



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**

MEMOIRE DE MASTER

**Présenté par : Sidamine yacoub abdelwedoud
Boubacar Ahmed Sid'Ahmed**

**DOMAINE : ELECTROTECHNIQUE
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ELECTROTECHNIQUE INDUSRIELLE**

Thème

**Prévention contre les risques électriques des lignes
électriques avec un système mise à la terre .**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr :mekhaneth Mohammed	MC(A)	Président
Mr : bessedik sid ahmed	MA(A)	Examineur
Mr : Djekidel Rabah	MC(A)	Encadreur
Mr : BENSACI Ahmed	MC(A)	Co-encadreur

Promotion : JUIN 2022

Remerciements

Tout d'abord je remercie le bon ALLAH tout puissant de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il m'a accordée tout au long de nos études.

*Je tiens à remercier cordialement, mon cher encadreur Monsieur **DJEKIDAL Rabah** et mon cher co-encadreur **BENSACI Ahmed** pour leur précieuse collaboration et leurs conseils pertinents, qu'ils n'ont cessé de nous donner tout au long de l'élaboration de ce modeste travail, ils nous ont toujours été à l'écoute et disponibles même en dehors des heures de travail*

*Mes plus vifs remerciements vont aux membres du jury. A monsieur **MEKHLANETH Mohammed**, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. A Monsieur **BESSEDIK Sid Ahmed** d'avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.*

Enfin, je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

SIDAMINE Yacoub Abdelwedoud / BOUBACAR Ahmed Sid'Ahmed

DEDICACE

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

☉ *A nos très chers **P**arents ;*

☉ *A nos frères et sœurs ;*

☉ *A tous nos amis et collègues de spécialité ELTI ;*

Nous vous remercions tous.

Table Des Matières		Page
Remerciements		i
Dédicace		ii
Table des matières		iii
Table des figures		viii
Résumé		x
Introduction générale		01
Chapitre I : Généralité sur les réseaux électriques		
I.1. Introduction		04
I.2. Généralité sur le réseau électrique		04
I.2.1. Définition du réseau électrique		04
I.2.2. Production d'énergie électrique		05
I.2.3. Transformation d'énergie électrique		05
I.2.4. Sources d'énergie		06
I.2.4.1. Energies renouvelables		06
I.2.4.2. Energies non renouvelables		06
I.2.5. Transport d'énergie électrique		08
I.2.6. Répartition et distribution		09
I.2.7. Niveaux de tension		09
I.3. Type des réseaux électriques		09
I.3.1. Réseau maillé		10
I.3.2. Réseau bouclé		10
I.3.3. Réseau radial		11
I.4. Les éléments indispensables du réseau électrique		12
I.4.1. Les pylônes		12
I.4.2. Lignes aériennes		12
I.4.3. Les chaînes d'isolateurs		13
I.4.4. Les câbles de garde		14

I.4.5. Les câbles souterrains	14
I.4.6. Postes électriques	14
I.4.7. Les transformateurs	15
I.4.8. L'interconnexion (dispatching)	16
I.5. Appareillage électrique	16
I.5.1. Appareil d'isolement (Sectionneur porte fusible)	16
I.5.2. Appareil de commande (Contacteur)	17
I.5.3. Appareil de protection	17
I.5.3.1. Fusible	17
I.5.3.2. Disjoncteur	17
I.5.3.3. Relais thermique	18
I.6. Défauts de fonctionnement	18
I.6.1. Définition d'un défaut électrique	18
I.6.2. Origine de défauts	18
I.6.3. Caractéristiques des défauts	19
I.6.4. Nature des défauts	19
I.6.4.1. Défauts fugitifs	19
I.6.4.2. Défauts permanents	19
I.6.4.3. Défauts auto-extincteurs	19
I.6.4.4. Défauts semi-permanents	19
I.6.5. Conséquences des défauts sur le réseau électrique	20
I.6.5.1. Fonctionnement des réseaux électriques	20
I.6.5.2. Tenue de matériel	20
I.6.5.3. Qualité de la fourniture	20
I.6.5.4. Sécurité des personnes	21

I.6.5.5. Contraintes supplémentaires pour la protection	21
I.6.6. Qualités principales d'une protection électrique	21
I.6.6.1. Rapidité d'élimination des défauts	21
I.6.6.2. Sélectivité d'élimination des défauts	22
I.6.6.3. Sensibilité de protection	22
I.6.6.4. Fiabilité de protection	22
I.7. Conclusion	23
Chapitre II :prévention contre les défauts électriques	
II.1. Introduction	26
II.2. Risque électrique	26
II.2.1. Définition du risque électrique	26
II.2.2. Electrisation et électrocution	27
II.2.3. Facteurs de gravité	27
II.2.4. Résistance électrique du corps humain	28
II.3. Les effets physiologiques du courant électriques	29
II.3.1. Effet thermique	30
II.3.2. Effets téτανisant	30
II.3.3. Effets respiratoires et circulatoires	30
II.3.4. Effets des accidents d'origine électrique sur le corps humain	30
II.4. Les types des contacts (d'exposition)	31
II.4.1. Les contacts directs	31
II.4.2. Les contacts indirects	31
II.5. Prévention du risque électrique	32
II. 5 .1. Protection contre les contacts directs	32
II. 5.1.1. Éloignement	32
II. 5.1.2. Barrière ou enveloppe	32
II. 5.1.3. Isolation des parties actives	32

II. 5.2. Protection contre les contacts indirects	32
II. 5.2.1. Mise à la terre des masses des récepteurs	33
II. 5.2.2. Dispositifs de protection à courant différentiel résiduel (DDR)	33
II.5.2.3. Protection par séparation des circuits	34
II. 5.3. Les équipements de protection et de sécurité	35
II. 5.3.1. Les équipements de protection individuelle	35
II. 5.3.1.1. Equipement d'un électricien	35
II. 5.3.1.2. Les équipements individuels de sécurité	35
II. 5.3.2. Les équipements de protection collective	36
II.6. Les régimes de neutre	36
II.6.1. Définition du régime de neutre	36
II.6.2. Régime du neutre TT	37
II.6.2.1. Régime du neutre. Calcul d'une installation : vérification de la protection pour un défaut simple, franc	39
II.6.2.1.1. Calcul de la tension de contact	39
II.6.2.1.2. Détermination du temps de coupure	39
II.6.2.1.3. Calcul du courant de défaut	40
II.6.2.1.4. Choix de la sensibilité du D.D.R.	40
II.6.3. Régime du neutre IT	41
II.6.4. Régime du neutre TN	42
II.7. Calcul de la résistance de mise à la terre	46
II.8. Tensions de contact et de pas	47
II.8.1. Tension de contact	47
II.8.2. Tension de pas	47
II.9. Conclusion	48
Chapitre III :Analyse et interprétation des résultats	

III.1 Introduction	50
III.2. Calcul de la résistance de système de mise à la terre	50
III.2. 1. Effet de la résistivité du sol	50
III.2. 2. Effet du rayon de l'électrode de la prise de terre	51
III.2. 3. Effet de la longueur de l'électrode de la prise de terre	52
III.2. 4. Effet de la profondeur de l'électrode de la prise de terre	53
III.3. Mise en évidence d'un défaut d'isolement	53
III.4. Protection contre le défaut d'isolement	62
III.4. 1. Protection par le système de mise à la terre	62
III.4. 2. Protection par un disjoncteur magnétothermique	63
III.4. 3. Protection par un disjoncteur différentiel résiduel (DDR)	65
III.5. Protection contre les contacts indirects avec les régimes de neutre	66
III.5.1. Cas du régime neutre TT	66
III.5.2. Cas du régime neutre TN	68
III.5.3. Cas du régime neutre IT	71
III.6. Conclusion	72

