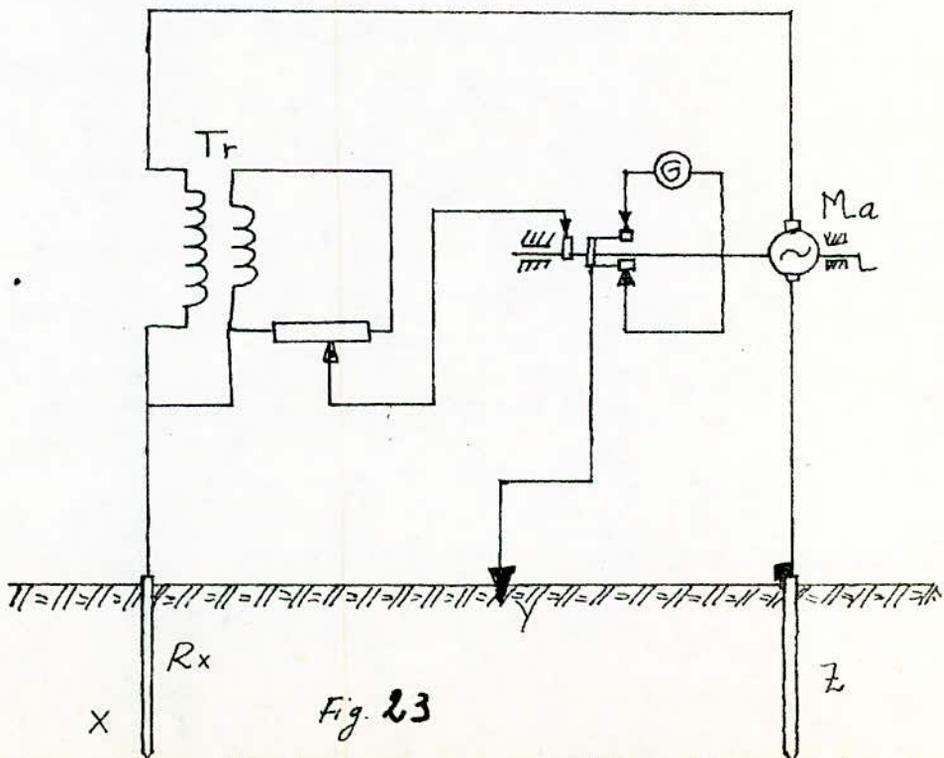


Fig. 23

Schéma de mesure de R_x à l'aide d'un appareil spécial

L de X. On place Y à 62 % de L par rapport à X, on lit la valeur de R_X soit R_{X1} . On recommence la mesure en plaçant Y à +10 % et -10 % de la distance précédente c.a.d en Y'' et Y', on note les valeurs R_{X3} et R_{X2} . Si R_{X1} , R_{X2} et R_{X3} sont proches à quelques % la mesure est correcte. Sinon, on augmente L et on refait les mêmes mesures jusqu'à avoir des résultats satisfaisants.

On a choisi 62 % de L car l'expérience montre qu'à cette distance la courbe représentant le potentiel par rapport au point Y a un point d'inflexion à tangente horizontale autour duquel la résistance ne varie que faiblement (voir fig. 24)

3-Mesure du facteur de couplage entre 2 prises de terre:

Le principe de mesure de la résistance permet de mesurer le facteur de couplage entre deux prises de terre X et Y. En connectant le voltmètre entre X et Y, cette dernière jouera le rôle de la sonde du voltmètre, on mesure la fraction de résistance R_X non commune à Y. Si l'on inverse ensuite les connexions sur X et Y, on mesure la fraction R_Y non commune à X.

La valeur R_0 commune aux deux electrodes sera donc:

$$R_0 = R_X - R_X \quad \text{ou} \quad R_0 = R_Y - R_Y \quad R_X \text{ et } R_Y: \text{résistances globales de X et Y.}$$

On aura donc:

$$K_{x(y)} = R_0 / (R_0 + R_X) \quad \text{et} \quad K_{y(x)} = R_0 / (R_0 + R_Y)$$

Le schéma de mesure est représenté sur la fig. 25

Si les 2 valeurs de R_0 sont identiques, on est assurés de l'exactitude du résultat.

