

REPUBLIQUE DU SENEGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

**PROJET
DE
FIN D'ÉTUDES**

Gm. 0360

NOM

Titre Prise de terre et sécurité en installations
électriques basse tension

Auteur Ousmane NDiaye

Génie Mécanique

Date JUIN 1984

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

Gm. 0360

PROJET
DE FIN D'ETUDES

Auteur: Gusmane NDIAYE

Directeur du projet: Roger MARTIN

Titre: PRISES DE TERRE ET SECURITE
EN INSTALLATION ELECTRIQUE B.T.



Génie Mécanique

1983 - 1984

REMERCIEMENTS

Je ne saurais débuter la rédaction de ce document sans remercier, en particulier, mon Directeur de projet, M^r R. MARTIN, professeur à l'E.P.T., pour les orientations données à ce document et pour les multiples corrections apportées au texte initial; M^r F. NAPOLI, Directeur de FORCELEC S.A., pour la réalisation des conditions m'ayant permis de procéder à des mesures de prises de terre à Dakar; M^r G. BOULET, technicien à l'E.P.T., pour la réalisation d'un piquet de mesure de prises de terre; et tous ceux dont la participation a été d'un apport positif.



École Polytechnique
de Thiès

SOMMAIRE.

Ce projet de fin d'études est une recherche bibliographique sur la sécurité en installation électrique basse tension et en particulier sur les pièces de base.

Il s'agit de réaliser une synthèse sur le sujet à partir de documents relatifs à la question. Il a été ainsi consulté un certain nombre de volumes et d'articles mentionnés dans la bibliographie. Les règles de la norme française NF C 15-100 ont été largement utilisées et la plupart des chiffres et tableaux en sont issus.

L'étude de toute cette littérature a abouti au présent document.

	Page.
1-4-2 Protection par isolation des parties actives.	16
1-4-3 Protection au moyen d'obstacles.	17
1-4-4 Protection par éloignement.	18
1-4-5 Protection par dispositif à courant différentiel-résiduel.	18
1-5 Protection contre les contacts indirects.	18
1.5-1 Les mesures A.	19
1.5-2 Les mesures B.	20
2- Les régimes de neutre.	27
2-1 Schéma TT.	28
2-2 Schéma TN.	30
2-3 Schéma IT.	35
3- Dispositifs de protection et condition de limitation du potentiel des masses.	39
3-1 Dispositifs de protection contre les chocs électriques.	39
3-1-1 Dispositifs à maximum de courant.	39
3-1-2 Dispositifs à courant différentiel-résiduel.	40
3-1-3 Contrôleurs permanents d'isolement.	41
3-2 La condition de limitation du potentiel des masses.	43
4- Calcul et réalisation des prises de terre.	46

	Page
4.1 Nature et constitution des prises de terre.	46
4.1.1 Prises de terre spécialement établies.	47
4.1.1.1 Conducteurs enfouis horizontalement.	48
4.1.1.2 Plaques minces enterrées.	49
4.1.1.3 Piquets verticaux.	49
4.1.2 Prises de terre de fait.	50
4.1.2.1 Conduites de distribution publique d'eau.	51
4.1.2.2 Conduites métalliques privées.	51
4.1.2.3 Piliers métalliques enterrés.	51
4.2 Calcul des résistances de prises de terre.	52
4.2.1 Résistivité du terrain.	52
4.2.2 Calcul des résistances.	53
4.2.3 Prises de terre du Poste et du Neutre.	56
4.2.3.1 Prise de terre du poste R_p .	56
4.2.3.2 Prise de terre du neutre R_n .	57
4.2.3.3 Interconnexion des Terres.	58
4.3 Conducteurs de protection.	58
4.3.1 Prescriptions générales.	58
4.3.2 Conducteurs et borne principale de terre.	60
4.4 Eléments à relier à la prise de terre.	62

TABLE DES MATIERES

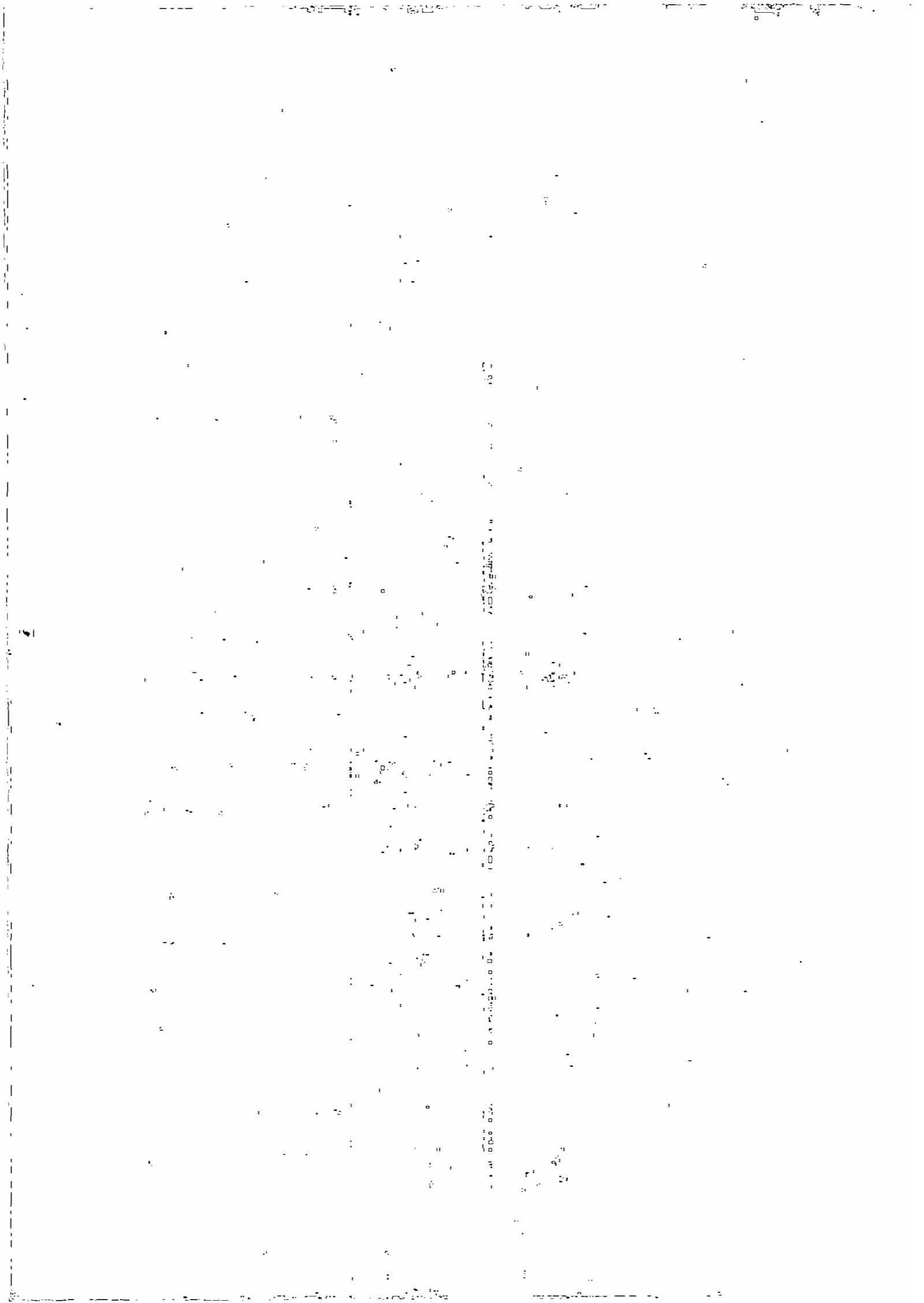
	Page
Introduction.	0
1. Principes de sécurité.	1
1.1 Effets physiologiques du courant électrique.	1
1.2 Contacts directs et indirects.	3
1.2.1 Contact direct.	3
1.2.2 Circonstances dans lesquelles il y a lieu de prendre des mesures de protection contre les contacts directs.	4
1.2.3 Contact indirect.	5
1.2.4 Circonstances dans lesquelles il y a lieu de prendre des mesures de protection contre les contacts indirects.	6
1.3 Isolation et classes de protection contre les chocs électriques.	9
1.3.1 Isolation fonctionnelle.	10
1.3.2 Défaut d'isolement.	11
1.3.3 Isolation supplémentaire.	12
1.3.4 Les classes de matériel.	13
1.4 Protection contre les contacts directs.	14
1.4.1 Protection par très basse tension de sécurité.	15

	Page
4-5 Réalisation des prises de terre.	62
4-5-1 Choix de la prise de terre.	62
4-5-2 Conditions à remplir.	64
4-5-3 Mise à la terre des appareils amovibles.	64
5. Mesure et entretien des prises de terre.	67
5-1 Mesure des prises de terre.	67
5-1-1 Mesure de l'isolement.	67
5-1-2 Mesure de la résistance du terrain.	71
5-1-3 Mesure de la résistance des sols.	73
5-1-4 Mesure de l'impédance de la boucle de défaut.	76
5-2 Entretien des prises de terre.	81
Conclusion.	83
Discussion et recommandations.	84
Appendice 1. Détermination de la résistivité des sols latéritiques.	86
Appendice 2. Termes relatifs aux mises à la terre.	92
Bibliographie.	99

INTRODUCTION

L'énergie électrique représente un composant fondamental et essentiel dans tous les domaines d'activité de l'homme moderne. Celui-ci, conscient des dangers liés à l'utilisation de l'électricité, sans être réellement informé, n'en est pas moins la victime tous les ans. En effet, le nombre d'électrocutions croît d'année en année et en 1978 il a été dénombré en France près de 200 morts, 4000 incendies, 2 à 3000 divers chocs électriques, tous accidents d'origine électrique.

Le présent document se propose de faire un tour complet de la question de la sécurité dans les installations électriques Basse Tension. Un accent particulier sera accordé aux prises de terre. Il sera ainsi largement discuté de la nature et de la constitution, du calcul et de la réalisation, de la mesure et de l'entretien des prises de terre.



1. PRINCIPES DE SECURITE

1.1 Effets physiologiques du courant électriques.

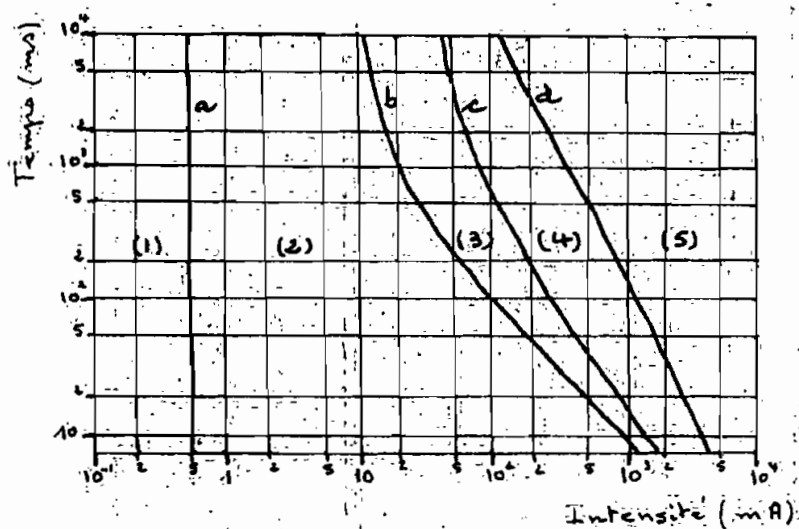
Le corps humain présente une très grande sensibilité au passage du courant électrique. Les travaux de nombreux spécialistes montrent la dépendance des effets physiologiques à la relation temps / courant. Il existe divers paramètres à considérer :

- l'âge, la corpulence, la santé, le sexe,
- l'état, l'humidité de la peau,
- la pression et la surface de contact,
- la tension de contact et la nature du courant.

L'impact de certains de ces facteurs est illustré par l'exemple suivant: un homme adulte à la peau saine et sèche représente une résistance de 3 à 5000 Ω ; un enfant, pieds et mains mouillés, oppose seulement une résistance de l'ordre de 600 à 1000 Ω .

La Commission Electrotechnique internationale a défini les zones tracées sur la figure 1. La courbe b, traduisant la relation $I = I_L + 10/t$, correspond à la limite inférieure des effets physiologiques. Dans cette relation en fonction du temps, I_L de l'ordre de 10 ampères, représente l'intensité du courant de lâcher,

au-dessus duquel une personne ne peut plus lâcher la pièce tenue.



- (1) habituellement aucune réaction
- (2) habituellement aucun effet pathophysiologique dangereux
- (3) habituellement aucun risque de fibrillation
- (4) fibrillation possible (probabilité $\leq 50\%$)
- (5) risque de fibrillation (probabilité $> 50\%$)

Figure 1. Zones des effets du courant alternatif 50/60 Hz sur les adultes (définies par le Comité 64 de la C.E.I.).

Un courant susceptible de s'écouler ne crée pas nécessairement. Mesurer une différence de potentiel s'avère donc plus commode. Ainsi, en vue de la protection des personnes et des biens, les règlements et les normes ont fixé, non pas des valeurs de courant limite, mais des valeurs limites de différence de potentiel entre des

éléments simultanément accessibles.

1.2 Contact direct, et indirect.

Les chocs électriques peuvent être occasionnés par des contacts directs ou par des contacts indirects. Les contacts directs sont des contacts avec les parties actives des matériels et des équipements électriques, c'est-à-dire les parties des matériels et des équipements électriques sous tension en service normal. Les contacts indirects concernent les contacts avec les parties des matériels électriques pouvant se trouver sous tension en cas de défaut, mais pas sous tension en service normal.

Les contacts directs et indirects engendrent à travers le corps humain un courant I_c proportionnel à la tension de contact U_c et inversement proportionnel à la résistance du corps R_c (figure 2).

1.2.1 Contact direct.

Le contact accidentel d'une personne avec une partie active sous tension (fil dénudé, borne non isolée, etc...) permet à travers son corps l'écoulement d'un courant fonction de la résistance corporelle, de la résistance de contact et de l'impédance parfois négligeable de la boucle de défaut. Dans le cascan 220/380 V, pour le cas illustré à la figure 2, la tension

de contact est sensiblement égale à la tension simple, soit 220 V. En admettant une résistance du corps humain de 2000 Ω , valeur assez courante si la peau est humide sans être véritablement mouillée, une personne en contact direct entre une phase et la terre, sera parcourue par un courant :

$$I_c = \frac{U}{R_c} = \frac{220}{2000} = 110 \text{ A.}$$

D'après la figure 1, ce courant est susceptible d'entraîner en une seconde la fibrillation cardiaque.

1.2.2 Circonstances dans lesquelles il y a lieu de prendre des mesures de protection contre les contacts directs.

Toutes les parties actives des équipements électriques doivent être protégées contre les contacts directs, exception faite du matériel électrique alimenté en très basse tension de sécurité dans des conditions particulières. La protection est assurée par la construction même des matériels ou lors de la mise en œuvre.

L'usage de certains matériels comportant une protection satisfaisant à certaines conditions (voir plus loin) constitue une protection contre les contacts directs.

Certains équipements électriques comme le matériel

de soudage électrique, le matériel d'électrolyse, les foudres électriques, le matériel d'anesthésie des animaux, font l'objet de mesures spéciales définies dans les normes.

1.2.3 Contact indirect.

Une masse est un élément métallique susceptible d'être touché et normalement isolé des parties actives, mais pouvant être mis accidentellement sous tension à la suite d'un défaut d'isolement caractérisé par :

- une baisse normale de l'isolement (vieillesse des isolants : machines, câbles, etc...),
- des défauts phase-masse (plaque aux bornes d'un récepteur, claquage à l'intérieur d'un bobinage de machines),
- des défauts phase-terre (lignes aériennes).

Dans d'un défaut, toute personne touchant une partie métallique se trouve en danger. Ce danger n'est pas dû au fait de toucher une partie d'un matériel électrique sous tension. Mais il existe à partir du moment où la personne touche simultanément un autre objet situé à un autre potentiel. Le cas le plus défavorable (pieds au potentiel zéro) correspond à la position normale où les individus

sont les pieds sur le sol, sans être isolés par rapport à celui-ci. Il s'écoule alors un courant corporel lié à la différence de potentiel ou tension de contact.