Table Des Figures		page
CHAPITRE I		
Figure I.1: Typologie d'un réseau électrique		05
Figure I.2: Centrale solaire		07
Figure I.3: Centrale thermique au gaz		07
Figure I.4: Réseau maillé		10
Figure I.5: Réseau bouclé		11
Figure I.6: Structure en coupure d'artère		12
Figure I.7: Réseau radial		12
Figure II.8 : Pylône THT pour une ligne de 400kV		13
Figure II.9: Chaîne d'isolateurs à long fût		13
Figure I.10: Structure d'un poste électrique		15
Figure II.11 : Transformateur de puissance d'un poste électrique HT		15
Figure I.12: Fiabilité d'une protection électrique		23
Figure I.13: Association de protection électrique		23
CHAPITRE II		
Figure II.1: Variation de la résistance du corps humain en fonction de la tension de contact et de l'état de la peau		28
Figure II.2: Relation entre le temps de passage du courant et l'intensité du courant		29
Figure II.3: Contact direct		31
Figure II.4: Contact indirect		31
Figure II.5: Principe de fonctionnement d'un disjoncteur différentiel		34
Figure II.6: Transformateur de séparation		34
Figure II. 7: Représentation du régime de neutre TT		38
Figure II. 8: Schémas simplifiée du régime de neutre TT		39
Figure II. 9: Représentation du régime de neutre IT		41
Figure II. 10: Contrôleur Permanent d'Isolément		42
Figure II. 11: Recherche du défaut par un générateur de courant très basse fréquence		42
Figure II. 12: Représentation du régime de neutre TNC		43
Figure II. 13: Représentation du régime de neutre TNS		43
Figure II.14: Présence d'un défaut d'isolement dans un régime du neutre TNS		44
CHAPITRE III		
Figure III.1: Résistance de mise à la terre en fonction de la résistivité du sol		51
Figure III.2: Résistance de mise à la terre en fonction du rayon de l'électrode		51
Figure III.3: Résistance de mise à la terre en fonction de la longueur de l'électrode		52
Figure III.4: Résistance de mise à la terre en fonction de la profondeur de		52

l'électrode du câble horizontal	
Figure III.5: Représentation de la boucle de défaut dans le circuit électrique	53
Figure III.6: Variation du courant de défaut (courant corporel) avec la résistance corporelle	55
Figure III.7: Variation de la tension de contact avec la résistance corporelle	55
Figure III.8: Schéma équivalent du circuit électrique en cas de mise à la terre de la carcasse	56
Figure III.9: Schéma équivalent du circuit électrique en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse	57
Figure III.10: Tension de contact de la personne en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse.	58
Figure III.11: Courant de défaut en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse	58
Figure III.12: Courant corporel en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse	59
Figure III.13: Courant de défaut en cas d'une résistance appropriée de mise à la terre du neutre et de la carcasse avec une valeur	59
Figure III.14: Tension de contact en cas d'une résistance de mise à la terre appropriée du neutre et de la carcasse	60
Figure III.15: Courant corporel en cas d'une résistance appropriée de mise à la terre du neutre et de la carcasse	60
Figure III.16: Temps de la fibrillation ventriculaire en fonction du courant corporel	61
Figure III.17: Tensions de contact et de pas pour un corps humain pesant plus de 70 kg	61
Figure III.18: Tensions de contact et de pas pour un corps humain pesant moins de 70 kg	62
Figure III.19: Tension de contact en cas d'une résistance de mise à la terre réduite	63
Figure III.20: Courant corporel en cas d'une résistance de mise à la terre réduite	63
Figure III.21 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime TT	66
Figure III.22: Courant de défaut en cas du régime neutre TT	67
Figure III.23: Tension de contact en cas du régime neutre	67
Figure III.24 : Courant corporel en cas du régime neutre TT	68
Figure III.25 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime TN	68
Figure III.26 : Courant de défaut en cas du régime neutre TN	69
Figure III.27 : Tension de contact en cas du régime neutre TN	69
Figure III.28 : Courant corporel en cas du régime neutre TN	70
Figure III-29 : Calcul des conditions de déclenchement du relais magnétique en cas du régime neutre TN	70
Figure III.30 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime IT	71
Figure III.31 : Courant de défaut en cas du régime neutre IT	71
Figure III.32 : Tension de contact en cas du régime IT	72
Figure III.33 : Courant corporel en cas du régime neutre IT	72

ملخص:

يُفترض أن يكون توزيع الطاقة الكهربائية الموجهة للإستهلاك ذا نوعية جيدة، بينما تخضع عملياً للعديد من الاضطرابات الدائمة والعبارة التي لها عواقب ضارة على معدات الشبكة الكهربائية والموظفين. وهذا ما يلزم مديري الشبكات بتنفيذ وسائل الحماية للسيطرة على هذه القيود الضرورية. يعتبر تأريض النواقل المحايدة والكتل المعدنية عملاً ضرورياً لضمان سلامة الممتلكات والأشخاص من المخاطر الكهربائية. في المذكرة الحالية، تمت من دراسة خطأ العزل والتأريض لضمان مسار تيار العطل الناتج من خطأ في العزل والذي سيتم اكتشافه بواسطة آلية تفاضلية تجعل من الممكن قطع تيار العطل تلقائياً. كما تم تحليل مختلف تقنيات تأريض المحايد.

الكلمات المفتاحية: خطأ العزل ، تيار العطل ، التأريض ، الأنظمة المحايدة ، قاطع الدائرة التفاضلية.

Résumé :

La distribution de l'énergie électrique est supposée de bonne qualité, alors qu'en pratique elle subit à des nombreuses perturbations permanentes et transitoires qui ont des conséquences néfastes sur les équipements du réseau électrique et les personnels. Ce qui oblige les gestionnaires de réseaux de mettre en œuvre les moyens de protection pour maîtriser ces contraintes qui s'imposent. La mise à la terre des neutres et les masses métalliques est considéré indispensable pour assurer la sécurité des biens des personnes face aux risques électriques. Dans le présent travail, une étude d'un défaut d'isolement et de mise à la terre pour garantir un cheminement de courant de défaut d'isolement qui sera détecté par un mécanisme différentiel qui permet de couper automatiquement le courant de défaut à été abordée, les différentes techniques de liaison des neutres à la terre ont été également analysées.

Mots clés : Défaut d'isolement, Courant de défaut, Mise à la terre, Régimes de neutre, Disjoncteur différentiel.

Abstract

The distribution of electrical energy is assumed to be of good quality, whereas in practice it is subject to numerous permanent and transient disturbances which have harmful consequences on the equipment of the electrical network and the personnel. This obliges the network managers to implement the means of protection to control these necessary constraints. The earthing of neutrals and metal masses is considered essential to ensure the safety of people's property against electrical risks. In the present work, a study of an insulation and grounding fault to guarantee an insulation fault current path which will be detected by a differential mechanism which makes it possible to automatically cut the fault current has been approached., the various neutral-to-earth bonding techniques were also analyzed.

Keywords: Insulation fault, fault current, earthing, neutral systems, differential circuit breaker.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique circule depuis le lieu où elle est produite jusqu' à l'endroit où elle est consommée, par l'intermédiaire d'un réseau de lignes électriques aériennes ou souterraines et des postes électriques. Il permet de transporter et de distribuer l'énergie électrique sur l'ensemble du territoire.

L'énergie électrique joue un rôle primordiale et stimulant pour le bien de l'humanité dans la vie quotidienne, La norme CEI 60364-4-41 précise les conditions générales d'installation à respecter pour assurer la sécurité des personnes, et des biens contre les dangers et dommages pouvant résulter de l'utilisation de l'énergie électrique.

Des risques liés à l'insécurité peuvent être apparues dans les installations électriques, consistant en des dangers réels pour la vie des personnes et pour l'intégrité des équipements électriques.

Plusieurs types de défauts et perturbations peuvent se produire dans le réseau électrique, tels que les surtensions, les courts-circuits et les surcharges qui peuvent menacer de manière permanente ou de manière transitoire le bon fonctionnement du réseau électrique et la sécurité humaine.

Dans les systèmes électriques, la protection efficace contre les différents types de défauts repose sur les appareillages de protection (disjoncteur magnétothermique, fusibles et disjoncteur différentiel) et à la mise à la terre des neutres et les masses métalliques des équipements électriques.

Les appareillages de protection jouent un rôle important dans la stabilité du réseau électrique contre les défauts électriques et dans la garantie du fonctionnement convenable des installations électriques. La mise à la terre des neutres et les masses métalliques des installations électriques à une prise de terre par le moyen d'un conducteur de terre permet d'évacuer le courant d'un défaut d'isolement vers la terre. Cette fonction exige une conception bien appropriée d'un système de mise à la terre.