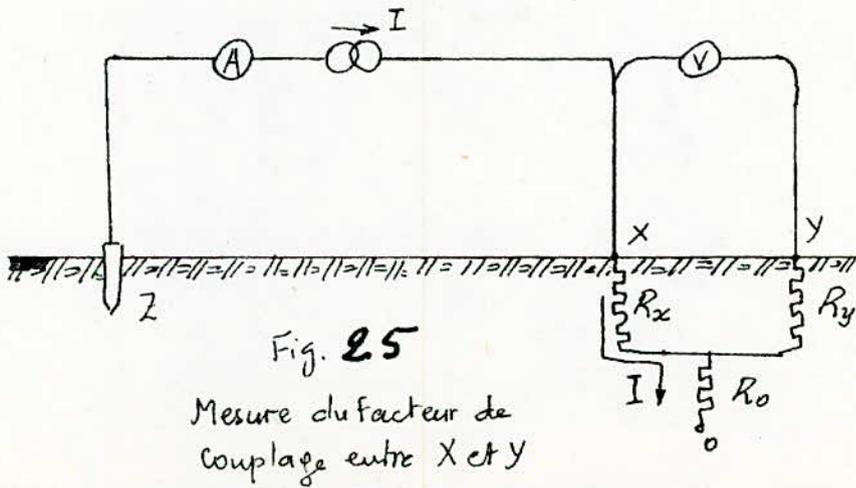
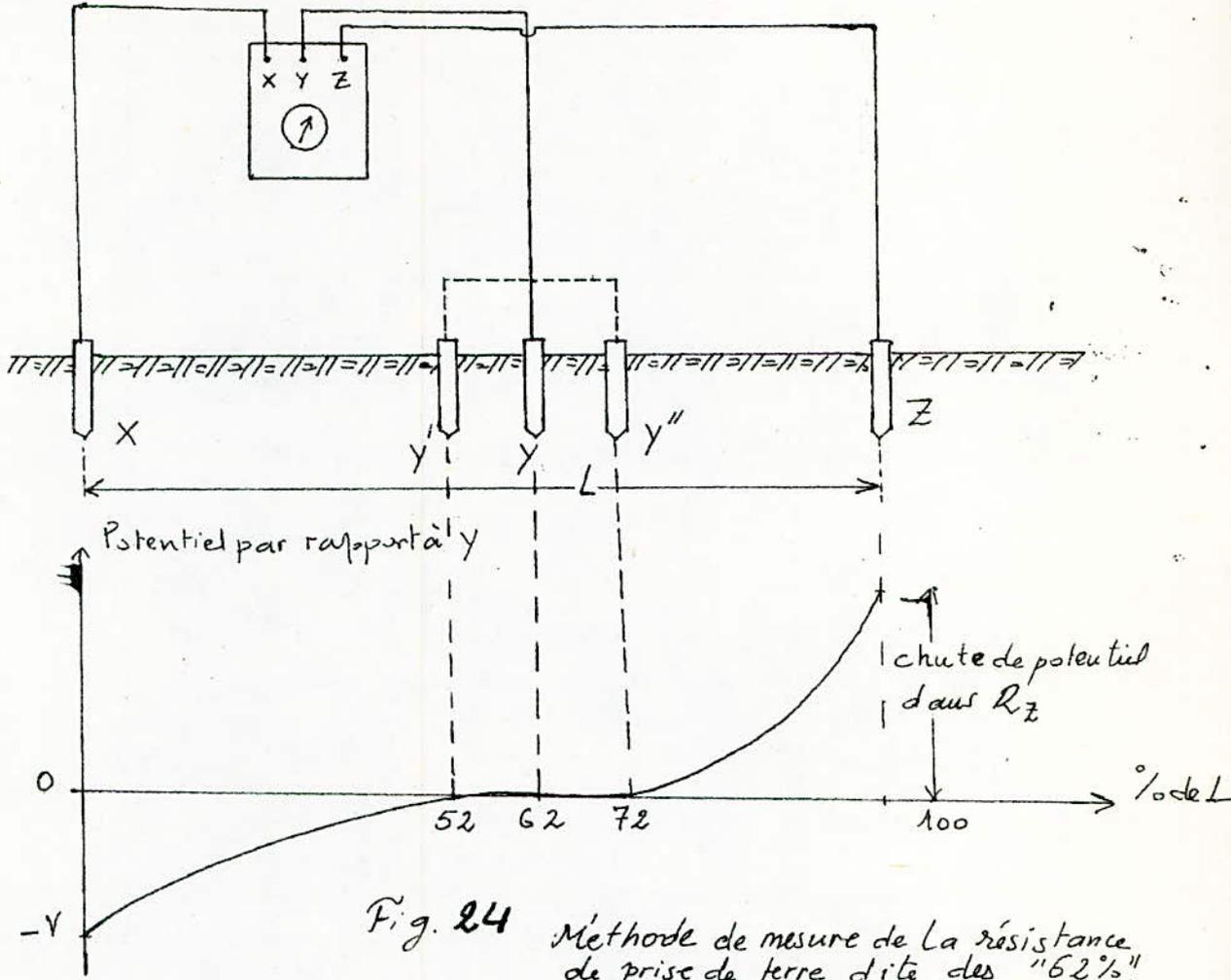