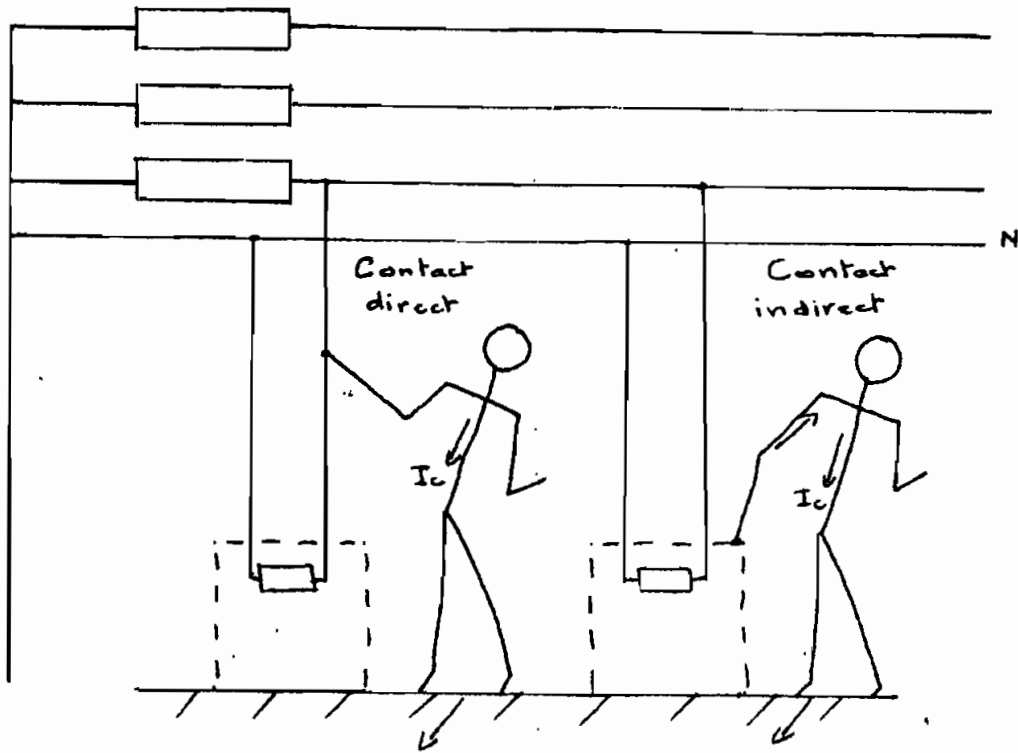


Figure 2. Contact direct. Contact indirect.

1.2.4 Circonstances dans lesquelles il y a lieu de prendre des mesures de protection contre les contacts indirects.

Il s'avère nécessaire de prendre des mesures de protection contre les contacts indirects quand une personne peut toucher simultanément:

- soit une masse (appareil électrodomestique) et un élément conducteur (tuyau de chauffage central ou d'eau),

- b) soit une masse et une paroi ou un sol non isolant (cas le plus fréquent),
- c) soit une masse et la terre (contact simultané de deux surfaces métalliques, l'une supportant de l'appareillage électrique, l'autre étant un élément conducteur relié à la terre),
- d) soit deux masses (deux appareils électriques).

Les individus ne sont pas normalement en contact avec les parois, généralement isolantes. C'est pourquoi le contact simultané d'une masse et d'un mur non isolant est rare et complexe. Cependant, du fait de l'existence de bâtiments entièrement métalliques, ce cas n'est pas à négliger.

Il existe des locaux comportant par leur construction même, une mesure de protection considérée comme de fait. Ce sont les locaux indiqués sur le tableau 1, avec les équipements pour lesquels il n'est pas nécessaire de prendre des mesures de protection.

Ces locaux possèdent une caractéristique fondamentale: ils sont non conducteurs. En effet les sols et les parois de ces locaux doivent être isolants.

Locaux (ou emplacements)	Equipements	
	Fixes *	Amovibles
Secs et non conducteurs	Pas de mesure **	Pas de mesure
Temporairement humides et non conducteurs	Mesure	Pas de mesure

Tableau 1. (NF C 15-100).

* Les appareils amovibles utilisés à poste fixe sont considérés comme des équipements fixes.

** S'ils sont situés à plus de 1 mètre de tout point de tout élément conducteur isolé de la terre, c'est-à-dire si on ne peut pas toucher simultanément l'équipement et un tel élément conducteur.

Les locaux secs comprennent notamment les salles de séjour, salons, salles à manger, les chambres des appartements d'habitation, les bureaux, certains magasins, etc..., sous réserve de la nature des sols et des parois. Les appareils utilisés dans ces locaux peuvent être de n'importe quelle classe (voir plus loin), et notamment de la classe 0 (ou 0I). Cependant, si deux masses d'appareils sont simultanément accessibles, des mesures de protection doivent être prises.

Les locaux temporairement humides peuvent être humides pendant de courtes périodes, mais séchent rapidement grâce à une bonne aération. Ce sont les cuisines, les emplacements extérieurs non couverts (terrasses couvertes ou vérandas), les garages, les caves suffisamment ventilées, les lingeries, les séchoirs, etc. Les équipements fixes (y compris les appareils amovibles utilisés à poste fixe) doivent faire l'objet d'une mesure de protection. Par contre, les appareils amovibles non utilisés à poste fixe n'exigent pas des mesures de protection, si le sol et les parois des locaux sont isolants, de carrelage ou un revêtement analogue. Le sol de cuisines en font un élément conducteur. C'est pourquoi dans ces locaux les sockets de prises de courant exigent certaines mesures de protection et seuls sont admis des appareils de classes I ou II.

1.3 Isolation et classes de protection contre les chocs électriques.

Les matériels électriques comportent une isolation destinée à empêcher tout contact avec des parties actives. L'isolation doit être réalisée en matière iso-

lente capable de supporter d'une manière durable les contraintes mécaniques, électriques, thermiques, ..., auxquelles elle peut être soumise. On distingue plusieurs types d'isolation.

1.3.1 Isolation fonctionnelle.

L'isolation fonctionnelle, principale ou fondamentale est nécessaire pour assurer le fonctionnement convenable d'un matériel et sa protection contre les contacts directs. Elle est vérifiée par un certain nombre d'essais dont le plus représentatif est un essai diélectrique souvent effectué après un certain séjour de l'appareil dans une atmosphère humide pour simuler les conditions les plus défavorables auxquelles peut être soumis l'appareil au cours de sa vie normale. En général, la valeur de la tension d'essai diélectrique de l'isolation fonctionnelle est égale à :

$2U + 1.000$ volts où U est la tension nominale du matériel. Cependant, pour les matériels à très basse tension, c'est-à-dire de tension nominale inférieure ou égale à $50V$, la tension d'essai diélectrique est seulement de $500V$. La durée d'application de cette tension varie de une minute (appareils, appareillage) à 15 minutes (conducteurs et câbles).

Aucune étude réelle n'a été faite pour déterminer

une valeur de tension diélectrique destinée à garantir une protection efficace contre les surtensions. C'est pour-
qu'a les valeurs de tensions d'essai diélectrique restent re-
lativement conventionnelles et empiriques.

La tension d'essai est appliquée entre parties acti-
ves et parties accessibles, mais également entre parties
actives de polarités différentes. Ainsi les appareils soumis
à cet essai sont en bon état de fonctionnement et le ris-
que de tout danger est écarté.

1.3.2 Défaut d'isolement.

L'action de l'humidité et autres agents extérieurs
dans le temps, diminue les qualités de l'isolation. Les con-
dantes, les chocs ou autres événements imprévus subis
par les isolations, entraînent leur vieillissement, les affai-
blissent et parfois annulent leurs caractéristiques. Un dé-
faut d'isolement est ainsi née, propageant le potentiel
de la partie active en contact avec l'isolation vers les
parties accessibles. On note alors un chemin conducteur
ou clémément, soit à la surface de l'isolation, soit à
l'intérieur même de la matière isolante par perforation
de cette matière. Le défaut d'isolement donne naissance
à un courant de fuite dont la valeur en augmentant
peut atteindre le courant de court-circuit ou courant

de défaut franc limité par l'impédance des conducteurs d'alimentation et des contacts.

Le courant de défaut franc se manifeste le plus souvent par des effets extérieurs et peut être éliminé par des appareils de protection. Plus dangereux est le courant de défaut non franc ou courant de fuite. Ce courant peut avoir une valeur insuffisante pour le fonctionnement des appareils de protection et présente ainsi une menace au point de vue de la sécurité des personnes et des risques d'incendie.

1.3.3 Isolation supplémentaire.

L'isolation supplémentaire est indépendante de l'isolation fonctionnelle. Elle assure la protection contre les courants indirects en cas de défaut de l'isolation principale. Cette deuxième isolation apparue depuis quelques années est encore appelée isolation de protection. La double isolation réduit les contraintes subies par les isolations. De ce fait, elle diminue considérablement les risques de défaut.

Les valeurs des tensions d'essai diélectrique auxquelles sont soumises les isolations des appareils à double isolation sont les suivantes:

— isolation fonctionnelle

1500 V

- isolation supplémentaire : 2500V
- double isolation : 4000V

pour les appareils de tension nominale inférieure à 440 volts. On définit également l'isolation renforcée. C'est une isolation considérée comme équivalente à une double isolation du fait de ses propriétés mécaniques et électriques.

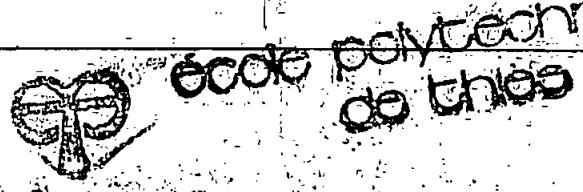
1.3.4 Les classes de matériel.

Par rapport à la protection contre les contacts indirects, une classification a été établie pour faciliter les conditions d'utilisation des matériels. Cette classification repose sur deux concepts :

- l'isolation des appareils entre parties actives et parties accessibles,
- la possibilité ou non de relier les parties métalliques accessibles à un conducteur de protection.



Les matériels des classes 0, 0I et I peuvent comporter des éléments à double isolation ou à isolation renforcée, mais si un seul endroit de la surface extérieure possède uniquement une isolation fonctionnelle, ils ne peuvent être considérés comme matériels de la classe II.

La norme française NF C 20-030, établie sur la



base de recommandations internationales, classe les matériels d'après leur mode de construction suivant le tableau ci-après :

Tableau 2. Classification des matériels.

Classe	Symbole	Construction
0	pas de symbole	Matériel ayant une isolation fonctionnelle, mais pas de dispositions permettant de relier les parties métalliques accessibles (s'il en existe), à un conducteur de protection.
I		Matériel ayant une isolation fonctionnelle, et des dispositions permettant de relier les parties métalliques accessibles (s'il en existe) à un conducteur de protection.
OI	pas de symbole	Cas particulier du matériel de classe I comportant à demeure un câble souple sans conducteur de protection et une fiche de prise de courant sans contact de mise à la terre.
II		Matériel ayant des parties accessibles séparées des parties actives par une isolation renforcée ou une double isolation, et ne comportant pas de dispositions permettant de relier les parties métalliques accessibles (s'il en existe), à un conducteur de protection : <ul style="list-style-type: none"> • type A : enveloppe isolante - (à l'exception des plaques, rivets ou vis, séparés par une isolation renforcée); • type B : enveloppe métallique - (double isolation par parties à isolation renforcée ou cas où la double isolation est impossible); • type C : combinaison des types A et B.
III	valeur de la tension nominale	Matériel prévu pour être alimenté sous une tension n'excédant pas 50V et n'ayant aucun circuit interne ou externe fonctionnant à plus de 50V.

1.4 Protection contre les contacts directs.

La protection contre les contacts directs est assurée

par l'une des mesures de protection suivantes :

- très basse tension de sécurité,
- isolation,
- obstacles,
- éloignement,
- dispositif à courant différentiel - résiduel.

1.4.1 Protection par très basse tension de sécurité.

La protection par très basse tension de sécurité concerne à la fois les contacts directs et les contacts indirects.

L'emploi d'une tension inférieure à 50V en courant alternatif, en valeur efficace, et à 100V en courant continu, assure la sécurité, sous réserve des conditions ci-après :

i) la valeur efficace la plus élevée ne doit jamais pouvoir dépasser 50V en courant alternatif, en toutes circonstances,

ii) les circuits à TBT (figure 3) doivent être alimentés par une source de sécurité, c'est-à-dire :

- soit un transformateur de sécurité abaissant la tension ordinaire (inférieure à 1000V) à la TBT, et de rigidité électrique particulièrement élevée entre circuits primaire et secondaire; un auto-transformateur ne doit pas être utilisé;
- une batterie de piles ou d'accumulateurs;

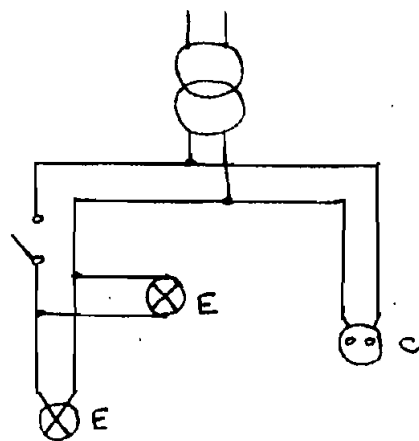
— un groupe moteur - générateur présentant des garanties équivalentes d'isolement à celles d'un transformateur de sécurité entre les enroulements TBTS et les autres;

iii) les circuits à TBTS ne doivent avoir aucun point relié à la terre;

iv) les conducteurs doivent être séparés de ceux de tout autre circuit;

v) les prises de courant ne doivent pas être interchangeables avec celles de circuits de tension plus élevée;

vi) si des matériels sont alimentés par des circuits différents, dont l'un à TBTS, ce dernier doit présenter, par rapport aux autres, un isolement équivalent à celui prescrit ci-dessus.



C : prise de courant

E : appareil d'éclairage

Figure 3. Circuit à très basse tension de sécurité TBTS.

1.4.2 Protection par isolation des parties actives.

La protection par isolation consiste à disposer au tour des parties actives une isolation appropriée,

généralement fonctionnelle, prévue par construction ou disposée au moment de la mise en place du matériel (conducteurs, appareils, etc...). L'isolation doit être réalisée en matière isolante capable de supporter d'une manière durable les contraintes mécaniques, électriques, thermiques, etc..., auxquelles elle peut être soumise. La conservation de l'isolation doit être surveillée.

1.4.3. Protection au moyen d'obstacles.

La protection contre les contacts directs par mise hors de portée au moyen d'obstacles (barrières ou enveloppes) est assurée quand les obstacles s'opposent à tout contact avec les parties actives d'une façon efficace et permanente, grâce à leur nature, leur étendue, leur disposition, leur stabilité, leur solidité.

Toutes les surfaces extérieures doivent posséder au moins le degré de protection IP2, c'est-à-dire doivent être protégées contre la pénétration de corps solides étrangers de dimensions supérieures à 12 mm. Fixées de façon sûre, robustes et durables, les barrières ou enveloppes ne doivent pas pouvoir être supprimées, ouvertes ou soulevées, sans l'aide d'une clé ou d'un outil et sans mise hors tension des parties actives protégées.

1.4.4 Protection par éloignement.

La mise hors de portée par éloignement est destinée à empêcher des contacts fortuits avec des parties actives. Des parties simultanément accessibles se trouvant à des potentiels différents doivent être éloignées de 2,50 mètres pour la basse tension.

1.4.5 Protection par dispositif à courant différentiel-résiduel.

L'emploi de dispositifs à courant différentiel-résiduel d'au plus 30 mA constitue une protection complémentaire des autres mesures. Le dispositif, intervenant si le contact a lieu entre deux parties actives à des potentiels différents, coupe le courant avant le temps maximal dangereux, en cas de contact direct d'une personne avec une partie active et la terre par l'intermédiaire d'éléments conducteurs.

1.5 Protection contre les contacts indirects.

La protection contre les contacts indirects est nécessaire pour les raisons suivantes:

- la défaillance de l'isolation d'un matériel électrique peut entraîner la mise sous tension accidentelle des masses;

représente la figure 2, en plus des résistances R et R_u placées à la terre, R_u étant relié à la masse M, par l'intermédiaire, du conducteur de protection PE.