Dans ce présent mémoire, l'objectif est d'étudier un défaut d'isolement dans une installation avec des différents régimes de neutres et les moyens de protections nécessaires, en se basant sur le plan de travail suivant :

Le premier chapitre rappelle quelques définitions de base élémentaires et importantes du réseau électrique sur l'ensemble des composants destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique.

Pour le deuxième chapitre on présente une notion sur l'origine des risques électriques. Les conséquences graves et les facteurs influençant les dommages corporels, également les différents types de contacts électriques, les schémas des liaisons des neutres à la terre et les modèles de calcul de la résistance de mise à la terre.

Le troisième chapitre présente les résultats issus de la simulation numérique réalisée à l'aide d'un programme de calcul sous l'environnement Matlab sur le calcul de la résistance de mise à la terre et une analyse d'un défaut d'isolement et les régimes de neutre. Ces résultats ont été discutés et analysés.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale et d'envisager quelques perspectives.

Chapitre I

I.1. Introduction

L'exploitation du réseau électrique consiste à produire, transporter et distribuer l'énergie demandée par les charges installées. Par ailleurs, la fréquence ne doit pas excéder 0.5% de la fréquence nominale. En plus du contrôle permanent de la tension et de la fréquence,

Dans ce chapitre, nous allons voir une généralité sur le réseau électrique, les énergies non- renouvelables et renouvelables qui servent principalement à la production d'électricité, les éléments électriques principaux constituant un réseau électrique, l'ensemble des appareillages électriques de connexion, de commande et de protection nécessaires dans ce réseau électrique, puis nous allons entamer les différents types de défaut dans les réseaux électriques et ses caractéristiques.

I.2. Généralité sur le réseau électrique

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de génération jusqu'aux clients les plus éloignés.

I.2.1. Définition du réseau électrique

Le réseau électrique est constitué par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de génération jusqu'aux clients les plus éloignés. Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final.

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs [1].

Initialement, le réseau électrique a été créé et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus

éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs.

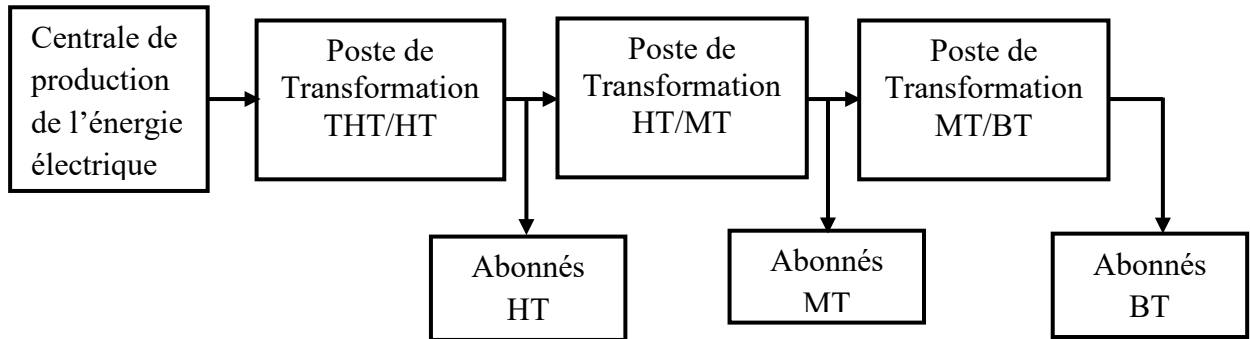


Figure I.1: Typologie d'un réseau électrique

I.2.2. Production d'énergie électrique

Aujourd'hui, l'électricité est devenue une énergie incontournable. Sans elle, plus d'éclairage, ni de force motrice, ni de distribution d'eau, ni de communication L'électricité est produite dans des usines appelées centrales. Celles-ci transforment l'énergie primaire (thermique, nucléaire, hydraulique, éolien) en énergie électrique que l'on appelle énergie secondaire. L'énergie électrique est consommée au moment où elle est produite.

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel qui produit de l'électricité en grande quantité, son principe consiste à transformer les sources d'énergie naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité des consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointain [1-3]. Elle comporte différents composants:

- Un convertisseur d'énergie qui assure la conversion d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres.
- Un groupe turbo-alternateur dont les aimants constitutifs solidaires de pales, se mettent en mouvement sous l'effet de la vapeur d'eau sous pression injectée au niveau des pales. Les bobines entourant les aimants sont le lieu de la création d'une tension électrique [1-3].

I.2.3. Transformation d'énergie électrique

D'un point de vue physique, l'énergie ne se produit pas, ni ne se consomme..., elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre, l'énergie est présente partout dans le monde et se définit comme **la capacité d'un système à modifier son état ou celui d'un autre système, et à produire un effet visible**. De manière plus concrète, l'énergie peut se

trouver dans différentes sources naturelles, et se manifester via différentes formes par un processus de transformation ou de conversion. Les quatre formes d'énergie libre sont l'énergie rayonnante, l'énergie thermique (ou chaleur), l'énergie mécanique (ou cinétique) et l'énergie électrique [1-3].

I.2.4. Sources d'énergie

Il existe deux grandes familles de sources d'énergie pour produire l'électricité:

I.2.4.1. Energies renouvelables

C'est une énergie provenant de ressources que la nature renouvelle sans cesse (eau, vent, soleil...).Elles sont inépuisables et non polluantes [1-3].

- L'énergie hydraulique : La force de l'eau des chutes retenue par des barrages ou celle des marées.
- L'énergie éolienne : La force du vent.
- L'énergie solaire : Les rayons du soleil.
- L'énergie de la géothermie : La chaleur du sous-sol.
- L'énergie de la biomasse : La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains).

Pour une installation solaire, deux éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires et un onduleur. Ces deux éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau.

- Les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.

I.2.4.2. Energies non renouvelables

Energie provenant de ressources dont les stocks sur Terre sont limités. Exemples : pétrole, charbon, gaz, uranium. Elles sont polluantes (les centrales qui utilisent ces sources d'énergies produisent des gaz, en particulier d'énormes quantités de dioxyde de carbone) [1-3]:

- L'énergie fissile : l'uranium, un minéral contenu dans le sous-sol de la Terre.

- L'énergie fossile : éléments contenus dans le sous-sol de la Terre tels que le charbon, le fioul (issu du pétrole) et le gaz.



Figure I.2: Centrale solaire

Dans une centrale thermique, une chaudière chauffe de l'eau et la transforme en vapeur. L'énergie calorifique est obtenue en brûlant le plus souvent du charbon, du pétrole ou du gaz. La chaleur dégagée par la combustion vaporise l'eau qui atteint alors une très haute température. Cette vapeur se détend progressivement dans les corps haut, moyenne et basse pression de la turbine avant de se liquéfier dans le condenseur et d'être renvoyée dans le générateur de vapeur. L'énergie mécanique engendrée par la vapeur circulant dans la turbine, entraîne l'alternateur qui la transforme en énergie électrique [3,4].



Figure I.3: Centrale thermique au gaz

L'énergie électrique dans la centrale thermique est produite à partir de la combustion d'un carburant où la chaleur dégagée par cette réaction est utilisée dans des turbines à vapeur qui sont couplées à des générateurs d'électricité ; on les trouve souvent Près de la mer, des rivières et des lacs, vu la grande quantité d'eau nécessaire pour leur refroidissement et la condensation de la vapeur sortante.

I.2.5. Transport d'énergie électrique

Le transport de l'électricité est conduit de son lieu de production jusqu'au consommateur final grâce à un large réseau de lignes aériennes ou souterraines. Le câble reste l'unique moyen de transport de l'électricité. Ce transport entraîne des pertes d'énergie par dissipation de chaleur qui augmente avec l'intensité du courant et la résistance des câbles appelées « pertes par effet Joule ». Pour limiter cette perte, il faut donc diminuer si possible la résistance et l'intensité. Or, la résistance dépend de la nature et du diamètre des câbles. Elle ne peut être facilement réduite sans d'importantes contraintes économiques et techniques. On cherche donc à baisser l'intensité du courant transporté. Ceci implique d'utiliser un courant alternatif à très haute tension (THT) 225 kV 400 kV en triphasé afin de réduire les pertes par effet Joule dissipée dans le câble durant le transport.