TABLEAU VIII

Distances minimales entre la prise de terre à mesurer et les prises auxiliaires

Genre de prise de terre		Distances minimales en m			Disposition des prises de terre et des piquets
Prise X (à mesurer)	prise Z (auxil.)	a	b	c	
Un piquet	Un piquet	40	20	20	
Plusieurs piquets concentrés	Un piquet	80	40	20	
Plusieurs piquets concentrés	Plusieurs piquets concentrés	80	40	40	
Plusieurs piquets englobant un grand terrain	Un piquet	5d	5d	20	
Plusieurs piquets englobant un grand terrain	Plusieurs piquets concentrés	5d	5d	40	

Nota: d:Distance maximale entre les piquets d'une prise de terre à mesurer

CONCLUSION

Par cette étude ,on vient de tirer certaines conclusions qui seront utiles pour l'établissement d'un projet de mise à la terre à savoir:

a) Dans les installations basse tension ,chacun des 3 schémas TT,TN,et IT assure le même niveau de sécurité pourvu que toutes les conditions imposées soient intégralement respectées . A première vue,on peut dire que le schéma TN présente de sérieux avantages surtout du point de vue économique car il permet notamment dans le schéma TN-A :

-De réduire d'une unité le nombre de pôles de l'appareillage de commande et de protection.

-D'économiser un conducteur de protection .

-D'éviter l'emploi de dispositifs de protection complémentaires tels que les dispositifs différentiels .

En opposition ,il présente des inconvénients qui se résument par :

-Interruption de l'exploitation au premier défaut .

-Exigence concernant la mise à la terre du conducteur de protection .

-Nécessité souvent de réaliser les connections équipotentielles .

On peut choisir le schéma IT parce qu'il assure la continuité de l'exploitation (pas de coupure au premier défaut) mais là aussi les exigences compatibles avec l'absence de coupure au premier défaut sont lourdes :

-Ces installations nécessitent la présence d'un service d'entretien qualifié procédant à la recherche et à l'élimination du défaut dès son apparition .

-Limitation de l'étendue de l'installation pour réduire le courant de 1^{er} défaut etc...

En fait,le choix du schéma convenable nécessite une étude approfondie des conditions d'alimentation et d'exploitation de l'installation .

b) Dans les réseaux haute tension ,il n'y a aucune méthode de mise à la terre qui répond à tous les critères .

.../...

En fait, la mise à la terre directe du neutre revient, du point de vue économique, la moins chère mais un défaut à la terre dans ce type de réseau produit un fort courant qui peut provoquer des dégâts, on peut penser à amortir ce courant par l'insertion d'une résistance entre le neutre et la terre mais l'amortissement de ce courant sera suivi d'un déplacement du point neutre et une perte de puissance dans la résistance. L'exploitant peut choisir le neutre isolé ou impédant pour assurer la continuité de l'exploitation, mais cela nécessite un personnel qualifié pour l'élimination du défaut, en plus les surtensions qui apparaissent lors d'un défaut à la terre nécessitent une isolation supplémentaire. On peut penser à installer une bobine ou un transfo mais ça revient du point de vue économique la plus coûteuse.

c) Dans les postes de transformation, il faut assurer deux protections simultanées: Protection des personnes et du matériel électrique contre les surtensions, ce qui nécessite des valeurs bien précises des résistances des prises de terre des masses du poste. L'installation des parafoudres, des éclateurs et mise à la terre des supports des lignes aériennes est indispensable lorsque l'impédance des prises de terre des masses du poste ne permet pas d'éviter des amorçages en retour.

BIBLIOGRAPHIE

- 1-CI.REMOND "Les installations électriques dans le
batiment" Eyrolles -Paris 1977
- 2-Norme NF C15-100
- 3-Norme NF C13-100
- 4-Norme NF C13-200
- 5-A.MAUDUIT "Installations électriques à haute et basse
tension" T.1 Dunod-Paris 1959
- 6- " " " " T.2
- 7-LAURENT (P.G) "Guide sur le calcul ,l'exécution et la
mesure des prises de terre "
R.G.E. Juillet-Août-Sep. 1972
- 8-Techniques de l'ingénieur
D 4 II "Réseaux - Appareillage" D670
- 9-Documentation CATU-PARIS
Fascicule E1 - Septembre 1975
- 10-Cours de M W.MICHALAK (Module FEN 220)
- 11-Polycopié de M J.GOTTFRIED (Les mises à la terre)
- 12-Cours de M BOUBEKEUR (Module FEN 224)