En cas de défaut d'isolement sur l'appareil M, un courant I_d s'établit dans le circuit, dit de défaut. Si l'on considère:

- un réseau 220/380 V,
- une résistance interne du récepteur (R_i) de 30 Ω,
- une résistance R_u de 20 Ω,
- une résistance corporelle R_c de 2000 Ω,
- une impédance de boucle négligeable,

il vient:

Courant de défaut: $I_d = \frac{U}{R_i + R_u} = \frac{220}{30 + 20} = 4,4 \text{ A}$

Tension de contact: $U_c = R_u \times I_d = 20 \times 4,4 = 88 \text{ V}$

Courant corporel: $I_c = \frac{U_c}{R_c} = \frac{88}{2000} = 44 \text{ mA}$

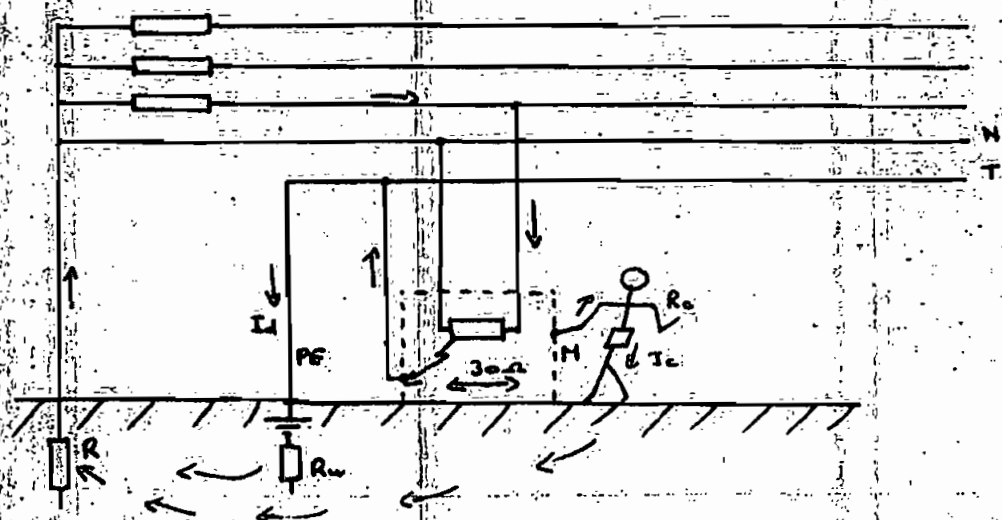


Figure 4. Schéma de la mesure de protection B1.

La résistance R_u s'appelle résistance de prise de terre des masses. La sécurité repose sur le dispositif de coupure automatique et en particulier sur la coordination entre le réglage du dispositif de coupure et la valeur de la mise à la terre.

L'efficacité de la mesure dépend des deux conditions suivantes :

i) le courant de défaut assure le plus rapidement possible le fonctionnement du dispositif de coupure ; cette condition détermine le courant de réglage du dispositif de coupure ;

ii) une masse quelconque ne peut demeurer, par rapport à une prise de terre électriquement distincte, à un potentiel supérieur à une limite considérée comme le seuil dangereux ; cette condition intéresse les défauts non francs dont la valeur est insuffisante pour assurer le fonctionnement, au moins rapide, du dispositif de coupure.

La première condition mène à une relation entre le courant de réglage du dispositif de protection et l'impédance de la boucle de défaut. En vertu de la loi d'Ohm, le courant de défaut franc s'écrit :

$$I_d = \frac{U}{R + R_u}$$

où U : tension entre phase et neutre,

R : impédance du point neutre,

R_n : impédance de la prise de terre des masses.

En réalité on doit tenir compte de l'impédance des conducteurs de liaison, y compris celle de l'élément conducteur constitué par la terre. Mais cette impédance est généralement très faible par rapport aux autres valeurs. Est également faible la valeur de l'impédance du point neutre. De l'ordre ou même inférieure à 1 ohm, cette impédance est, en pratique et sauf cas exceptionnels, négligée. L'impédance de la prise de terre des masses intervient dans la détermination du courant de défaut phase. Mais elle est en fait déterminée par la deuxième condition, comme nous le verrons plus loin.

Si on parle ici d'impédances, il faut en fait penser à des résistances, car les composantes réactives (inductances et capacités) de ces impédances sont généralement faibles par rapport aux composantes actives. Notons cependant la possibilité de mesurer effectivement l'impédance de la boucle de défaut par des appareils appropriés.

La première condition est donc remplie si la valeur du courant I_d est au moins égale à l'intensité

du courant provoquant le fonctionnement du dispositif en moins de 5 secondes.

En effet le courant I_d est directement proportionnel à la tension de contact, par le coefficient $\frac{1}{R_c}$, considéré, approximativement comme fixe. Et les règlements imposent, pour éviter tout danger d'électrocution, corrélativement aux données de la figure 1, la coupure du courant d'alimentation, avec un temps de coupure fonction de la tension de contact. Une tension de contact ne peut se maintenir dans aucune partie de l'installation à une valeur supérieure à celle indiquée dans le tableau 41A des Règles de la norme française NF C15-100, en fonction du temps correspondant. Ce tableau est reproduit à la page suivante. Il permet de tracer la courbe dite de sécurité.

La tension limite conventionnelle U_L est la valeur maximale de la tension de contact présumée pouvant être maintenue indéfiniment; elle est égale à 50 volts en courant alternatif (valeur efficace) et à 100 volts en courant continu.

La tension limite conventionnelle U_L est limitée:

- dans les conditions mouillées (chantiers, ports, ...)
- à 25V en courant alternatif et à 50V en courant continu;

— Le contact d'une personne avec, d'une part les masses, et d'autre part les éléments conducteurs, généralement au potentiel de la terre, peut entraîner à travers le corps la circulation d'un courant dangereux.

Les normes considèrent deux sortes de masses.

1.5.1 Les mesures A.

Les mesures A consistent à prendre des dispositions destinées à supprimer tout risque, soit en rendant les contacts non dangereux, soit en empêchant les contacts simultanés énumérés précédemment. Ce sont des mesures passives et préventives. Sont classées dans les mesures :

- i) l'utilisation de la TBTS;
- ii) l'utilisation de matériels de la classe II; l'emploi de matériels de la classe II constitue en soi une mesure de protection et dispense de prendre à leur égard d'autres mesures de protection;
- iii) l'inaccessibilité simultanée des masses et des éléments conducteurs; la mesure consiste à disposer les masses et les éléments conducteurs de façon à éviter le contact simultané d'une personne avec une masse et un élément conducteur, ou avec deux masses;
- iv) l'isolation des masses; elle consiste à disposer autour des matériels de la classe 0 ou équivalents,

une isolation supplémentaire conférant à l'ensemble la sécurité de la double isolation;

v) l'isolation des éléments conducteurs; il s'agit de prendre toutes les dispositions nécessaires visant à empêcher le contact d'une personne avec une masse quelconque sans avoir les pieds sur une surface isolée de la terre et de cette masse;

vi) la réalisation d'un ensemble équipotentiel local; toutes les masses et tous les éléments conducteurs simultanément accessibles pour une personne ayant les pieds sur une surface conductrice faisant elle-même partie de l'ensemble équipotentiel, sont maintenus par des liaisons équipotentielles assurées par un conducteur dit de protection.

1.5.2 Les mesures B.

Elles consistent à l'utilisation de dispositifs de coupure automatique fonctionnant avant l'apparition de tout danger.

La plus utilisée est celle dite de type B1. Elle se compose en fait de deux éléments:

- la mise à la terre des masses,
- le dispositif de coupure automatique.

Considérons l'exemple illustré à la figure 4. Elle

— dans les conditions immergées (piscine, sauna, ...)
à 12 V en courant alternatif et à 25 V en courant continu.

Tableau 3. Durée maximale de maintien de la tension de contact.

Tension de contact présumée (V)		Temps de fonctionnement maximal du dispositif de protection (s)
Courant continu	Courant alternatif	
< 50	< 100	∞
50	100	5
75	130	1
90	150	0,5
110	170	0,2
150	200	0,1
220	250	0,05
280	310	0,03
350	370	0,02
500	500	0,01

En somme, la protection contre les contacts indirects d'une tension dangereuse ($U_0 \geq 50$ V) exige la mise à la terre de toute masse métallique (récepteur, tableau, ...), par l'intermédiaire d'un conducteur de protection. La prise de terre présente, entre ce con-

ducteur et la terre au potentiel 0, une résistance R_u . Cette protection passe obligatoirement par la coupure automatique du circuit d'alimentation par un dispositif de protection, conformément aux données de la courbe de sécurité.

Mais les contraintes diffèrent selon le schéma de protection. Les pages suivantes traiteront des divers types de schémas de protection ou régimes de neutre.

2. REGIMES DE NEUTRE.

La protection contre le contact indirect d'une tension supérieure à 50V nécessite la coupure automatique du circuit d'alimentation. Cela exige :

— la liaison des masses à un conducteur de protection PE relié à une prise de terre; les masses simultanément accessibles sont reliées à la même prise de terre;

— l'utilisation de dispositifs de protection assurant automatiquement la coupure de l'alimentation, en respectant la courbe de sécurité, compte tenu des valeurs d'impédances de la boucle de défaut.

Cependant, suivant les régimes de neutre, les contraintes sont différentes. On distingue trois schémas de protection (TT, TN et IT) symbolisés par un code de deux lettres :

Première lettre : situation de l'alimentation par rapport à la terre :

T : liaison directe d'un point avec la terre;

I : isolation de toutes les parties actives par rapport à la terre ou liaison d'un point avec la terre à travers une impédance;

Deuxième lettre: situation des masses par rapport à la terre:

T: masses reliées directement à la terre;

N: masses reliées directement au point de l'alimentation mis à la terre (en courant alternatif, le point mis à la terre est normalement le point neutre).

2.1 Schéma TT.

Il est utilisé dans les installations alimentées directement par un réseau de distribution publique à basse tension (cas des abonnés domestiques).

Le schéma TT représente la solution la plus simple à l'étude et à l'installation. La coupure a lieu au premier défaut.

Le schéma TT est illustré à la figure 5. L'impédance de la boucle de défaut est celle constituée par le conducteur de phase, le conducteur de protection assurant la liaison de la masse à la prise de terre des masses, le sol, la prise de terre du point neutre, le point neutre et l'enroulement secondaire du transformateur d'alimentation. Les flèches indiquent le parcours du courant de défaut.

Le dispositif de protection à courant différentiel-résiduel mesure l'intensité du courant de défaut.

La réalisation de la condition suivante est exigée :

$$R_u \cdot I_{\Delta n} \leq U_L$$

où $I_{\Delta n}$: courant différentiel - résiduel nominal de fonctionnement du dispositif de protection,

R_u : résistance de la prise de terre des masses,

U_L : la tension limite conventionnelle.

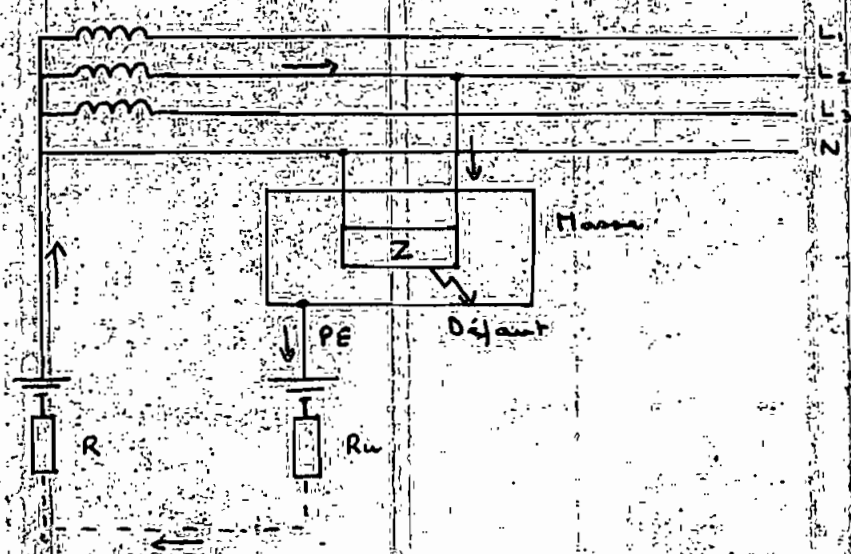


Figure 5. Schéma TT.

La relation précédente s'écrit en réalité $Z \cdot I_{\Delta n} \leq U_L$

$$\text{avec } Z = R_u + R + Z_c + R_D$$

où $R_u + R$: résistance de la prise de terre,

R_D : résistance du défaut d'isolement,

Z_c : impédance du câble

Mais les termes omis sont négligeables par rapport à R_u .

Les appareils de protection à maximum de courant

ne conviennent généralement pas pour le schéma TT, car ils nécessitent des résistances de mise à terre très faibles (de l'ordre de un ohm), pratiquement irréalisables.

2.2 Schéma TN.

Le schéma TN ou mise au neutre est caractérisé par l'interconnexion et la mise à la terre impératives des masses et du neutre. La coupure est assurée au premier défaut d'isolement par un dispositif de protection contre les surintensités (disjoncteurs ou fusibles) placé en amont, car dans ce schéma tout courant de défaut phase - masse est un courant de court-circuit entre cette phase et le neutre. Ceci permet une certaine simplification des installations.

On distingue (figure 6) :

- le schéma TN-A : schéma dans lequel les fonctions de neutre et de protection sont combinées en un seul conducteur (PEN);
- le schéma TN-B : schéma dans lequel le conducteur neutre et le conducteur de protection sont séparés; on peut utiliser également dans ce cas un appareil différentiel-résiduel.

Les deux schémas peuvent être utilisés dans une même installation, le TN-A pour les distributions

principales et le TN-B pour les circuits terminaux, mais le TN-A n'est pas admis pour les installations mobiles et ne peut pas être utilisé en aval du TN-B, car contrairement à la sécurité du conducteur PE, le courant du neutre pourrait y circuler.

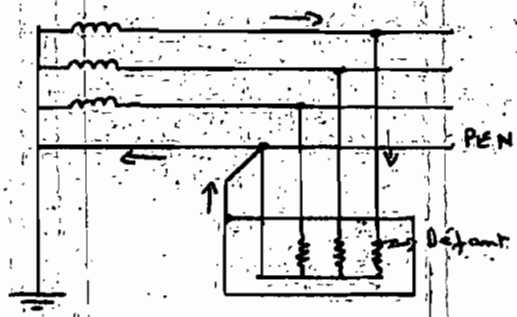


Schéma A



Schéma B

Figure 6. Schémas TN. Les flèches indiquent le parcours du courant de défaut.

Le conducteur neutre, connecté aux masses de l'installation, devient accessible. Des mesures doivent donc être prises pour empêcher toute montée en potentiel du neutre. Il faut pour cela :

- la liaison équipotentielle de toutes les masses et de tous les éléments conducteurs simultanément accessibles
- la liaison du conducteur neutre à un système de prises de terre régulièrement réparties dans l'installation, et de résistance globale de mise à la terre la plus faible possible.

La sécurité est assurée si le temps de coupure est suffisamment bref pour éviter de porter les conducteurs à une température excessive. Par ailleurs la tension de contact doit demeurer inférieure à la valeur admise par la courbe de sécurité.

Pour calculer la tension de défaut, considérons la figure 7.

Soit S_a : section du conducteur actif,

S_p : section du conducteur de protection PEN,

R_a et R_p les résistances correspondantes.

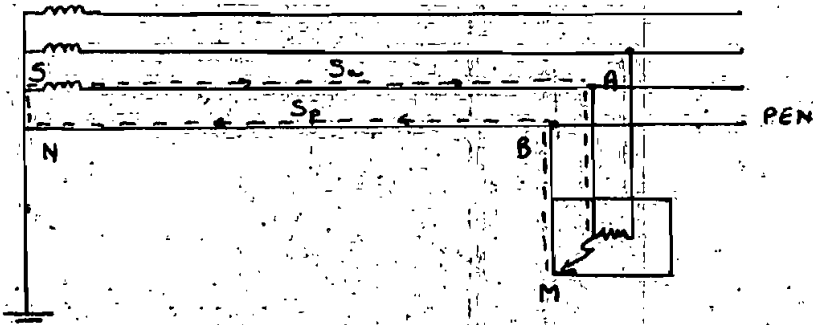


Figure 7: Tension de contact dans une installation TN.