Des transformateurs permettent d'élever ou d'abaisser la tension électrique à différents points du réseau [3,4,5].

Avant d'être transportée, la tension de l'alternateur subit une première transformation, une élévation, à l'aide d'un transformateur élévateur (survolteur);

Cette élévation a pour but de réduire les pertes par effet Joule dans les lignes de transport.

A proximité du lieu de distribution, cette tension subit une dernière transformation, un abaissement, à l'aide d'un transformateur abaisseur (sous-volteur), qui permet de fournir une tension au client final dans les normes [3-5].

L'élévation de la tension de transport permet de :

- Diminuer l'intensité du courant en ligne ; ce qui permet en conséquence de réduire également les pertes en ligne ainsi que les chutes de tension.
- Diminuer la section des conducteurs de transport, réduisant ainsi le coût de l'opération.
- Réduire le nombre de lignes de transport.

I.2.6. Répartition et distribution

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT (MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des tensions typiques 60 et 30 kV. La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400 V), grâce à des postes de transformation MT/B [2].

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [3-5].

I.2.7. Niveaux de tension

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit [5-7] :

- THT: Très haute tension, pour des tensions composées supérieures à 220 kV ;
- HT: Haute tension, des tensions composées supérieures comprises entre 33 kV et 220 kV ;
- MT: Moyenne tension, des tensions composées comprises entre 1 kV et 33 kV ;
- BT : Basse tension, tension comprise entre 100 V et 1 kV ;
- TBT: Très basse tension, inférieure à 100 V.

D'autres normes existent, notamment la norme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Celle-ci définit la tension moyenne sur une large plage (de 1 kV jusqu'à 69 kV). La norme IEEE est utilisée surtout en Amérique du nord. Il y a aussi la norme française qui définit les niveaux comme suit :

HTB : supérieure à 50 kV, HTA : entre 1 kV et 50 kV, BTB : entre 500 V et 1 kV, BTA : entre 50 et 500 V et

TBT : inférieur à 50 V.

I.3. Type des réseaux électriques

L'ensemble des constituants d'un réseau électrique peut être agencé selon différentes structures, dont la complexité détermine la disponibilité de l'énergie électrique et le coût de l'investissement [3-5].

Le choix de l'architecture sera donc fait pour chaque application sur le critère de l'optimum technico-économique

I.3.1. Réseau maillé

Ce réseau est utilisé généralement pour le transport, est un réseau où des liaisons qui forment des boucles, réalisant une structure en mailles d'un filet [5-7].

a) Avantages

Le réseau maillé est caractérisé par :

- Une grande sécurité d'exploitation ;
- Une chute de tension réduite.

b) Inconvénients

- Le coût de réalisation est énorme ;
- Nécessité des protections sophistiquées.

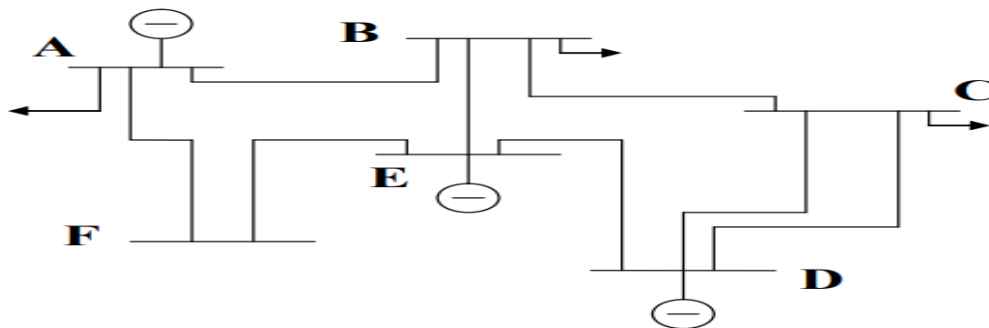


Figure I.4: Réseau maillé

I.3.2. Réseau bouclé

Ce sont des réseaux maillés simplifiés, présentant un certains nombres de boucles fermés, chacune de ces boucles contient un nombre limité de sources. L'énergie peut transiter alors par des chemins différents, et la mise hors tension accidentelle d'un tronçon n'entraîne pas des surcharges inadmissibles pour les autres tronçons. Les réseaux bouclés sont généralement utilisés pour les réseaux de répartition [5-7].

a) Avantages

- Grande continuité de service ;
- Un bon rendement
- Faible chute de tension.
- b) Inconvénients
- Forts courants de court-circuit ;
- Plus onéreux et plus difficile à exploiter que le précédent.

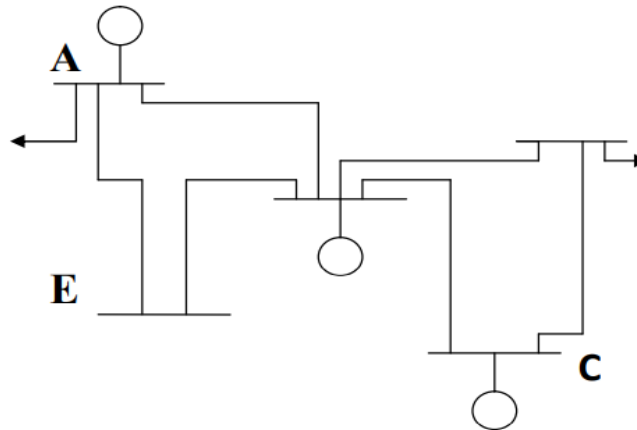


Figure I.5: Réseau bouclé

I.3.3. Réseau radial

Les réseaux radiaux sont exploités débouclés. La sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée [5-7].

On rencontre deux structures principales :

- En coupure d'artère : typique des réseaux souterrains. Ces réseaux sont conçus pour un éventuel fonctionnement en boucle ;
- Structure arborescente ; typique des réseaux ruraux aériens. Ces réseaux comportent des points de bouclage pour assurer un secours par la moyenne tension.
- a) Avantages
- Facile à étudier et à construire ;
- Pour effectuer des travaux, il suffit d'ouvrir l'appareil (sectionneur, interrupteur ...) placé au début du réseau.
- b) Inconvénients
- Des grandes chutes de tension pour les longueurs dépassant 500m ;
- La mise hors tension des consommateurs en cas d'une panne en tête de ligne.



Figure I.6: Structure en coupure d'artère

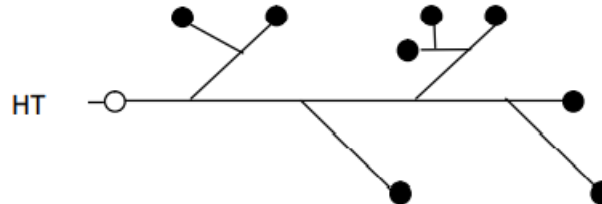


Figure I.7: Réseau radial

I.4. Éléments indispensables du réseau électrique

I.4.1. Pylônes

Ils servent à supporter les conducteurs des lignes aériennes, du poste de départ d'une centrale jusqu'aux postes sources et aux postes satellites, plus près des endroits habités, aussi à les maintenir en l'air à distance du sol et des obstacles pour garantir la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes électriques. Il en existe plusieurs sortes, dont le choix dépend des lignes à installer, de l'environnement, de la tension de fonctionnement et du terrain et des conditions climatiques locales[8,9].

I.4.2. Lignes aériennes

Les conducteurs servent à acheminer l'électricité. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois phases par circuit. Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Ces câbles sont «nus» car isolés par l'air. Une distance suffisante est maintenue entre les câbles et le sol pour assurer cette isolation. Plus le niveau de tension est élevé, plus cette distance est importante. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant [5,6,7]. Le parcours d'une ligne électrique aérienne suit rarement une ligne droite car il tient compte de différents paramètres :

- Environnementaux : les forêts, les parcs naturels... ;

–

– Humains : les villages, les exploitations agricoles, etc.

I.4.3. Chaînes d'isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important [8,9].



Figure II.8 : Pylône THT pour une ligne de 400kV



Figure II.9: Chaîne d'isolateurs à long fût

I.4.4. Câbles de garde

Ils ne transportent pas le courant. Ils sont placés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almélec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant [8,9].

I.4.5. Câbles souterrains

Les lignes peuvent aussi être souterraines ou enfouies. La mise en souterrain des lignes de transport présente notamment l'avantage de protéger les lignes des effets du climat (tempêtes, chutes de neige, foudre ...) et de respecter certaines exigences environnementales, elles peuvent être posées de plusieurs façons, selon le terrain et l'environnement : en fourreaux PVC enrobé de béton, en ville, ou en fourreaux PEHD* pleine terre, à la campagne, en galerie, dans les grandes villes, en caniveau, elles sont alors recouvertes de béton armé, en sous-œuvre ou en micro tunnels, pour franchir un obstacle comme une voie ferrée ou un fleuve [8,9].

I.4.6. Postes électriques

Selon la définition de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et éventuellement des transformateurs. Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On parle généralement de sous-station. Il existe plusieurs types de postes électriques [8,9]:

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau,
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques HTB,
- Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur,
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie

Électrique aux clients résidentiels ou industriels.

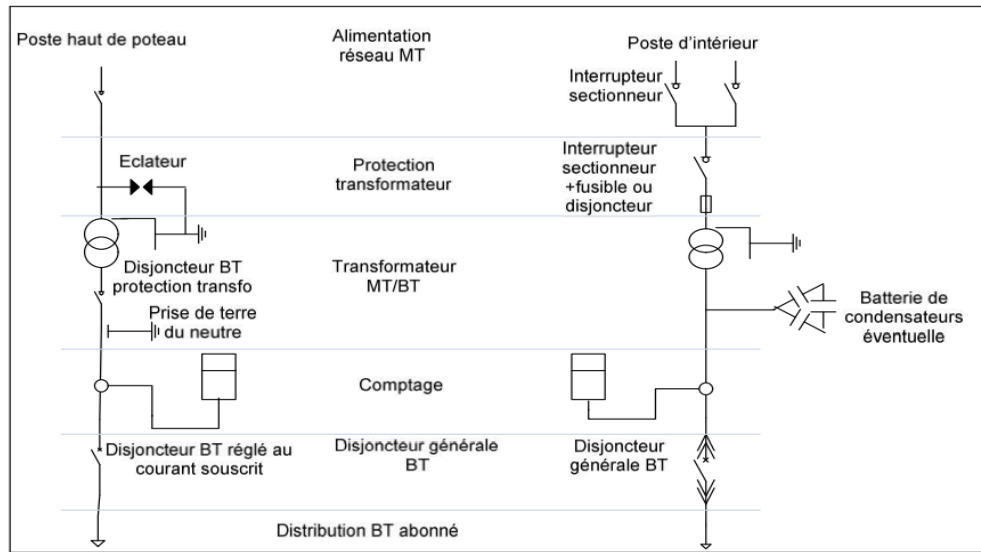


Figure I.10: Structure d'un poste électrique[8].

I.4.7. Transformateurs

Ils augmentent ou diminuent la tension électrique, Ils sont utilisés dans les centrales électriques, les sous-stations, les quartiers d'habitation et les zones industrielles, selon l'endroit du réseau où ils se trouvent. Élever la tension en sortie de centrale de 20 000 à 400 000 volts, permet de transporter l'électricité produite sur de longues distances. En effet, plus la tension est élevée, plus les pertes électriques dues à l'effet Joule sont faibles. Pour livrer l'électricité aux réseaux de distribution, on abaisse le niveau de tension par exemple de 63 000 à 20 000 volts, et encore en 230 et 400 V [8,9].



Figure II.11 : Transformateur de puissance d'un poste électrique HT

I.4.8. Interconnexion (dispatching)

L'interconnexion est l'opération qui consiste à relier entre eux plusieurs lignes ayant ou non des niveaux de tension différents grâce aux transformateurs de puissance et aux appareils de connexion. L'interconnexion permet [8,9].

- Des échanges d'énergie entre régions ou entre réseaux.
- En cas de défaut sur une ligne ou une centrale, l'alimentation par une autre ligne.
- Des échanges vers les pays voisins (exportation d'énergie)
- Garantir une réserve tournante d'énergie : car elle permet la régulation de la production des centrales, l'énergie n'étant pas stockable.

I.5. Appareillage électrique

On désigne sous le terme appareillage électrique l'ensemble du matériel permettant la mise sous ou hors tension des portions d'un réseau électrique.

Selon la Commission électrotechnique internationale (CEI), l'appareillage électrique est un terme général applicable aux appareils de connexion et à leur combinaison avec des appareils de commande, de mesure, de protection et de réglage qui leur sont associés, ainsi qu'aux ensembles de tels appareils avec les connexions, les accessoires, les enveloppes et les charpentes correspondantes. La CEI distingue l'appareillage de connexion qui est destiné à être utilisé dans le domaine de la production, du transport, de la distribution et de la transformation de l'énergie électrique. On regroupe donc en particulier sous ce terme les appareils suivants [10,11]:

I.5.1. Appareil d'isolement (Sectionneur porte fusible)

Le sectionneur est un appareil mécanique de connexion qui permet d'ouvrir et de fermer un circuit lorsque le courant est nul ou pratiquement nul (hors tension) afin d'isoler un circuit pour effectuer des opérations de maintenance, de dépannage ou de modification sur les circuits électriques qui se trouvent en aval. Il peut être considéré comme un appareil de connexion et/ou de raccordement mais jamais comme un appareil de protection, un sectionneur n'étant pas prévu pour couper un circuit en charge, son pouvoir de coupure ou de fermeture est très faible.

Le sectionneur, pour satisfaire aux normes en vigueur, doit pouvoir être condamné en

position ouverte [10,11].

I.5.2. Appareil de commande (Contacteur)

Le contacteur électromagnétique est un appareil mécanique de commande à travers une bobine (électroaimant), il est capable d'établir, de supporter et d'interrompre de très forts courants dans des conditions normales et aussi en cas de surcharges. Il fonctionne en tout ou rien. Lorsque la bobine de l'électroaimant est alimentée (partie commande), le contacteur se ferme, établissant, par l'intermédiaire de pôles, le circuit entre le réseau d'alimentation et le récepteur (partie puissance). Les contacteurs sont utilisés afin d'alimenter des moteurs industriels de grande puissance et en général des consommateurs de fortes puissances. Ils possèdent un pouvoir de coupure (Pdc) important [10,11].

I.5.3. Appareil de protection

Les appareils de protection permettent de protéger un circuit contre les défauts. On distingue deux principaux défauts :

- Les courts circuits ;
- Les surcharges.

Ces deux défauts entraînent toujours une augmentation énorme du courant [10,11].

I.5.3.1. Fusible

Le fusible est un élément de faiblesse qui assure la protection des circuits électriques contre les courts-circuits et les surcharges par la fusion d'un élément calibré lorsque le courant qui le traverse dépasse la valeur précise de son calibre, pendant un temps donné. Il est obligatoirement associé à un sectionneur porte fusible [10,11].

I.5.3.2. Disjoncteur

Un disjoncteur est un appareil de connexion électrique capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, ainsi que d'établir, de supporter pendant une durée spécifiée et d'interrompre des courants dans des conditions anormales de défaut thermiques ou et magnétiques, telles que celles du court-circuit ou de la surcharge [10,11].

I.5.3.3. Relais thermique

Le relais thermique est un appareil qui protège le récepteur placé en aval contre les surcharges et les coupures de phase. Pour cela, il surveille en permanence le courant dans le récepteur. En cas de surcharge, le relais thermique n'agit pas directement sur le circuit de puissance, le courant élevé provoque l'échauffement et la déformation du bilame. Un contact du relais thermique associé à cette bilame, ouvre le circuit de commande d'un contacteur est le contacteur qui coupe le courant dans le récepteur.