Le schéma équivalent de la figure 8 permet d'écrire:

$$U_c = U_0 \frac{R_p}{R_a + R_p} \quad \text{où } U_0 \text{ : tension phase-neutre.}$$

Comme les longueurs S_{AM} et N_{BM} sont égales,

$$\frac{R_a}{R_p} = \frac{S_p}{S_a} = \frac{1}{m} \quad \text{où } m \text{ varie de 1 à 4.}$$

$$\text{Par conséquent: } U_c = U_0 \frac{m}{1+m}$$

En pratique $U_c \approx 0,8 U_0$.



Figure 8. Schéma équivalent.

La coupure a lieu quand le courant de défaut dépasse le courant de fonctionnement du dispositif de protection, conformément à la courbe de sécurité, on:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{R_a + R_p} \gg I_r$$

$$\begin{cases} R_a = \rho \frac{L}{S_a} \\ R_p = \rho \frac{L}{S_p} \\ \frac{S_a}{S_p} = m \end{cases} \quad \Rightarrow \quad L \leq \frac{0,8 U_0}{(1+m) \rho I_r} S_a$$

où, ρ : résistivité des conducteurs,

L : longueur des conducteurs;

Dans les normes des tableaux donnent les longueurs maximales de canalisations protégées par les différents dispositifs de protection.

Dans le cas des circuits terminaux, contrairement aux circuits de distributions où l'on suppose celle des câbles comme seule impédance de la boucle de défaut, on a souvent un défaut interne au récepteur. On a alors:

$$L' \leq U_L \frac{S_p}{\rho I_d}, \quad L' < L$$

où I_d : valeur de déclenchement du dispositif de protection,
 U_L : tension limite conventionnelle.

Dans les cas exceptionnels où un défaut direct peut se produire entre une phase et la terre (câbles enterrés sans revêtement métallique), la condition suivante doit être remplie: $\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L}$

où R_B : résistance globale des mises à la terre,

R_E : résistance présumée de contact à la terre des éléments conducteurs non reliés au conducteur de protection, par lesquels peut se produire un défaut entre phase et terre.

En l'absence de valeurs précises, on peut prendre pour une installation 220/380 V: $R_E \approx 5$ ohms, soit $R_B \approx 1,5$ ohm.

Cette mesure de protection, (très courante dans les installations domestiques en Allemagne et en Amérique du Nord) est utilisée uniquement dans les installations alimentées par un poste de transformation ou par une source autonome.

Le schéma TN-A permet l'économie d'un conducteur et d'un pôle d'appareillage. Le schéma TN-B, moins économique, présente néanmoins l'avantage de la suppression des résistances de prises de terre dans

l'impédance de la boucle de défaut et par tant de réduire la valeur de cette dernière.

2.3 Schéma IT.

Les masses sont interconnectées et mises à la terre, le neutre du transformateur isolé de la terre, ou mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance de forte valeur. Ceci limite l'intensité du courant résultant d'un premier défaut phase - masse et aucune tension de contact dangereuse n'apparaît.

Un contrôleur permanent d'isolement (CPI) est prévu pour indiquer l'apparition du premier défaut à la masse ou à la terre, d'une partie active de l'installation. Ce dispositif actionne un signal sonore ou visuel pour permettre la localisation et l'élimination rapide du défaut.

La coupure intervient si deux défauts d'isolement simultanés se produisent. On se retrouve alors dans les conditions

- a) du schéma TT si les masses ne sont pas interconnectées,
- b) du schéma TN si les masses sont interconnectées.

Le cas a) est illustré à la figure 3.

Les courants I_1 et I_2 naissent d'un premier défaut.

Du fait de la grande valeur de l'impédance Z , on a :

$$R_1 I_1 < U_L \quad \text{et} \quad R_2 I_2 < U_L.$$

Un deuxième défaut entraîne le courant I_3 d'une ou moins des masses M_1 et M_2 est portée à un potentiel supérieur à U_L . La protection se fait par des dispositifs différentiels placés en A et B.

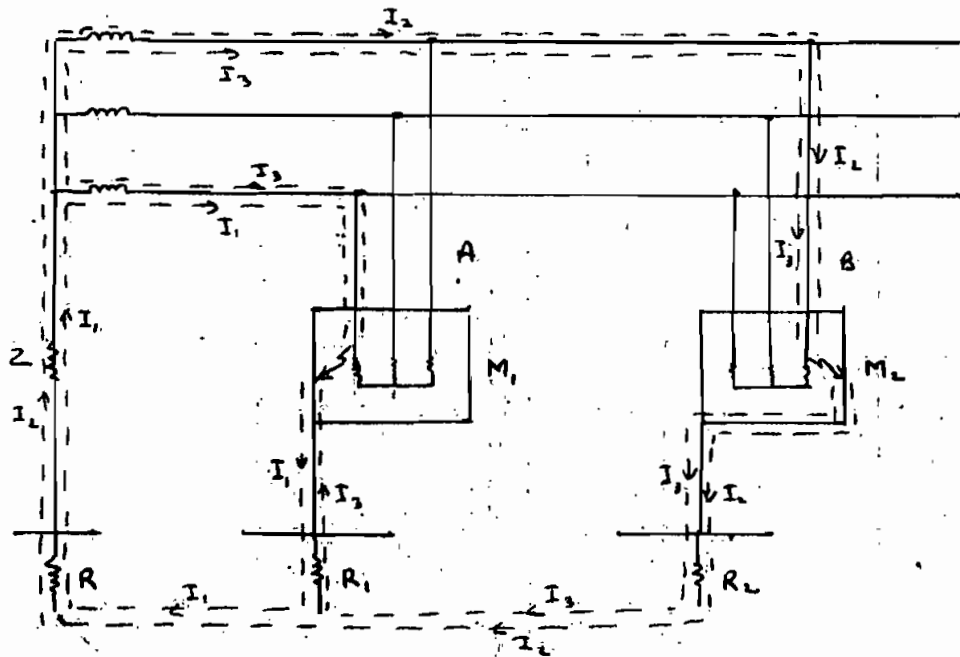


Figure 9. Schéma IT. Masses non interconnectées.

Le cas b) est illustré à la figure 10.

La présence de la liaison L fait de I_3 un véritable courant de court-circuit. Les dispositifs de protection contre les surintensités assurent la protection.

Dans les installations IT il est recommandé de ne pas distribuer le neutre. Si le conducteur neutre est distribué, en défaut à la terre l'affectant supprime

les avantages attachés aux systèmes dans lesquels le neutre n'est pas relié directement à la terre.

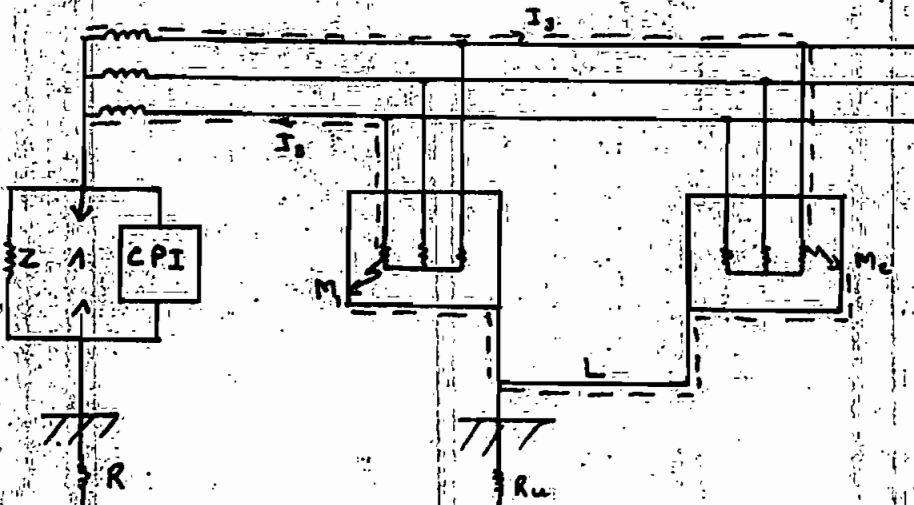


Figure 10. Schéma IT. Neutres interconnectés.

(A: limiteur de surtension entre R et le neutre, si le transformateur est HT/BT).

Un double défaut intéressant deux phases différentes entraîne la coupure, si la condition suivante est réalisée :

$$L \leq \frac{0,8 U'}{\rho (1+m) 2 I_t} S_a$$

où U' : tension phase - phase si le neutre n'est pas distribué ou tension phase - neutre si le neutre est distribué,

S_a : section des conducteurs de phase,

I_t : courant de déclenchement du dispositif de protection.

Les longueurs de canalisation à considérer sont

données dans des tableaux établis par les normes.

Les matériels d'installation doivent être isolés pour la tension entre phases, car les isolations sont prévues à cette tension après l'apparition du premier défaut.

Les installations IT présentent l'intérêt d'assurer la continuité de l'exploitation. Elles tendent à se développer dans tous les établissements industriels, mais nécessitent un personnel d'entretien qualifié.

3. DISPOSITIFS DE PROTECTION ET CONDITION DE LIMITATION DU POTENTIEL DES MASSES.

L'efficacité des mesures de protection contre les contacts indirects dépend, comme nous l'avons déjà remarqué, de deux conditions. La première concerne le courant de défaut assurant le fonctionnement du dispositif de coupure. Il nous restait à voir la deuxième condition, de limitation du potentiel des masses.

3.1 Dispositifs de protection contre les chocs électriques.

Nous nous intéressons, comme mentionné dans les pages précédentes, aux dispositifs à maximum de courant, aux dispositifs à courant différentiel-résiduel et aux contrôleurs permanents d'isolement.

3.1.1 Dispositifs à maximum de courant.

Egalement appelé de protection contre les surintensités, ces dispositifs comprennent les fusibles et les disjoncteurs. Leur utilisation implique le respect de la courbe de sécurité.

Pour les fusibles (figure 11), il suffit de vérifier la condition pour le temps de fonctionnement du fusible

en moins de 5 secondes, car la caractéristique de fusion des fusibles a une pente supérieure à celle de la courbe de sécurité.

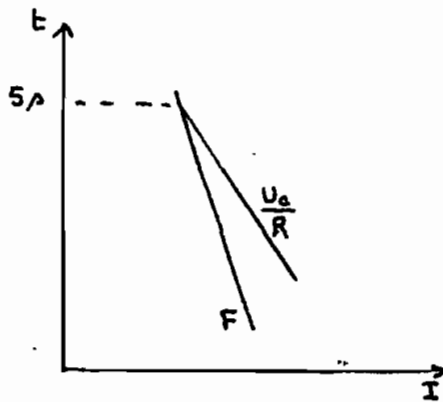


Figure 11. Protection par fusibles.

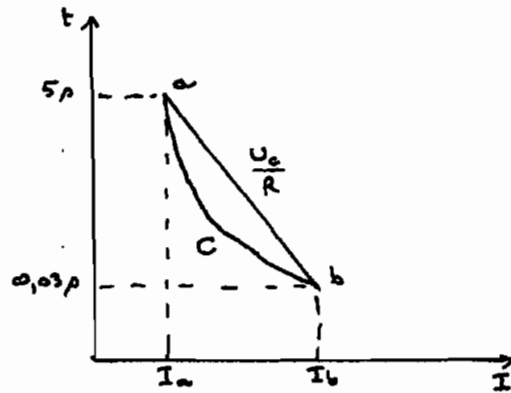


Figure 12. Protection par disjoncteurs avec déclencheurs magnétothermiques.

Pour les disjoncteurs (figure 12), la comparaison doit être faite entre la caractéristique fournie par le constructeur et la courbe $\frac{U_c}{R}$ où U_c désigne la tension de contact et R l'impédance de la boucle de défaut. La vérification porte sur les points extrêmes de la courbe de sécurité, c'est-à-dire pour les temps 5 s et 30 ms.

3. 1- 2 Dispositifs à courant différentiel-résiduel.

Ils mesurent la somme vectorielle des courants traversant les conducteurs. Si ces courants présentent

une différence $I_{\Delta n}$ ($I_{\Delta n} = 0$ en fonctionnement normal) à la suite d'un défaut, la coupure intervient quand $I_{\Delta n}$ dépasse la valeur de seuil ou sensibilité.

La caractéristique de fonctionnement des dispositifs doit satisfaire aux conditions suivantes :

Valeur du courant différentiel	Intensité (mA)	Temps de fonctionnement total maximal
$I_{\Delta n}$	30 10 5	1 s
$2 I_{\Delta n}$	60 20 10	0,15 s
$10 I_{\Delta n}$	300 100 50	0,03 s

Tableau 4 - (valeurs conformes à la courbe de sécurité).

Si une installation est protégée par un seul dispositif DR (cas des installations domestiques), celui-ci doit être placé à l'origine de l'installation.

3.1.3 Contrôleurs permanents d'isolement (CPI)

Le CPI assure d'une réduction du niveau d'isolement de l'installation pour éviter de faire apparaître sur les masses un potentiel supérieur à la tension limite conventionnelle U_L , lors de l'apparition d'un premier défaut.

Le principe de fonctionnement est le suivant : un générateur applique entre le réseau et la terre une

tension continue, créant, dans les résistances d'isolement du réseau, un courant de fuite indépendant des capacités de ligne. Ce courant traverse :

- une résistance aux bornes de laquelle apparaît une tension proportionnelle au courant de fuite ; tension appliquée à un relais électronique provoquant l'alarme quand l'isolement descend en - dessous d'un seuil pré-déterminé,
- un appareil de mesure gradué en $k\Omega$, donnant en permanence la valeur de l'isolement.

La norme recommande de régler le seuil à :

- 0,8 fois la résistance d'isolement de l'ensemble de l'installation,
- la limite supérieure du domaine de réglage du seuil de fonctionnement du CPI si la résistance d'isolement est supérieure à 1,25 fois cette limite supérieure.

Le tableau 5 donne, à titre d'exemple, quelques valeurs pour une installation 220/380 V, avec $U_L = 50$ V.

Résistance de la prise de terre des masses (ohms)	Seuil minimal de réglage du CPI (ohms)	Impédance de mas à la terre du neutre (ohms)
1	6	76
5	30	380
10	60	760
20	120	1520
30	300	3800

Tableau 5.

3.2 La condition de limitation du potentiel des masses.

Elle vise à limiter la différence de potentiel entre la masse en défaut et tout élément, quand le courant de défaut ne fait pas fonctionner le dispositif de coupure automatique.

Cette différence de potentiel est égale à la chute de tension du courant de défaut dans la résistance de la prise de terre des masses. La condition est donc respectée si le produit de la résistance de la prise de terre des masses par l'intensité maximale du courant de défaut n'assurant pas le fonctionnement du dispositif de coupure, c'est-à-dire le courant minimal assurant le fonctionnement du dispositif de coupure, n'excède pas la tension limite conventionnelle U_L .

La condition se traduit en fait par des résistances maximales de prise de terre des masses, pour un dispositif de coupure à seuil de fonctionnement donné. En pratique on procède au calcul de la résistance de la prise de terre des masses pour choisir un appareil de protection. Le tableau 6 indique le calibre maximal de l'appareil de protection correspondant à une résistance donnée de prise de terre des masses.

Compte tenu des précisions apportées antérieurement sur les valeurs relatives des différentes impédances du circuit de défaut, en pratique et sauf cas exceptionnels, seule la valeur de la résistance de la prise de terre des masses est à considérer.

La mesure de la résistance d'une prise de terre étant difficile (nécessité d'établir une ou deux prises de terre auxiliaires), on mesure en pratique l'impédance de la boucle de défaut, avec une légère erreur par excès allant dans le sens de la sécurité: la valeur réelle de la résistance de la prise de terre sera en effet certainement inférieure à la valeur mesurée.

Nous re^{ten}ons en conclusion le choix du

dispositif de coupe automatique d'après le tableau 6, en considérant la valeur de l'impédance (ou résistance) de la boucle de défaut.