Une source d'énergie électrique (ligne, poste,.....) est un système dormant, dans lequel il ne se passe presque rien (de temps en temps une manœuvre...), si dans ce poste où sur les parties du réseau intervient un défaut, alors la protection doit agir automatiquement et rapidement selon des critères de sûreté [10,11] :

- Sécurité (pas d'ordre intempestif)
- Disponibilité (être opérationnelle à tout instant)
- Sélectivité (provoquer le déclenchement de la zone affectée et pas une autre)
- Stabilité (ne pas déclencher sur des défauts qui ne concernent pas la protection).

La Commission Électrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme ensemble des dispositions destinées pour permettre la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations .

I.6. Défauts de fonctionnement

I.6.1. Définition d'un défaut électrique

En général, on appelle un défaut, toute perturbation qui engendre une modification de la valeur des quantités alternatives (courant, tension) sur une ligne électrique ou sur une partie du réseau électrique) par rapport à une valeur nominale (dépassement de seuil). Dans certains cas, un défaut peut conduire à l'effondrement électrique de réseau et la mise en danger de son environnement[12-14].

I.6.2. Origine de défauts

Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est pas nul et des incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement des installations électriques.

- Les lignes aériennes : sont soumises aux perturbations atmosphériques (foudre, orage, vent, tempêtes, etc.), Les régions montagneuses par exemple sont beaucoup plus exposées que d'autre à la foudre [12-14].
- Les câbles souterrains : sont exposés aux agressions extérieures (d'engins mécaniques de terrassement par exemple) qui entraînent systématiquement des défauts permanents.
- Les matériels de réseaux et de postes électriques : comportent des isolants (solides, liquides ou gaz) constitués d'assemblages plus ou moins complexes places entre parties sous tension et masse. Les isolants subissent des dégradations conduisant à des défauts d'isollements.

I.6.3. Caractéristiques des défauts

Les court-circuits ou les défauts sont caractérisés par leur forme, leur durée et l'intensité du courant. Les ingénieurs en électrotechnique option réseaux électriques utilisent souvent, comme terme défaut. Un défaut dans les réseaux électriques peut être [12-14] :

- Monophasé, entre une phase et la terre ou une masse.
- Biphasé, entre deux phases raccordées ensemble, peut être un défaut biphasé mis à la terre ou biphasé isolé.
- Triphasés, entre trois phases de la ligne ou les trois phases et la terre.

I.6.4. Nature des défauts

I.6.4.1. Défauts fugitifs :

Les défauts fugitifs nécessitent une coupure très brève du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde) [12-14].

I.6.4.2. Défauts permanents :

Ces défauts provoquent un déclenchement définitif qui nécessite l'intervention du personnel d'exploitation pour la localisation du défaut et remise en service de la partie saine.

I.6.4.3. Défauts auto-extincteurs :

C'est ceux qui disparaissent spontanément en des temps très courts sans provoquer de discontinuités dans la fourniture d'énergie électrique

I.6.4.4. Défauts semi-permanents :

Ces défauts exigent pour disparaître une ou plusieurs coupures relativement longues du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) sans nécessité d'intervention du personnel d'exploitation.

I.6.5. Conséquences des défauts sur le réseau électrique

Les défauts dans les réseaux électriques ont des effets néfastes, on peut citer :

I.6.5.1. Fonctionnement des réseaux électriques

Les effets néfastes des courts-circuits sont surtout à redouter sur les réseaux électriques THT sur lesquels débitent des groupes générateurs de forte puissance. Les courts-circuits, surtout polyphasés et proches des centrales de production, entraînent une diminution du couple résistant (C_r) des machines et donc une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur (C_m), s'ils ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent conduire à la perte de stabilité de groupes générateurs et à des fonctionnements hors synchronisme préjudiciables aux matériels. Des temps d'élimination des courts-circuits de l'ordre de 100 à 150 ms sont généralement considérés comme des valeurs à ne pas dépasser sur les réseaux électriques THT [12-14].

I.6.5.2. Tenue de matériel

Les défauts provoquent des surintensités, dans le cas d'un défaut triphasé le courant de défaut peut être dépassé de 20 à 30 fois le courant nominal (I_n), Ces surintensités amènent deux types de contraintes [12-14]:

- Contraintes Thermiques : dues aux dégagements de chaleur par effet Joule (RI^2) dans les conducteurs électriques.
- Contraintes Mécaniques : dues aux efforts électrodynamiques, ceux-ci entraînent notamment le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs, ces efforts s'il dépasse les limites admises lors de la construction est souvent à l'origine d'avaries graves. De plus l'arc électrique consécutif à un défaut met en jeu un important dégagement local d'énergies pouvant provoquer d'important dégât au matériel et être dangereux pour le personnel travaillant à proximité.

I.6.5.3. Qualité de la fourniture

Pour les utilisateurs, les défauts se traduisent par une chute de tension dont l'amplitude et

la durée sont fonction d'efférents facteurs tels que la nature du court-circuit, la structure du réseau effectué, du mode mise à la terre, du mode d'exploitation, des performances des protections.

La présence d'un défaut dissymétrique entre une ou deux phases d'une ligne d'énergie électrique et la terre entraîne la circulation d'un courant homopolaire qui s'écoule à la terre par les points neutres des réseaux. Une tension induite longitudinale, proportionnelle à ce courant, apparaît sur les lignes de télécommunication qui ont un trajet parallèle à la ligne d'énergies électrique. Cette tension peut atteindre des valeurs dangereuses pour le personnel et les installations de télécommunication [12-14].

I.6.5.4. Sécurité des personnes

La mise sous tension accidentelle des masses, les élévations de potentiel lié à l'écoulement des courants de défaut à la terre, les conducteurs tombés au sol ...etc. sont autant de situations pouvant présentés des risques pour la sécurité des personnes. Le mode de mise à la terre des points neutres joue de ce fait un rôle essentiel [12-14].

I.6.5.5. Contraintes supplémentaires pour la protection

Les protections électriques ne doivent pas apporter de limitation au fonctionnement normal des réseaux électriques, en particulier [12-14] :

- Elles ne doivent pas limiter la souplesse d'utilisation du réseau protégé en interdisant certains schémas d'exploitation (réseaux bouclés, maillés, radiaux).
- Elles doivent rester stables en présence de phénomènes autre que les défauts :
- Lors de manœuvres d'exploitation, pendant les régimes transitoires consécutifs à la mise sous tension ou hors tension à vide des lignes ou des transformateurs,
- Lors de variations admissibles de la tension et de la fréquence,
- En présence de surcharges et de déséquilibres entrant dans la marge de fonctionnement des réseaux électriques,
- En présence d'oscillations résultant du régime transitoire des alternateurs,
- Sous l'influence d'une anomalie des circuits de mesure.

I.6.6. Qualités principales d'une protection électrique

I.6.6.1. Rapidité d'élimination des défauts

Les défauts sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaires. Le temps d'élimination des défauts comprend deux composantes principales [12-14] :

- Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes).
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes.

I.6.6.2. Sélectivité d'élimination des défauts

La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner de celles où elle ne doit pas fonctionner [12-14].

Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants :

- Sélectivité ampérométrique par les courants,
- Sélectivité chronométrique par le temps,
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

I.6.6.3. Sensibilité de protection

La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de courts-circuits entre:

- Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc parfaitement connu ;
- Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un défaut se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles. La notion de sensibilité d'une protection est fréquemment utilisée en référence au courant de défaut le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner [12-14].

I.6.6.4. Fiabilité de protection

Les définitions et les termes proposés ici, sont dans la pratique, largement utilisés au plan international. Une protection a un fonctionnement correct lorsqu'elle émet une réponse à un défaut sur le réseau en tout point conforme à ce qui attendu. A l'inverse, le fonctionnement incorrect, elle est comporte deux aspects [12-14]:

- Le défaut de fonctionnement ou non-fonctionnement lorsqu'une protection qui aurait dû fonctionner n'a pas fonctionné.
- Le fonctionnement intempestif, qui est un fonctionnement non justifié, soit en l'absence de défaut, soit en présence d'un défaut pour laquelle la protection n'aurait pas dû fonctionner.

La fiabilité d'une protection, qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement incorrect (éviter les déclenchements intempestifs), est la combinaison de :

- La sûreté : qui est la probabilité de ne pas avoir de défaut de fonctionnement.
- La sécurité : qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif.



Figure I.12: Fiabilité d'une protection électrique

On peut améliorer la fiabilité en associant plusieurs protections, mais, sûreté et sécurité sont deux exigences contradictoires.

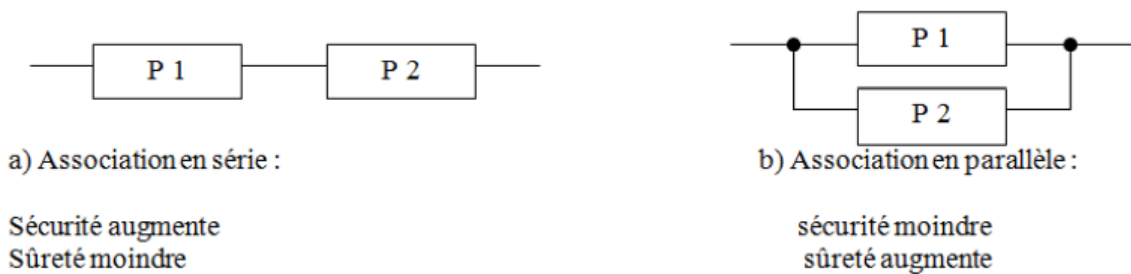


Figure I.13: Association de protection électrique

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une généralité comporte un rappel sur la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, ainsi que les différents éléments constituant un de réseau électrique, tels que les lignes et les postes électriques, le réseau électrique doit assurer la gestion dynamique de la production, le transport et la répartition aux consommateurs l'électricité avec une grande stabilité. Dans le réseau électrique, il existe plusieurs types de défauts (polyphasés ou monophasés). Lors de l'occurrence d'un défaut électrique, les exploitants doivent avoir connaissance de l'existence

de ce défaut, l'isoler et le réparer le plus rapidement possible pour réalimenter aux consommateurs l'électricité, et assurer la sécurité des agents intervenants dans l'opération de détection, localisation et réparation de défauts dans les réseaux électriques

Chapitre III

II.1. Introduction

Le réseau d'énergie peut être le siège d'un certain nombre des risques qui sont dûs, en général à l'apparition de défaut. Ces défauts donnent lieu à l'établissement de courant de court-circuit soit entre un ou plusieurs conducteurs et le sol.

L'électricité ne se voit pas, ne s'entend pas, n'a pas d'odeur mais entraîne chaque année des accidents graves par contact direct ou indirect avec des pièces nues sous-tension. En matière d'accidents d'origine électrique de travail, l'électricité constitue une cause relativement fréquente en comportant un facteur de gravité très important, elle entraîne chaque année des accidents graves par contact direct ou indirect avec des pièces nues sous-tension. Dans le présent chapitre, nous allons rappeler le phénomène du risque électrique et ses conséquences et les effets physiologiques du courant électrique sur l'être humain, l'incidence d'un risque de défaut d'isolement dans une installation électrique, les différents régimes de neutre et les moyens indispensables à la réalisation d'une prise de terre pour la protection des biens et des personnes contre les défauts d'isolement,

II.2. Risque électrique

L'utilisation mal contrôlée de l'énergie électrique peut entraîner des accidents graves pour les personnes (électrisation ou électrocution) et les installations (incendies). Le risque électrique résulte d'une possibilité d'un contact entre le conducteur et l'opérateur ou bien entre deux conducteurs ayant des potentiels différents.

II.2.1. Définition du risque électrique

Le risque électrique décrit une exposition directe ou indirecte d'une personne à une zone, un matériau ou un objet électrifié. Les risques liés à l'électricité, pour l'homme, sont de différentes natures. Il s'agit principalement des risques d'électrisation, d'électrocution (la mort par le choc électrique) et de brûlure. Les lésions occasionnées sont fonction de la nature du courant, de la tension, de paramètres physiologiques ou de la configuration des lieux. Généralement le risque électrique pouvant résulter du [15-17]:

- du contact de personnes avec des parties actives sous tension;
- des parties qui sont devenues actives accidentellement en particulier à cause d'un défaut d'isolement;
- de l'approche de personne au voisinage de parties actives haute tension ;
- d'une mauvaise isolation qui ne convient pas dans les conditions d'utilisation prévues ;
- de phénomènes électrostatiques, tels que le contact d'une personne avec des parties

Chargées ;

II.2.2. Electrification et électrocution

L'électrification c'est le passage du courant électrique dans le corps provoque des blessures plus ou moins graves, les brûlures par L'électrification entraînent souvent des handicaps à long terme et des séquelles esthétiques, alors que l'électrocution le courant passe par le cœur et la victime risque l'arrêt cardiaque, il désigne exclusivement les cas d'électrification entraînant un décès [15-17].

II.2.3. Facteurs de gravité

L'accident d'origine électrique à des effets directs ou indirects très variables pour le corps humain. La gravité des dommages provoqués par le passage d'un courant électrique à travers le corps humain dépend des [15-17] :

- L'intensité du courant mesurée en ampères (A), sachant qu'il y a danger à partir de 5 milliampères ou mA (courant provoquant une secousse électrique) et le type de courant alternatif ou continu ;
- la résistance du corps humain,
- La durée du passage du courant dans le corps humain;
- La superficie de la zone de contact avec la source électrique ;
- La zone de contact et la trajectoire du courant parcouru dans l'organisme (de la main au pied, touchant le cœur, le foie, les reins)
- l'état de la peau: normale ou calleuse, sèche ou humide ;
- La nature du sol (matériau isolant ou conducteur).

C'est le courant qui circule dans le corps humain qui est dangereux. Par opposition aux « volts qui brûlent », c'est « l'intensité qui tue ».

En alternatif :

Tableau II.1: Les effets du courant électrique alternatif sur l'être humain

Intensité du courant (A)	<u>Effets sur le corps humain</u>
1 Ma	Perception cutanée
5 Ma	Secousse électrique
10 Ma	Contracture entraînant une incapacité de lâcher prise
25 mA pendant 3 mn	Tétanisation des muscles
40 mA pendant 5 s ou 80 mA pendant 1 s	Fibrillation ventriculaire
200 mA (30 ms)	Fibrillation cardiaque
1 A	Arrêt du coeur
2 A	Inhibition des centres nerveux

En continu : Tableau II.2: Les effets du courant électrique continu sur l'être humain

Intensité du courant (A)	Effets sur le corps humain
2 Ma	Seuil de perception
130 Ma	Seuil de fibrillation cardiaque

II.2.4. Résistance électrique du corps humain

La peau constitue la barrière la plus efficace à la pénétration du courant à l'intérieur du corps et sa résistance électrique varie en fonction de son état de surface (peau sèche, humide, mouillée) et de son épaisseur (peau fine ou calleuse).

La valeur minimale de la résistance du corps humain est 325 Ω lorsque le corps est immergé, par exemple dans des salles de bains ou des piscines [15-17].

La figure ci-contre donne les courbes donnant la relation $R = f(U_c)$ entre la résistance du corps humain et la tension de contact

U_c : tension de contact en Volts

$U_c(\text{tension de contact}) = \text{Résistance de l'homme} \times \text{Courant de défaut}$

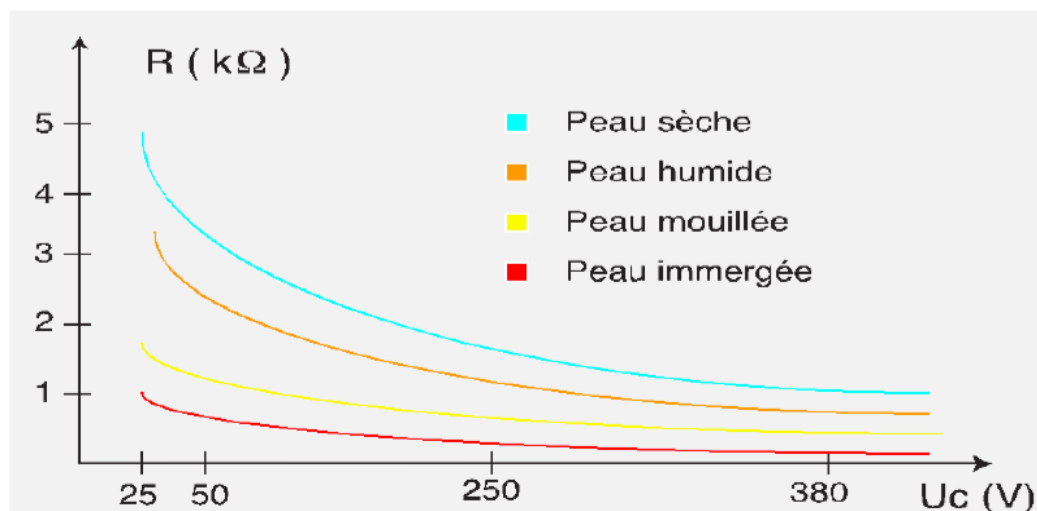


Figure II.1: Variation de la résistance du corps humain en fonction de la tension de contact et de l'état de la peau[15].