Résistance de la prise de terre des masses (Ω)	Calibre maximal du dispositif de coupe automatique associé.		
	Courant nominal des coupe-circuits fusibles (A)	Courant de réglage des dispositifs à jonctions à maximum (A)	Seuil de fonctionnement des appareils différentiels (A)
0,5	32		(1)
0,6	25	32	(1)
0,7	20		(1)
0,75		25	(1)
0,8	16		(1)
1,1		16	(1)
1,3	10		(1)
1,6		10	(1)
1,8	6		(1)
2,5		6	20
5	/ / / / / / / / / / / / / / / /	/ / / / / / / / / / / / / / / /	10
10			5
17			3
50			1
100			0,5
167			0,3
500			0,1
1670			$30 \cdot 10^{-3}$
4150	$12 \cdot 10^{-3}$		
8300	$6 \cdot 10^{-3}$		

(1) les appareils différentiels contiennent, quel que soit leur seuil de fonctionnement.

Les zones hachurées indiquent que les appareils de la colonne correspondante ne contiennent en aucun cas.

Tableau 6.

4. CALCUL ET REALISATION DES PRISES DE TERRE.

4.1 Nature et constitution des prises de terre.

Les prises de terre peuvent être de l'un des types suivants :

- conducteurs nus,
- rubans,
- piquets,
- plaques,
- conduites métalliques d'eau,
- fondation des bâtiments,
- autres structures enterrées appropriées.

Les prises de terre ne peuvent pas être constituées par une pièce métallique plongée dans l'eau, car en plus du risque d'assèchement, cela présente un danger pour les personnes en cas de défaut. Elles ne doivent pas non plus être établies dans les couches de sous-sols parcourues par des courants d'eau, terrains présentant de grandes résistivités et nécessitant des piquets profonds.

Les prises de terre peuvent être :

- des prises de terre spécialement établies,

- des pièces de terre de fait,
- toutes combinaisons des unes et des autres.

4.1.1 Prises de terre spécialement établies.

Elles sont réalisées avec des éléments enterrés dans le sol, en acier galvanisé à chaud, en acier enrobé de zinc adhérent, ou en cuivre nu ou recouvert de plomb. Les raccords entre des métaux de nature différente ne doivent pas se trouver en contact direct avec le sol. L'usage des métaux légers n'est pas admis sans étude particulière.

Des précautions spéciales s'avèrent nécessaires s'il existe, des risques de corrosion, particulièrement importants dans des terrains parcourus par des courants vagabonds, par exemple courants de retour de traction à courant continu. Le matériel est enfoui dans la mesure du possible dans les parties les plus humides du terrain disponible et de préférence dans la terre végétale. Il doit également être éloigné des endroits passagers et des dépôts ou infiltrations susceptibles de le corroder (fumier, produits chimiques, etc...).

4.1.1.1 Conducteurs enfouis horizontalement.

Ils peuvent être:

- des conducteurs massifs ou câbles, en cuivre nu ou recouverts d'une gaine de plomb, d'au moins 25 mm^2 de section,
- des conducteurs en aluminium recouverts d'une gaine de plomb, d'au moins 35 mm^2 de section,
- des feuillards en cuivre d'au moins 25 mm^2 de section et 2 mm d'épaisseur,
- des feuillards en acier doux galvanisé d'au moins 100 mm^2 de section et 3 mm d'épaisseur,
- des câbles en acier galvanisé, d'au moins 35 mm^2 de section.

Les câbles en fils fins (tresses) sont déconseillés.

Les conducteurs sont en pratique disposés de deux manières:

- tranchées horizontales, enfouies à une profondeur d'environ 1 mètre dans des tranchées renversées, et remplies de préférence par de la terre susceptible de retenir l'humidité, et jamais par des cailloux ou matériaux analogues,
- boucles à fond de fouille des bâtiments, constituées par un reintonnage à fond de fouille intéressant le périmètre L du bâtiment, à prendre en considération dans les calculs.

La boucle à fond de fouille peut être constituée :

- i) soit par un conducteur en cuivre nu d'au moins 25 mm^2 de section, en bon contact avec le sol;
- ii) soit par un feuillard en acier de qualité marchande d'au moins 100 mm^2 de section et 3 mm d'épaisseur, ou par un câble en acier de 56 mm^2 de section, noyé dans le béton de propreté des fondations des bâtiments.

4.1.1.2 Plaques minces enterrées.

Sont généralement utilisées des plaques rectangulaires de $0,5 \times 1 \text{ m}^2$ ou des plaques carrées de 1 m de côté, enfouies verticalement, de façon à placer le centre de gravité à environ 1 mètre de profondeur. Les plaques en cuivre ont une épaisseur d'au moins 2 mm, celle en acier galvanisé une épaisseur minimale de 3 mm.

4.1.1.3 Piquets verticaux.

Ils sont constitués de :

- tubes en acier galvanisé d'au moins 25 mm de diamètre extérieur,
- profilés en acier doux galvanisé d'au moins 60 mm de côté,

— barres en cuivre ou en acier, d'au moins 15 mm de diamètre; les barres en acier sont recouvertes d'une couche protectrice adhérente de cuivre, d'épaisseur appropriée ou d'acier galvanisé.

Si des risques de gel ou de sécheresse existent, les longueurs de piquets calculées doivent être augmentées de 1 mètre ou deux. La valeur de la résistance de la prise de terre est diminuée si plusieurs piquets sont disposés en parallèle, et éloignés d'au moins leur longueur en cas de deux piquets, et davantage s'il y en a plus. Les piquets doivent être prolongés à une profondeur assurant un contact approprié avec la terre, par exemple, au moins 2 mètres. Cependant les piquets de grande longueur peuvent atteindre des couches de terrain de faible résistivité, les sols étant rarement homogènes.

4.1.2 Prises de terre de fait.

Certaines structures métalliques enterrées peuvent être utilisées comme prises de terre. Sont exclus les conduits de vidange, de fumée ou d'ordure ménagère, les canalisations de gaz ou de chauffage central.

4.1.2.1. Conduites de distribution publique d'eau.

Ces conduites, utilisées avec l'accord du distributeur d'eau, permettent de réaliser des prises de terre de résistance inférieure en général à 1 ou 2 ohms. Les compteurs d'eau doivent alors être shuntés par des conducteurs de protection de section appropriée. Une inscription placée à proximité du compteur rappelle l'utilisation de la conduite comme prise de terre.

4.1.2.2. Conduites métalliques privées.

Les conduites métalliques enterrées, utilisées comme prises de terre, doivent avoir une continuité électrique assurée et une résistance de prise de terre suffisamment faible. Cette résistance, en raison de sa faible profondeur, peut dépendre des conditions saisonnières. Par conséquent des mesures doivent être effectuées à différentes époques de l'année.

4.1.2.3. Piliers métalliques enterrés.

Les piliers métalliques interconnectés par une structure métallique et enterrés à une certaine

profondeur dans le sol peuvent être utilisés, comme prises de terre. L'emboîtement éventuel de béton ne s'oppose pas à l'utilisation de ces piliers, et ne modifie pas sensiblement la valeur de la résistance de la prise de terre.

4.2 Calcul des résistances de prises de terre.

La résistance d'une prise de terre dépend de ses dimensions, de sa forme et de la nature du terrain, caractérisé par sa résistivité.

4.2.1 Résistivité du terrain.

La résistivité d'un terrain exprimée en ohm-mètres est numériquement la résistance en ohms d'un cylindre de terrain de 1 m^2 de section et de 1 m de longueur. Elle dépend du taux d'humidité et de la température, variables avec les saisons. La granulation du terrain et sa porosité influencent le taux d'humidité. La résistivité d'un terrain augmente quand le taux d'humidité diminue. La sécheresse augmente également la résistivité des terrains, les effets de la dessiccation pouvant se faire sentir dans certains cas à une profondeur de plus de 2 mètres.

L'aspect superficiel du sol et sa végétation peuvent donner des indications sur le caractère plus ou moins favorable d'un terrain à l'établissement des prises de terre.

Pour une première approximation de la résistance d'une prise de terre, les calculs peuvent être effectués en utilisant les valeurs moyennes indiquées dans le tableau 7.

Nature du terrain	Valeur moyenne de la résistivité ($\Omega \cdot m$)
Terrains arables gras, rimbles compacts humides - - - - -	50
Terrains arables maigres, graviers, rimbles grossiers - -	500
Sols pierreux nus, sable sec, roches imperméables - - - -	3000

Tableau 7.

4-2-2 Calcul des résistances.

La résistance d'une prise de terre peut être calculée. Les calculs ont été simplifiés en formules mais conservent une certaine précision, parfois de l'ordre de 2/1000 à 3/1000. Dans les formules $r = \frac{\rho}{\pi n}$, les dimensions sont requises en centimètres, la résistivité ρ en ohms/cm², pour avoir la résistance en ohms.

a) Hémisphère de rayon a .

$$\overline{U} \quad R = \frac{\rho}{2\pi a}$$

b) Barre verticale de longueur L , de rayon a .

$$\bullet \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

c) Deux barres verticales distantes de ρ , $\rho > L$.

$$\bullet \bullet \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi \rho} \left(1 - \frac{L^2}{3\rho^2} + \frac{2L^4}{5\rho^4} \dots \right)$$

d) Deux barres verticales distantes de ρ , $\rho < L$.

$$\bullet \bullet \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{\rho} - 2 + \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} + \frac{\rho^4}{512L^4} \dots \right)$$

e) Barre horizontale de longueur $2L$ enfouie à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{---} \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{\rho} - 2 + \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} + \frac{\rho^4}{512L^4} \dots \right)$$

f) Barre en angle droit de bras L , enfouie à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{L} \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{\rho} - 0,2373 + 0,2146 \frac{\rho}{L} + 0,1035 \frac{\rho^2}{L^2} - 0,0424 \frac{\rho^4}{L^4} \dots \right)$$

g) Etoile, 3 branches, de bras L , enfouie à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{A} \quad R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{\rho} + 1,071 - 0,205 \frac{\rho}{L} + 0,238 \frac{\rho^2}{L^2} - 0,054 \frac{\rho^4}{L^4} \dots \right)$$

h) Etoile, 4 branches, de bras L , enfouie à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{+} \quad R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{\rho} + 2,312 - 1,071 \frac{\rho}{L} + 0,645 \frac{\rho^2}{L^2} - 0,145 \frac{\rho^4}{L^4} \dots \right)$$

i) Etoile, 6 branches, de bras L , enfouie à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{*} \quad R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{\rho} + 6,851 - 3,128 \frac{\rho}{L} + 1,758 \frac{\rho^2}{L^2} - 0,430 \frac{\rho^4}{L^4} \dots \right)$$

g) Etoile, 8 branches, de bras L , enfoncé à une profondeur $\rho/2$.

$$* R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{\rho} + 10,98 - 5,51 \frac{\rho}{L} + 3,26 \frac{\rho^2}{L^2} - 1,17 \frac{\rho^3}{L^3} \dots \right)$$

h) Anneau de diamètre D , réalisé avec un conducteur de diamètre d et enfoncé à une profondeur $\rho/2$.

$$\textcircled{O} R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{\rho} \right)$$

l) Plaque horizontale de longueur $2L$, largeur a , épaisseur b , $b \leq a/8$, enfoncé à une profondeur $\rho/2$.

$$\text{---} R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{\rho} - 1 + \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} + \frac{\rho^3}{512L^3} \dots \right)$$

m) Plaque ronde de rayon a , enfoncé horizontalement à une profondeur $\rho/2$.

$$\textcircled{\otimes} R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi a} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{\rho^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{\rho^4} \dots \right)$$

n) Plaque ronde de rayon a , enfoncé verticalement à une profondeur $\rho/2$.

$$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi a} \left(1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{\rho^2} + \frac{39}{320} \frac{a^4}{\rho^4} \dots \right)$$

o) Pilier métallique interconnecté par une structure métallique et enfoncé à une profondeur d' environ 1 mètre au plus.

où L : longueur enterrée du pilier, en mètres,

d : diamètre du cylindre circonscrit au pilier, en mètres,

ρ : résistivité du terrain en ohms-mètres.

$$R \text{ (ohms)} = 0,366 \frac{\rho}{L} \log_{10} \frac{3L}{d}$$

Voir référence 19 (Bibliographie) pour formule
 a 2 et référence 13 (Bibliographie) pour formu-
 le 5.

4.2.3. Prises de terre du Poste et du Neutre.

4.2.3.1. Prise de terre du poste R_p .

La prise de terre du poste R_p est constituée par
 le circuit de terre, placé en fond de fouille du bâti-
 ment. La valeur de la résistance R_p est fixée par la
 norme. Il faut envisager un amarrage entre enrou-
 lément MT et cuve du transformateur. En France, le
 distributeur d'énergie (EDF) limite la valeur du dé-
 faut terre à 1000 A pour le réseau souterrain et
 à 300 A pour le réseau aérien, par l'impédance Z
 (figure 13).

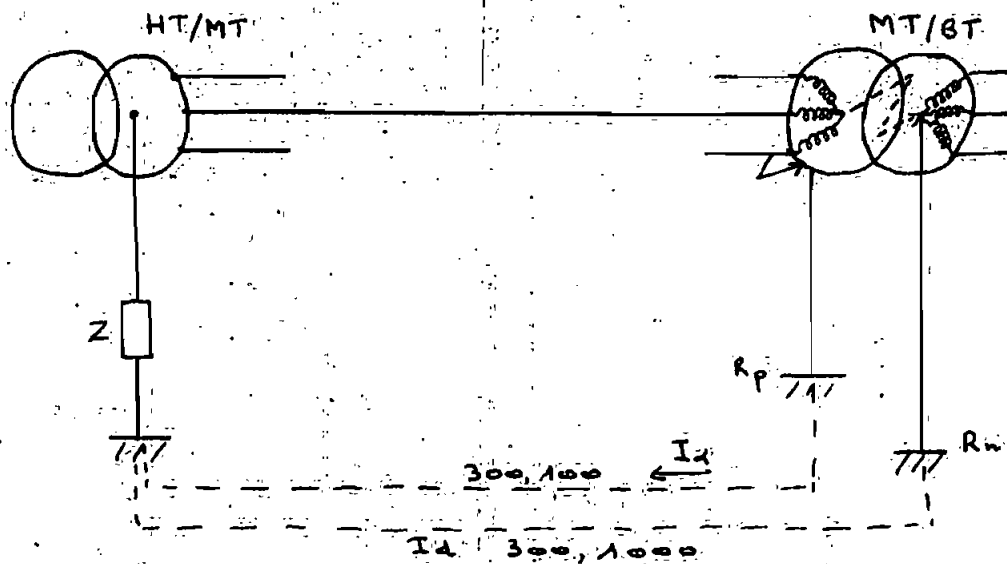


Figure 13.

La montée en potentiel des masses du poste, lors d'un défaut ne doit pas être limitée à la tension limite conventionnelle, car cela entraînerait une valeur de R_p irréalisable; mais à 3000 V (tension diélectrique Phase-Masse des bornes BT du transformateur) pour éviter la relation par la MT, de tensions dangereuses pour les utilisateurs BT.

Par conséquent :

$$R_p \leq \frac{3000}{300} = 10 \Omega \text{ (réseau aérien)}$$

$$R_p \leq \frac{3000}{1000} = 3 \Omega \text{ (réseau souterrain)}$$

4.2.3.2. Prise de terre du neutre R_n .

Sa valeur est fixée par la norme. Il faut envisager un amorçage MT/BT dans les enroulements du transformateur. La montée en potentiel du neutre par rapport à la terre est : $U = R_n I_d$. Pour le réseau 220/380 V, la tenue du matériel BT entre phase et masse est de 1250 V. La réalisation de la condition suivante permet d'éviter tout claquage diélectrique : Potentiel Phase-Terre ≤ 1250 V

$$R_n I_d + V \leq 1250 \text{ V}$$

$$R_n \leq \frac{1250 \text{ V} - 220 \text{ V}}{I_d}$$

Par conséquent :

$$R_n \leq \frac{1030}{300} = 3,4 \Omega \text{ (réseau aérien)}$$

$$R_n \leq \frac{1030}{1000} = 1 \Omega \text{ (réseau souterrain)}$$

4.2.3.3 Interconnexion des Terres.

L'interconnexion de R_n et R_p est subordonnée à la condition d'avoir une résistance équivalente inférieure ou égale à 1 Ohm, car la prise de terre sert alors pour le neutre et pour les masses du poste. Le poste est alors dit à masses reliées. Dans le cas de deux prises de terre distinctes et indépendantes, le poste est dit à masses séparées.

4.3. Conducteurs de protection.

4.3.1 Prescriptions générales.

Un conducteur de protection doit avoir une section minimale égale à

$$S (\text{mm}^2) = \frac{I}{d} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$$

où I : valeur efficace du courant de défaut phase (en ampères), c'est-à-dire le plus grand courant susceptible de parcourir le conducteur,

t : temps (en secondes) de fonctionnement du dispositif de coupure pour le courant I , pour $t \leq 5$,

d : coefficient égal à 13 si le conducteur de protection est en cuivre, à 8,5 s'il est en aluminium,

à 4,5 s'il est en fer et à 2,5 s'il est en plomb,
 Δθ : échauffement admissible du conducteur,
 soit 160°C si le conducteur est isolé, et 180°C
 si le conducteur est nu.

Les sections des conducteurs de protection
 sont en général choisies en fonction des sections
 des conducteurs de phase.

Section des phases, S _{ph}	Section du conducteur de protection
≤ 16 mm ²	S _{ph}
16, 25, 35 mm ²	16 mm ²
> 35 mm ²	$\frac{S_{ph} *}{2}$

* Prendre la valeur normalisée la plus proche.

Tableau 8-

Les valeurs du tableau 8 sont valables si les
 conducteurs actifs et de protection sont constitués
 du même métal. Dans le cas contraire, les sections
 des conducteurs de protection sont déterminés de
 façon à présenter une conductibilité équivalente à celle
 résultant de l'application du tableau.

Si le conducteur de protection ne fait pas partie
 de la canalisation d'alimentation, sa section ne doit

pas être inférieure à :

- $2,5 \text{ mm}^2$ s'il y a protection mécanique,
- 4 mm^2 s'il n'y en a pas.

Il peut être nu ou isolé; il peut avoir emprunté les canalisations des conducteurs actifs; mais dans ce cas il doit être isolé comme les autres conducteurs.

En schéma TN-B (pour les sections $\leq 25 \text{ mm}^2$), le conducteur de protection PE est séparé du conducteur de neutre mais de section égale. Le schéma TN-A est interdit pour des sections $\leq 16 \text{ mm}^2$.

Les masses doivent être reliées en dérivation et jamais en série avec les conducteurs de protection.

Certaines structures métalliques des bâtiments (charpentes métalliques) peuvent être utilisées comme conducteurs de protection si leur continuité est convenablement assurée et si leur conductibilité est au moins égale à celle résultant de l'équivalence des sections avec celles des conducteurs de phase.

4.3.2 Conducteurs et borne principale de terre.

Ils doivent satisfaire aux prescriptions précédemment indiquées. En outre la section d'un conducteur de terre ne doit pas être inférieure à :

- 16 mm^2 si le conducteur est en cuivre et nu.

- d'un revêtement le protégeant contre la corrosion,
- 25 mm² s'il est en cuivre nu,
- 50 mm² s'il est en aluminium ou en fer.

Les conducteurs en aluminium ou en fer ne doivent pas être entérés.

Les raccords utilisés pour relier les conducteurs de terre aux prises de terre, ne doivent pas endommager les éléments de la prise de terre (par exemple les tuyaux), ni les conducteurs.

Une barrette démontable peut être prévue pour permettre de mesurer la résistance de la prise de terre. Cependant il est préférable de prévoir une borne prise en dérivation, afin d'éliminer le risque lié à l'oubli de remettre la barrette.

Il doit également être prévue une borne principale de terre et des bornes de terre installées aux endroits appropriés pour connecter les conducteurs de terre et les autres conducteurs de protection. Le dispositif prévu pour mesurer la résistance de la prise de terre peut être combiné avec la borne principale de terre. Il doit être démontable seulement à l'aide d'un outil et doit être mécaniquement sûr et assurer la continuité électrique.

4.4 Éléments à relier à la prise de terre.

Les parties métalliques, à découvert et normalement isolées, des parties actives d'un appareillage fixe ou portable, doivent être mises à la terre. Doivent également être mises à la terre certaines parties métalliques de l'appareillage non électrique (châssis et rails de buses électriques), les boîtes d'instruments de mesure, de compteurs et de relais. Dans le câblage non métallique, il doit y avoir un raccordement à la terre à toutes les parties et toutes les boîtes métalliques doivent être mises à la terre.

Au niveau de terre du poste Rp seront raccordées toutes les masses des matériels MT et BT, y compris écran de câble, la cuve du transformateur, le point commun des TP et TC, le quadrillage métallique de la dalle, les parafoudres ou éclateurs (sauf cas exceptionnel pour ces derniers).

4.5 Réalisation des prises de terre.

4.5.1 Choix de la prise de terre.

Dans les constructions neuves, il est recommandé et particulièrement avantageux de réaliser une boucle à fond de fouille. Cette solution ne nécessite aucun travail de terrassement supplémentaire, élimine

le bassin, des contâles saisonniers, assure une bonne adhérence avec le sol, avec une résistance minimale de prise de terre.

Dans les bâtiments déjà existants, l'utilisation de prises de terre de fait, si elle n'est pas toujours réalisable, constitue néanmoins la solution idéale. Elle présente les avantages de sécurité (terres sûres, durables, peu résistantes) et d'économie de matériaux.

Les piquets verticaux ne nécessitent généralement pas de travaux importants si les piquets sont de faible longueur (2 à 3 m), et sont d'un avantage réel en présence de bonnes conductrices couches profondes du sous-sol. Ils sont déconseillés quand seulement la couche superficielle du sol est conductrice (sous-sol rocheux).

Est également déconseillé l'emploi de plaques minces enterrées. Elles nécessitent des travaux de terrassement importants. Cependant, il est préférable de les utiliser à l'occasion de travaux de terrassement effectués pour d'autres raisons.

Les tranchées horizontales se révèlent particulièrement intéressantes quand la nature du sol s'oppose à l'enfoncement de piquets verticaux.

4.5.2 Conditions à remplir

La liaison avec la terre doit se faire :

- avec la plus petite résistance possible afin de diminuer la tension masse-terre et assurer une bonne continuité électrique,
- avec un matériel offrant une grande résistance à la corrosion, pour sa conservation.

Les canalisations de terre doivent :

- éviter l'apparition de tensions dangereuses entre la masse et la terre, les conducteurs utilisés doivent donc présenter une faible résistance,
- éviter la détérioration, par échauffement, par effet mécanique, chimique ou électrochimique; par mauvais contact,
- être accessibles,
- assurer la continuité électrique du circuit de terre.

4.5.3 Mise à la terre des appareils amovibles

Elle est assurée par l'intermédiaire de l'appareil de raccordement (prise de courant ou boîte de jonction).

Dans le cas d'une prise de courant :

- la partie fixe reçoit, en dehors de la canali-

Partie fixe d'alimentation, le conducteur de terre,
 — la partie mobile et la canalisation souple
 permettant de relier électriquement la partie fixe à
 l'appareil mobile

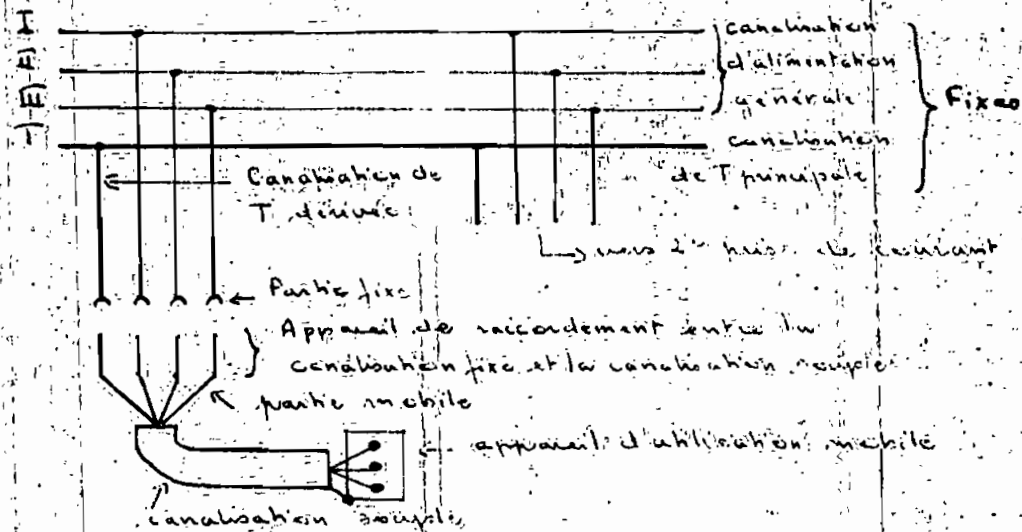


Figure 14.

La figure 14 donne l'exemple d'une installation
 comprenant :

- une canalisation d'alimentation,
- une canalisation de terre,
- une prise de courant tripolaire avec terre,
- une canalisation souple.

La figure 15 montre une prise de terre réalisée
 par un piquet vertical.



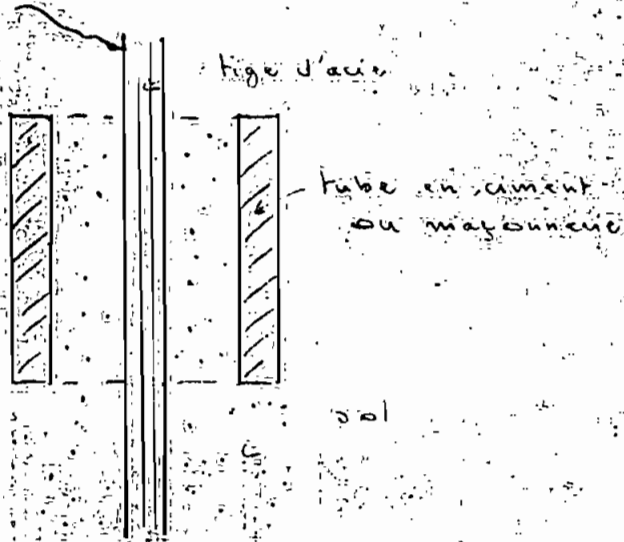


Figure 15.

5. MESURE ET ENTRETIEN DES PRISES DE TERRE.

La mesure et l'entretien des prises de terre visent à assurer le maintien du matériel en bon état et le bon fonctionnement des installations.

5.1 Mesure des prises de terre.

La résistance d'une prise de terre varie dans le temps. Il est donc essentiel de la mesurer périodiquement.

Les mesures relatives aux prises de terre permettent la vérification de l'efficacité des mesures de protection contre les contacts indirects. Elles concernent l'isolement, la résistance du terrain, la résistance des sols et l'impédance de la boucle de défaut.

5.1.1 Mesure de l'isolement.

Effectuées en courant continu pour éviter les effets polarisateurs du courant alternatif sur la matière, afin de ne pas fausser les résultats, les mesures d'isolement ont pour but de vérifier les qualités d'isolation des matériaux utilisés.

Généralement de l'ordre de 600 V, la tension

appliquée, au moins égale à la tension de crête de service est maintenue :

- entre conducteurs de polarités différentes,
- entre tous les conducteurs réunis ensemble et la terre.

La résistance d'isolement mesurée doit être au moins de 1000 ohms par volt de tension de régime, avec un minimum de 250 000 ohms, par longueur d'installation de 100 mètres, valeur correspondant à un courant de fuite inférieur à un milliampère.

Ces mesures sont effectuées à la mise en service, quand l'installation est hors tension. Or les variations de tension en fonctionnement, induites notamment par le fonctionnement des appareillages de commande ou de protection, les échauffements, les vibrations, etc..., changent sensiblement les valeurs d'isolement de la plupart des matériaux électriques.

Ces mesures constituent donc un renseignement pas très exact sur l'état d'isolement d'une installation en service. Idéalement les mesures doivent se faire en service normal. Cela est réalisé dans le régime à neutre non relié directement à la terre. En ce mo-

ment un contrôleur permanent d'isolement mesure continuellement l'isolement de l'installation et déclenche un signal quand le niveau d'isolement atteint un seuil critique correspondant effectivement à un défaut d'isolement.

Ceci n'est évidemment pas le cas des installations à neutre directement relié à la terre. Pour cette raison, les installations domestiques ne comportent aucun moyen permettant de contrôler leur niveau d'isolement. Les dispositifs de protection contre les surintensités et les dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel jouent alors le rôle de contrôleur du niveau d'isolement par la méthode du tout ou rien. Ces dispositifs coupent systématiquement l'alimentation quand le niveau d'isolement se révèle insuffisant.

Les dispositifs de protection contre les surintensités et les dispositifs à courant différentiel-résiduel intervenant, le premier quand l'isolement entre conducteurs de polarités différentes s'est abaissé pour laisser circuler un courant de défaut susceptible de prendre de très grandes valeurs, le second quand l'isolement par rapport à la terre devient

insuffisant et le courant de fuite dangereux pour les personnes et les biens. Ces dispositifs de protection doivent par conséquent être rigoureusement réglés à des valeurs appropriées conformément aux conditions imposées par la sécurité.

Pourquoi ne pas doter les installations domestiques et autres installations habituelles, des contrôleurs très modernes d'isolement en remplacement de la pratique actuelle jugée par certains un peu primitive? Il en découlerait certes un bon niveau d'isolement des installations, et partant une sécurité assurée. Mais à quel prix? Les dispositifs de surveillance d'isolement sont un peu perfectionnés et exigent un personnel qualifié capable d'exploiter les indications et renseignements fournis. Ce personnel n'est pas disponible dans les installations domestiques où la continuité du service revêt par ailleurs une importance relativement secondaire.

En clair, l'utilisation des dispositifs de coupure automatique de sensibilité appropriée se révèle la meilleure solution pour garantir la sécurité, et la vérification de ces dispositifs sera un complément indispensable aux mesures d'isolement.

5.1.2 Mesure de la résistance du terrain

La mesure de la résistance du sol permet de déduire la résistivité du terrain connaissant une résistance de pous. de terre.

Dans le montage de la figure 16, une tension E_1 est appliquée entre les électrodes A et C enfoncées de la même profondeur h dans le sol, et un courant I s'écoule. La fermeture du circuit s'effectue par C, appelée électrode de courant. On mesure ensuite la tension entre une électrode et une petite tige métallique P placée à 60% de la distance d entre les deux électrodes (d , $10h$).

P est appelée électrode de potentiel. Les électrodes A et C sont entourées de zones d'influence. Ce sont des surfaces équipotentielles dont la valeur décroît, avec la profondeur, pour tendre vers zéro. Dans le but d'éviter les erreurs de mesure, P doit être suffisamment éloignée de A et C, empêchant ainsi le recouvrement des zones d'influence aux potentiels non assimilables à zéro.

Comment alors déterminer les distances minimales? Comme l'approche théorique mène à des calculs complexes nécessitant des données pas très

Exactement connues, on procède expérimentalement. Considérons la figure 14. Exprimé en pourcentage, l'éloignement relatif de la prise de potentiel à A, est porté sur un axe horizontal. Les résistances déduites des mesures figurent sur l'axe vertical. D'après l'expérience, elles varient avec la distance, au voisinage de A comme au voisinage de C; et pour un certain écartement, la courbe présente un point d'inflexion à tangente horizontale, autour duquel la résistance varie faiblement (zone bc). La distance CA peut atteindre quelques dizaines de mètres.

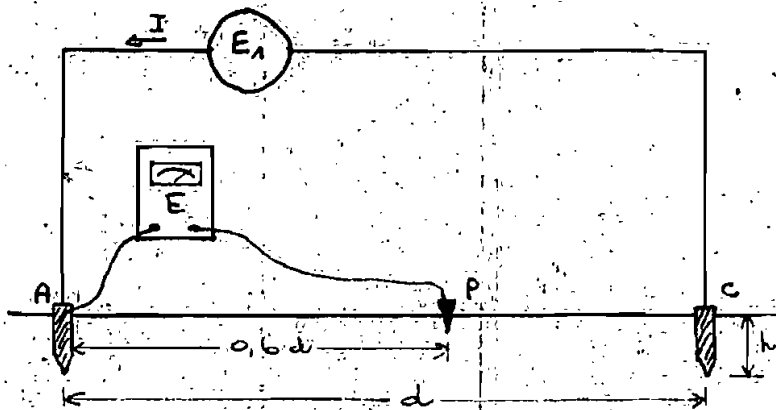


Figure 16. Mesure de la résistance du sol.

Le rapport E/I donne la résistance du sol au voisinage de l'électrode A. Cette résistance diminue de moitié quand la profondeur h augmente par un facteur 1,7; facteur tenant compte de l'existence dans le sol, des surfaces équipotentiels variables avec la

profondeur.

Cette méthode simple donne une précision suffisante. Mais il existe des méthodes plus élaborées. L'annexe 1 montre comment la résistivité se déduit de la mesure de la résistance du sol.

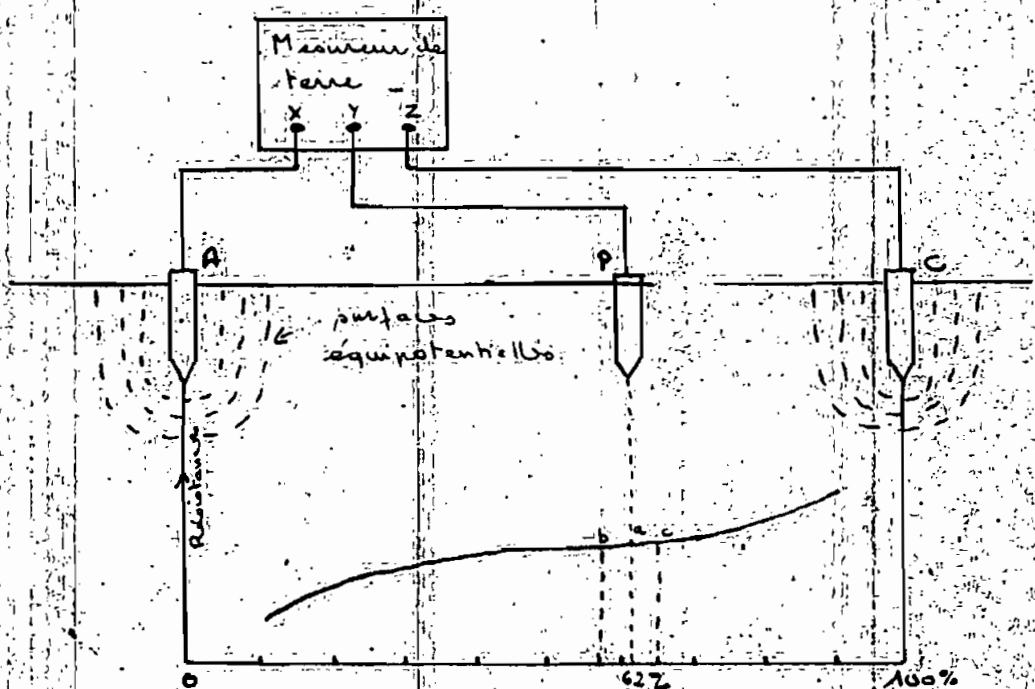


Figure 17.

5.1-3 Mesure de la résistance des sols.

Cette mesure a pour but de classer les locaux en conducteurs et non conducteurs. A l'issue de cette mesure, il peut être admis certaines dispenses de mesure de protection contre les contacts indirects, et en particulier l'emploi de matériels de la classe 0 ou 0I pourra être autorisé.

Il existe deux méthodes de mesure: la méthode dite A d'origine allemande et la méthode B utilisée dans le cadre de la réglementation des blocs opératoires des hôpitaux.

Dans la méthode A, la tension d'essai est alternative. Le principe est illustré à la figure 18. On peut utiliser l'électrode de mesure 1 (Voir NF C 15-100). Elle est constituée par une plaque métallique P carrée de 250 mm de côté et d'une toile humide carrée H d'environ 270 mm de côté, placée sous la plaque. Un corps de masse M d'environ 75 kg est posée sur l'électrode durant la mesure.

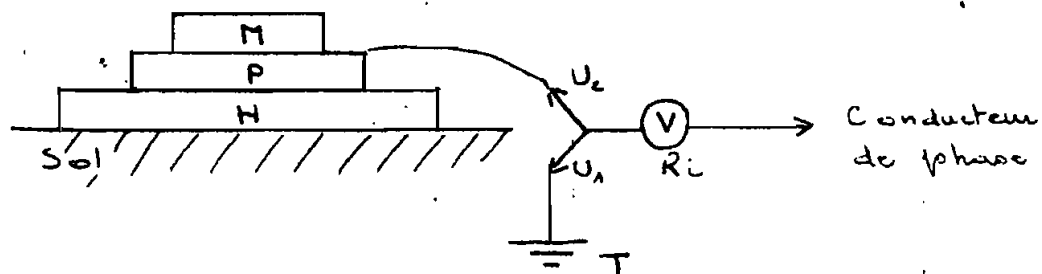


Figure 18. Principe de la méthode A et de l'électrode de mesure 1.

Un voltmètre de grande résistance interne R_i (> 3000 ohms) mesure successivement la tension:

— U_2 entre un conducteur de phase et la plaque métallique P,

— U_1 entre le même conducteur de phase et une prise de terre électriquement distincte, de résistance négligeable par rapport à R_i .

La résistance cherchée est alors :

$$R_0 = R_i \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Si le point neutre de l'installation est isolé de la terre, une des phases non utilisées pour les mesures peut être temporairement à la terre.

La méthode B utilise une tension d'essai continue.

Si on inverse les polarités de la source, les valeurs obtenues ne doivent pas varier sensiblement. Sinon, pour les mesures faites avec la polarité donnant la plus faible résistance, seront considérées.

Pour ces mesures on utilise un ohmmètre à magnéto donnant une tension à vide d'environ 500 volts en courant continu. On procède à la mesure de la résistance entre l'électrode et le conducteur de protection.

Dans un même local, au moins trois mesures de résistance sont effectuées, dont l'une est prise à 1 mètre au plus d'un élément conducteur, s'il en existe dans le local considéré.

Pour pouvoir considérer le sol comme isolant,

aucune de ces trois mesures ne doit donner une valeur inférieure à :

— 50 000 ohms si la tension nominale de l'installation n'est pas supérieure à 500 volts (300 volts par rapport à la terre) ;

— 100 000 ohms si la tension nominale de l'installation est supérieure à 500 volts (300 volts par rapport à la terre) ;

5.1.4 Mesure de l'impédance de la boucle de défaut.

Elle dépend de la nature des schémas des liaisons à la terre.

Dans le schéma TN (et dans le schéma IT, avec masses interconnectées), si les conducteurs de protection passent à proximité immédiate des conducteurs actifs, les conditions assurant la sécurité sont déterminées par calcul (voir les régimes de neutre).

La vérification porte donc sans ce cas sur les longueurs de canalisations de l'installation : elles ne doivent pas dépasser les longueurs maximales prévues dans les normes.

Par ailleurs, dans une installation où la section des conducteurs de protection égale celle des con-

ducteurs actifs, si les dispositifs de protection assurent contre les surcharges des canalisations, la vérification sera axée uniquement sur la tension de contact et pourra être effectuée lors de la vérification de l'efficacité des liaisons équipotentielles. La tension de contact ne doit pas dépasser la valeur maximale admissible.

Dans le schéma TT (et dans le schéma IT avec masses non interconnectées), la mesure de l'impédance de la boucle de défaut peut se ramener à la mesure de la résistance de la prise de terre des masses si l'on connaît la résistance de la prise de terre du point neutre, ou alors à la mesure effective de l'impédance (ou la résistance) de la boucle.

Le principe de la mesure de la résistance de prise de terre est illustré à la figure 19.

Une source indépendante de courant et deux puits de terre auxiliaires sont nécessaires. Cette méthode fait appel à des potentiels appelés tellurochrométries. Si elle peut être utilisée avant l'achèvement des constructions, son application demeure limitée dans les agglomérations où il est difficile de placer des puits de terre auxiliaires. Il est alors recommandé

de mesurer l'impédance de la boucle de défaut.

La mesure s'effectue avec des appareils appelés Ohmmètres de boucle. On distingue principalement deux types.

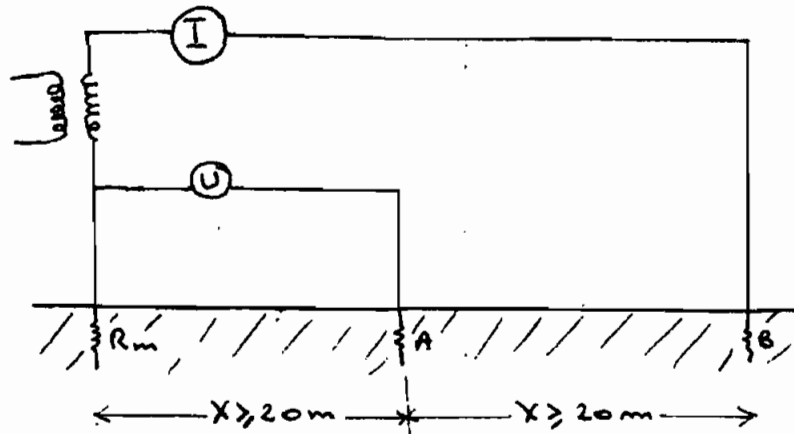


Figure 19. Mesure de la résistance d'une prise de terre par la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre.

a) Les appareils utilisant la tension du réseau. Ces appareils faisant circuler des intensités élevées, mesurent en un point, la différence entre la tension du réseau à vide supposée constante et la tension aux bornes d'une résistance insérée dans le circuit de mesure. Cette différence causée par la résistance de la boucle permet de déduire celle-ci.

Le principe est illustré à la figure 20.

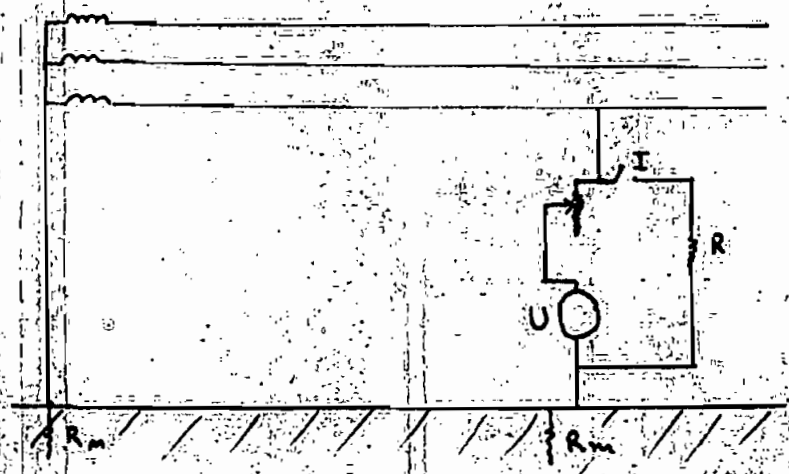


Figure 20. Principe d'un ohmmètre de boucle utilisant le réseau comme source d'alimentation.

Considérons le schéma de la figure 21 où Z désigne l'impédance de la boucle de défaut.

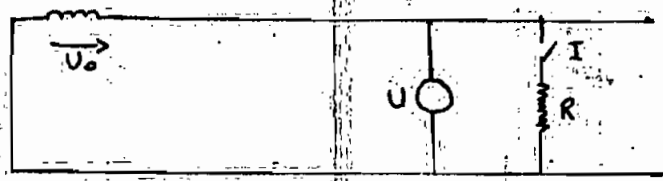


Figure 21.

Si l'interrupteur est ouvert, on mesure la tension du réseau à vide U_0 . Si l'interrupteur est fermé, le circuit est équivalent à un diviseur de tension et l'on mesure $U_1 = U_0 \frac{R}{R+Z}$, en considérant Z résistif.

$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_0} = \frac{R}{R+Z} \Rightarrow R+Z = \frac{U_0}{U_1} R \Rightarrow Z = R \left(\frac{U_0}{U_1} - 1 \right)$$

Les mesures doivent être confiées à un personnel

qualifié en raison des dangers présentés par les courants importants mis en jeu. Il est recommandé de débiter par les grandes valeurs de la gamme des résistances décroissantes de l'appareil, correspondant à des courants d'intensité croissantes. Cette méthode offre l'avantage de donner des résultats très précis.

b) Les appareils utilisant une source de courant auxiliaire. Cette source incorporée à l'appareil de mesure injecte un courant dans le réseau. La mesure de l'intensité du courant débité permet de déduire la résistance de la boucle de défaut.

En courant continu, deux mesures doivent être effectuées en inversant la polarité de la source. Ceci permet d'éliminer l'influence des tensions parasites, et des propriétés semi-conductrices de la partie de la boucle comprise dans la terre.

L'efficacité d'une liaison équipotentielle supplémentaire est vérifiée par une mesure de sa résistance par un ohmmètre. La résistance R entre toute masse considérée, et toute autre masse ou tout élément conducteur simultanément accessibles doit être inférieure ou égale à :

$$R \leq \frac{U_c}{I_c}$$

où I_c : tension de contact présumée,

La courbe de réglage du dispositif de protection.

Les résistances mesurées par ces divers appareils sont assimilables aux impédances. Mais des appareils élaborés mesurent effectivement l'impédance de la boucle de défaut. Ils mesurent alors les impédances cycliques directe, inverse et homopolaire de la boucle.

5.2 Entretien des prises de terre.

Il repose sur deux points essentiels :

- des vérifications fréquentes,
- le remplacement régulier des matériels défectueux.

Les vérifications doivent faire l'objet de visites d'inspection régulières et se traduire par les mêmes mesures précédemment, concernant l'isolement, la résistance du terrain, la résistance des pôle, l'impédance de la boucle de défaut.

La continuité électrique des conducteurs de protection doit également être vérifiée. On devra s'assurer du bon état des connexions en raison des risques de desserage. Si la mesure de l'impédance de la boucle de défaut est effectuée aux points de raccordement des masses des appareils, elle permet en général de vérifier en même temps la continuité des conducteurs de protection.

La prise de terre en profondeur doit faire l'objet
d'un arrosage fréquent avec de l'eau, précédé et
suivi de la mesure de la résistance.

CONCLUSION

La sécurité dans les installations électriques, au regard des effets physiologiques du courant électrique, sans compter les risques de destruction des matériels, est un problème très important.

A ce titre, elle intéresse tout le monde. Les utilisateurs de l'énergie électrique doivent être davantage sensibilisés sur les divers aspects de la sécurité. Cela contribuerait largement à limiter les dégâts, car un bon nombre d'accidents d'origine électrique relèvent de l'ignorance.

Par ailleurs, les accidents peuvent être limités si les électriciens, bien formés, sont incités à effectuer des contrôles fréquents et réguliers dans le cadre des programmes d'entretien.

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Cette partie sera axée sur trois points.

Nous suggérons tout d'abord la diminution de la valeur de la résistance de prise de terre par l'interconnexion générale des prises de terre, spécialement établies ou de fait. Cela va dans le sens de la sécurité.

Par ailleurs, le procédé consistant à créer volontairement un court-circuit entre un conducteur de phase et une masse afin de vérifier le fonctionnement correct du dispositif de coupure, est à déconseiller fortement, en raison des dangers présentés pour les personnes et les biens.

Nous suggérons enfin, aux entreprises réalisant des prises de terre, de procéder au calcul, au moins approximatif, des résistances de prises de terre. A cause de la variation de la résistivité d'un terrain à l'autre, le tube galvanisé de trois mètres généralement utilisé par les techniciens de FORCELEC pour obtenir une résistance de terre d'environ 10Ω , dépasse parfois cette valeur, quand la résistivité du terrain augmente ils mettent alors un autre tube en parallèle

avec le premier. Un calcul simple leur aurait permis d'économiser du matériau et d'autre part d'éviter un travail supplémentaire.

APPENDICE 1.

Détermination de la résistivité des sols latéritiques.

L'appareil utilisé, le METRIX VX 425 A, mesure la résistance du sol dont on en déduit la résistivité.

1. Principe de la mesure.

Il est illustré par le schéma électrique de la figure 22.

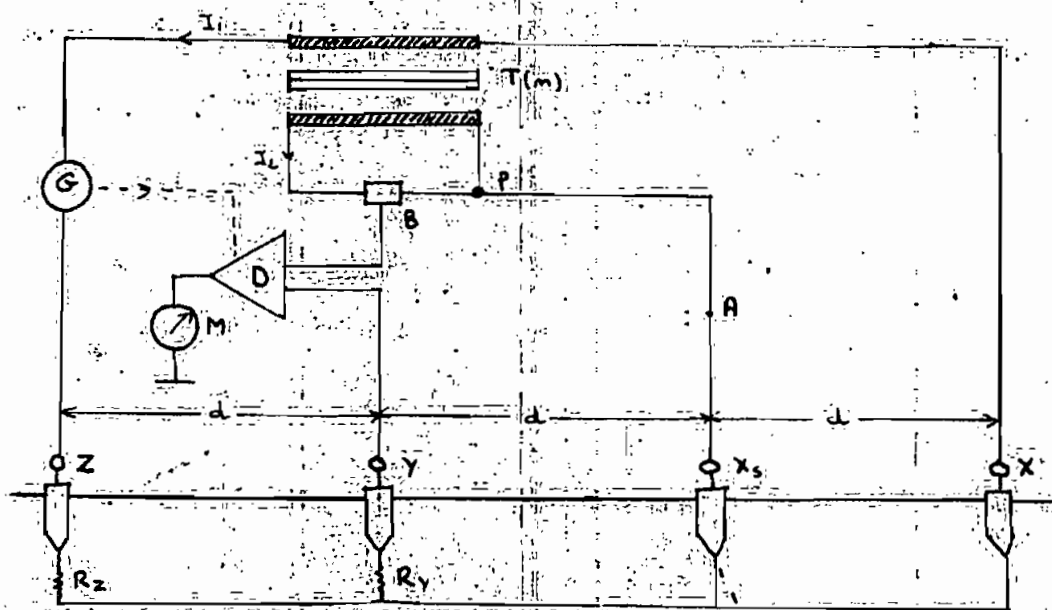


Figure 22. Schéma électrique du principe de la mesure.

Quatre piquets distants d'au moins 20 mètres sont placés sur le même alignement.

Si l'on veut mesurer la résistance de la terre en un point, X_s , il se pose le problème d'accéder à l'autre borne de la résistance située dans le sol, en un point fictif O représentant le sol lointain inaccessible. Pour résoudre ce problème, deux prises de terre auxiliaires Y et Z sont utilisées. Les distances entre chacune de ces prises et les autres doivent être suffisamment grandes (au moins 20 m) pour obtenir la résistance globale des sols comportant des obstacles, d'une part, et de l'autre éviter les effets des gradients de potentiel observés au voisinage des piquets.

Le générateur G délivre une tension alternative de fréquence 230 Hz. Le détecteur de zéro, synchronisé du générateur, rejette les courants telluriques parasites aux fréquences industrielles et à leurs harmoniques (50, 100, 150 Hz...), loin de 230 Hz.

Les résistances de terre R_Y et R_Z sont sans influence sur la mesure. Y est inséré dans le circuit OYB dans lequel le courant est nul à l'équilibre. Z a pour seul effet de modifier simultanément et dans la même proportion les tensions AO et AB .

dont on veut réaliser l'égalité. Cependant les tenus Y et Z réduisent les courants dans les circuits de mesure et diminuent ainsi la sensibilité du système en réduisant l'amplitude des déviations du galvanomètre de mesure. La précision des mesures est de $\pm 2\%$ de la gamme de mesure à $23^\circ \pm 1^\circ$.

Le transformateur $T(m)$ réduit le courant I_1 à $I_2 = \frac{I_1}{m}$. I_2 passe dans le potentiomètre P. Le curseur B de ce potentiomètre, élevé alors au potentiel $V_{AB} = R_{AB} I_2 = R_{AB} \frac{I_1}{m}$, est réglé de façon à obtenir zéro sur le galvanomètre M. En ce moment $V_{AY} = V_{AB}$. La tension étant nulle entre Y et O,

$$V_{AY} = V_{X_5 O} = R I_1 = V_{AB} = R_{AB} I_2 = R_{AB} \frac{I_1}{m}$$

On en déduit la résistance du sol entre X_5 et O: $R = \frac{R_{AB}}{m}$.

2. Application à la détermination de la résistivité.

Sur la figure 22, le piquet X assure le retour du courant et le piquet Y matérialise le point fictif représentant le sol lointain au potentiel zéro. La distance entre piquets étant suffisamment grande, Y est pourtuit des surfaces équipotentielles autour du piquet X_5 (voir mesure et entretien des prises de terre).

On peut alors considérer un condensateur hémisphérique de capacité C, constitué de deux

électrodes centrées en X , de rayons $r_1 = d$ et $r_2 = 2d$, respectivement aux potentiels V_1 et $V_2 = 0$. L'espace entre les deux électrodes renferme le sol de résistance R , de résistivité ρ et de permittivité diélectrique ϵ .

Soit \vec{E} le champ électrique entre les armatures aux potentiels V_1 et V_2 et portant les charges $+Q$ et $-Q$. En appliquant le théorème de Gauss à une surface fermée Σ entourant l'armature interne, il vient :

$$\iint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{Q}{\epsilon \epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} C (V_2 - V_1) \quad (1)$$

où ϵ_0 désigne la permittivité diélectrique du vide.

Par ailleurs Σ est traversé par un courant :

$$I = \frac{V_2 - V_1}{R} = \iint_{\Sigma} \vec{j} \cdot \vec{ds} = \iint_{\Sigma} \gamma \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{1}{\rho} \iint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \vec{ds}$$

où \vec{j} la densité de courant,

γ : la conductibilité.

$$\text{d'où : } \iint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \rho \frac{V_2 - V_1}{R} \quad (2)$$

Egalant les seconds membres des relations (1)

et (2), il vient : $\frac{1}{\epsilon \epsilon_0} C (V_2 - V_1) = \rho \frac{V_2 - V_1}{R}$

et finalement $C R = \rho \epsilon \epsilon_0 \quad (3)$

La capacité d'un condensateur hémisphérique

étant égale à $C = 2\pi \epsilon \epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$, (3) devient :

$$2\pi \epsilon \epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} R = \rho \epsilon \epsilon_0$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho}{2\pi} \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \\ &= \frac{\rho}{2\pi} \frac{r_2^2 \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)}{r_1^2 \left(\frac{r_1}{r_2} + 1\right)} \quad (4) \end{aligned}$$

Si v_2 tend vers l'infini (pol. Loubain), de (4) on tire :

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{1}{v_2} = \frac{\rho}{2\pi d} \Rightarrow \rho = 2\pi d R$$

Par cette formule, la résistance mesurée permet donc de déduire la résistivité du terrain.

3. Mesures et résultats.

Les mesures effectuées sur les polo latéritiques de l'E.P.T., ont donné les valeurs de R (en Ω) suivantes, à l'échelle 10 de l'appareil, pour $d = 16$ mètres :

47, 45, 46, 46, 46, 46, 47, 47.

La précision étant de $\pm 2\%$ de la gamme (0-100 Ω), l'erreur absolue sur la mesure sera : $\pm 2 \Omega$.

La moyenne des x_i mesurées est :

$$\bar{x} = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i} \quad \text{ou } f_i \text{ désigne la fréquence.}$$

$$\bar{x} = \frac{1 \times 45 + 4 \times 46 + 3 \times 47}{8} = 46,25$$

L'écart-type σ écrit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum f_i}}$$

$$= \sqrt{\frac{1(45 - 46,25)^2 + 4(46 - 46,25)^2 + 3(47 - 46,25)^2}{8}}$$

$$= 0,66$$

La plus grande et la plus petite valeurs seront respectivement : $(46,25 + 0,66) \pm 2$ et $(46,25 - 0,66) \pm 2$.

Finalement R sera compris entre 43,59 et 48,91 ohms.

Donc $R = 46,25 \pm 2,66$

Avec $p = 2\pi d R$ et $d = 16$ mètres,

$p = 4650 \pm 267$ m

Cette valeur donne la résistante des pôles laté-
ritiques, à partir des mesures prises à l'É. P. II

APPENDICE 2

Différents termes relatifs aux mises à la terre.

Les définitions suivantes sont adoptées par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et par l'Union Technique de l'Electricité (UTE).

Borne de terre de l'installation: borne de connexion des conducteurs de protection de l'installation au conducteur principal de protection.

Choc électrique: effet pathophysiologique résultant du passage d'un courant électrique à travers le corps humain.

Conducteur actif: conducteur affecté à la transmission de l'énergie électrique, y compris le conducteur neutre en courant alternatif et le compensateur en courant continu.

Conducteur de mise à la terre du neutre: conducteur reliant un point du conducteur neutre à une prise de terre.

Conducteur neutre: conducteur relié au point neutre et susceptible de transporter de l'énergie.

Conducteur PEN: conducteur assurant à la fois les fonctions de conducteur neutre et de conducteur de

protection.

Conducteur de protection: conducteur utilisé dans certaines mesures de protection contre les contacts indirects et reliant des masses.

- soit à d'autres masses,
- soit à des éléments conducteurs,
- soit à des prises de terre, à un conducteur relié à la terre, ou à une partie active reliée à la terre.

Conducteur principal de protection: conducteur de protection auquel sont reliés les conducteurs de protection des masses, les conducteurs de terre et éventuellement les conducteurs de liaisons équipotentielles.

Conducteur de terre: conducteur de protection relié à une prise de terre.

Contact direct: contacts des personnes avec les parties actives des matériels électriques.

Contact indirect: contacts des personnes avec des masses mises accidentellement sous tension.

Courant de court-circuit: surintensité produite par un défaut d'impédance négligeable entre des points présentant une différence de potentiel en service normal.

Courant de défaut: courant résultant d'un défaut.

de l'isolation ou du franchissement de l'isolation.

Courant différentiel-résiduel: valeur efficace de la somme vectorielle des courants parcourant tous les conducteurs actifs d'un circuit en un point de l'installation électrique.

Courant de fuite: courant qui s'écoule dans un circuit électriquement sain, à la terre, ou à des éléments conducteurs.

Défaut: liaison accidentelle, d'impédance non négligeable, entre deux points de potentiels différents, par exemple défaut d'isolement.

Défaut à la terre: lorsque l'un de ces points est la terre, le défaut est dit défaut à la terre.

Éléments conducteurs: éléments conducteurs étrangers à l'installation électrique, mais pouvant propager un potentiel:

- éléments métalliques de la construction,
- conduites métalliques de gaz, d'eau, de chauffage, de ventilation, etc...
- les appareils métalliques qui leur sont reliés (radiateurs, etc...)
- pote et parois non isolants.

Impédance de la boucle de défaut: impédance

totale offerte au passage du courant résultant d'un défaut.

Isolation: ensemble des isolants entrant dans la construction d'un matériel pour isoler les parties actives.

Isolation (double): isolation comprenant à la fois une isolation principale et une isolation supplémentaire.

Isolation principale: isolation nécessaire pour assurer le fonctionnement convenable d'un matériel et sa protection contre les contacts directs.

Isolation renforcée: isolation ayant des propriétés mécaniques et électriques telles, qu'elle peut être considérée comme équivalente à une double isolation.

Isolation supplémentaire (de protection): isolation indépendante de l'isolation principale et destinée à assurer la protection contre les contacts indirects en cas de défaut de l'isolation principale.

Installation électrique: l'installation électrique est constituée par l'ensemble des circuits de toutes tensions et natures, de courant associés en vue de l'utilisation de l'énergie électrique.

Installation de mise à la terre: ensemble d'une prise de terre ou de plusieurs prises de terre interconnectées et des conducteurs de protection et conducteurs de terre correspondants.

Liaison équipotentielle: liaison électrique spéciale destinée à mettre au même potentiel, ou à des potentiels voisins, des masses ou des éléments conducteurs.

Masses: partie conductrice susceptible d'être touchée et normalement isolée des parties actives mais pouvant être mise accidentellement sous tension.

Matériel de la classe 0: matériel ayant une isolation principale mais n'ayant pas en toutes ses parties une double isolation ou une isolation renforcée, et ne comportant pas de dispositions permettant de relier les parties métalliques accessibles, s'il en existe, à un conducteur de protection.

Matériel de la classe I: matériel ayant ou moins une isolation principale en toutes ses parties et comportant l'ensemble des dispositions permettant de relier ses parties métalliques accessibles à un conducteur de protection.

Matériel de la classe II: matériel dont les parties

accessibles sont séparées des parties actives par une isolation ne comprenant que des éléments à double isolation ou à isolation renforcée, et ne comportant pas de dispositions permettant de relier les parties métalliques accessibles, s'il en existe, à un conducteur de protection.

Matériel de la classe III: matériel prévu pour être alimenté sous une tension ne dépassant pas les limites du domaine I (très basse tension) et n'ayant aucun circuit ni interne ni externe fonctionnant sous une tension supérieure à ces limites.

Niveau d'isolement d'une installation: tension de tenue à fréquence industrielle de l'élément le plus faible de l'installation.

La tension de tenue à fréquence industrielle est prise égale à la tension d'essai diélectrique dont la valeur est fixée par les règles correspondantes des matériels.

Le niveau d'isolement d'une installation ne doit pas être confondu avec la résistance d'isolement.

Prise de terre: toute pièce ou tout ensemble de pièces conductrices enfouies dans le sol assurant une liaison électrique efficace avec la terre.

Prises de terre électriquement distinctes: prises de terre suffisamment éloignées les unes des autres pour que le courant maximal susceptible d'être écoulé par l'une d'entre elles ne modifie pas sensiblement le potentiel des autres.

Tension de contact: tension apparaissant, lors d'un défaut d'isolement, entre des parties simultanément accessibles.

Tension de défaut: tension qui apparaît, lors d'un défaut d'isolement, entre une masse et une prise de terre de référence, c'est-à-dire un point dont le potentiel n'est pas modifié par la mise sous tension de la masse.

BIBLIOGRAPHIE.

Volumes.

1. Code canadien de l'électricité. ACNOR. 12^e édition.
2. Electricité. JOYAL et PROVOST.
3. Electricité générale. C. COUCHET, Ph. DURAND,
J. GELARD, A. ZVENIGOROSKY.
Masson et Cie, 1969.
4. Electrical Installations Handbook. Siemens, 1969.
5. Electrical Systems and Equipment for Industry.
MOORE et ELONKA.
6. Electrotechnique. Th. WILD.
Presses de l'Université de Laval, 1978.
7. Encyclopedia of Science and Technology. Volume 6.
pages 312 à 323.
8. Encyclopédie de l'électricité. Tome 2.
pages 312 à 315.
9. L'équipement électrique des bâtiments. Cl. REMOND.
Eynelles, 1980.
10. Guide de l'installation électrique.
Merlin Gerin, janvier 1982.
11. IEEE Recommended Practice for Electrical Power
Distribution for Industrial Plants.

12. IEEE Recommended Practice for Grounding.
13. Installations électriques à Basse Tension - Règles.
NF C 15-100 - Union Technique de l'Electricité.
Edition janvier 1977 - Chapitre 54.
14. Les installations électriques dans le bâtiment.
Cl. REMOND. Eyrolles, 1975.
15. Les installations électriques en Moyenne Tension.
J. BOULOUVARD. Entreprise Moderne d'Edition, 1964.
16. Norme pour Postes de transformation HT/BT.
Norme C 13-100.
17. Technologie d'Electricité. Tome 3.
HEINY et ANDY.
18. Techniques de l'Ingénieur. Tome D5.
pages 720-13 à 720-22
pages 723-1 à 723-6
- Articles.
19. Calculation of Resistances to Ground. H. B. DWIGHT.
Electrical Engineering, Decembre 1936. page 1325.
20. Mesures de terre: principes et moyens. R. RATEAU.
Electronique Applications N° 35. pages 101 à 104.
21. Méthode de mise à la terre à haute résistance et
détection de pertes à la terre. Liwet d'instruction.
Westinghouse Canada. Août 1975.

22. Régimes du neutre dans une installation BT.

CFP Merlin Gerin. Stage G. Chapitre K

23. La protection des personnes et des biens

contre les dangers du courant électrique

BBC. Cie Electro-Mécanique

24. Notes de cours Installation électrique

R. MARTIN, professeur à l'E.P.T.