II.5. Relation entre le temps de passage du courant de choc dans le corps humain et l'intensité de ce courant

Les courbes ci-contre, issues de la norme CEI 479, illustrent la relation $t=f(I_c)$ et déterminent quatre zones [15-17].

Zone 1 : Le courant de choc est inférieur au seuil de perception ($I_c < 0,5 \text{ mA}$). Il n'y a pas de

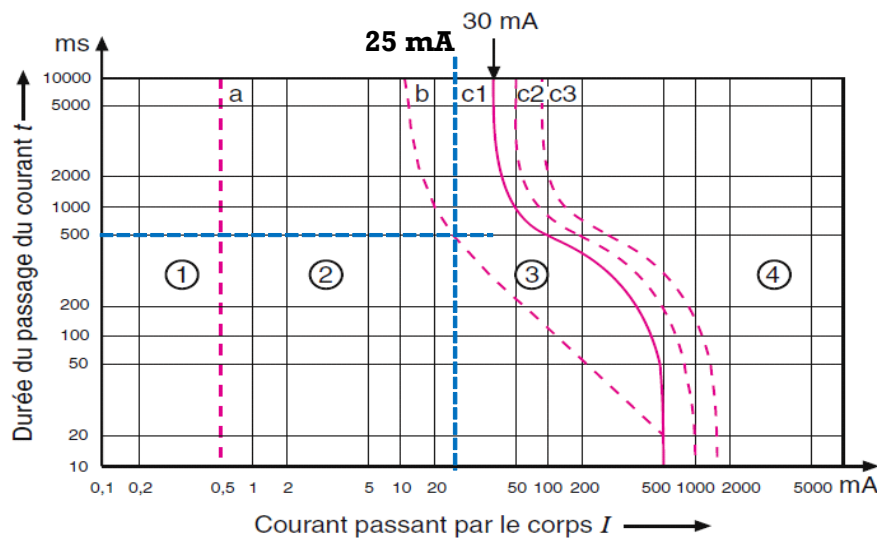
perception du passage du courant dans le corps : aucun risque.

Zone 2 : Le courant est perçu sans réaction de la personne : habituellement, aucun effet physiologique dangereux.

Zone 3 : Le courant provoque une réaction : la personne ne peut plus lâcher l'appareil en défaut. Le courant doit être coupé par un tiers afin de mettre la personne hors de danger : habituellement sans dommage organique, mais probabilité de contractions musculaires et de difficultés respiratoires.

En tenant compte d'expériences, il a été établi la courbe S, située dans la zone 3 qui définit le temps maximal de passage du courant en fonction du temps pour assurer la sécurité. Le courant supportable pendant un temps infini est de **25 mA**

Zone 4 : En plus des effets de la zone 3, la fibrillation ventriculaire augmente de 5% des cas pour la courbe C₂, 50 % des cas pour la courbe C₃, et plus de 50% au-delà de cette dernière courbe, d'où des effets patho-physiologiques importants tels qu'arrêt du cœur, arrêt de la respiration, brûlures graves.



Zones temps/courant des effets du courant alternatif (15 à 100 Hz) sur les personnes selon CEI 479-1.
La courbe C1 constitue la limite de sécurité.

Figure II.2: Relation entre le temps de passage du courant et l'intensité du courant

II.3.Effets physiologiques du courant électriques

Le corps humain est faiblement conducteur, mais le passage du courant électrique dans un corps humain peut causer des dommages irréversibles, chauffer les cellules jusqu'à provoquer des brûlures; contracter les muscles sur son passage, etc....[15-17].

II.3.1. Effet thermique

La chaleur produite grâce à l'énergie électrique est due à l'effet thermique du courant, qui consiste en l'échauffement d'un conducteur parcouru par ce courant.

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, le passage des électrons de ce courant est gêné par les atomes du conducteur contre lesquels se heurtent ces électrons ; ces derniers cèdent ainsi une part de leur énergie qui réchauffe le conducteur [15-17].

II.3.2. Effets téтанisant

Lorsque la tension est alternative, les muscles intéressés par le trajet du courant se contractent ; les mains par exemple se crispent invinciblement sur les conducteurs et empêchent ainsi tout dégagement volontaire du sujet soumis à la tension du générateur [15-17].

II.3.3. Effets respiratoires et circulatoires

Si l'intensité du courant qui traverse le corps humain atteint 20 mA, 60 secondes suffisent pour bloquer la respiration par contraction du diaphragme et des muscles respiratoires. C'est l'asphyxie ou syncope bleue.

Une fibrillation ventriculaire apparaît pour des intensités de même ordre de grandeur : elle résulte de la contraction anarchique des fibrilles du muscle cardiaque. Les battements du cœur, rapides et désordonnés, ne permettent plus d'assurer la circulation sanguine. C'est la syncope cardiaque ou syncope blanche [15-17].

II.3.4. Effets des accidents d'origine électrique sur le corps humain

- L'action du courant électrique, selon les paramètres décrits ci-avant et également en fonction de la tension, peut entraîner les conséquences suivantes[15-17] :
- Secousse, choc électrique, avec retour apparent à l'état antérieur (mais l'examen est nécessaire pour déterminer des suites éventuelles).
- Asphyxie (pouvant être mortelle).
- Fibrillation ventriculaire (mortelle le cas échéant).
- Brûlures (mortelles suivant gravité, surtout en haute tension). Les suites peuvent être diverses.
- Cardio-vasculaires (tachycardie, lésions vasculaires...).
- Neurologiques (pertes de conscience, de force musculaire...).
- Sensorielles (troubles de la vision, de l'audition...).

- Rénales (insuffisance).
- Pour les brûlures par arc : dermiques, oculaires (coup d'arc), électrothermiques profondes, thromboses, œdèmes, nécroses, etc....

II.4. Les types des contacts (d'exposition)

Les types de contact peuvent être à l'origine d'un accident d'origine électrique, cette origine de l'accident dépend des types de contact entre la personne et l'élément sous tension. Ces types de contact sont de deux sortes [15-17]:

II.4.1. Contacts directs

On parle de contact direct lorsqu'une personne touche accidentellement et directement une partie nue conductrice sous tension. Dans ce contact, le courant est pratiquement limité par la résistance du corps humain parcouru par la personne, pouvant entraîner la mort [15-17].

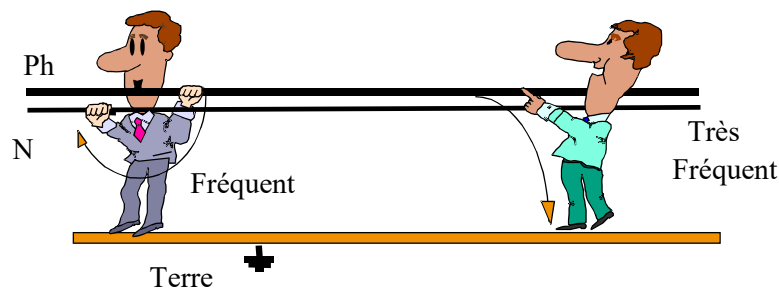


Figure II.3: Contact direct

II.4.2. Contacts indirects

Un contact indirect est un contact avec l'enveloppe métallique d'un appareil électrique, appelée « masse », mise sous tension accidentellement à la suite d'une défaillance de son isolation. C'est par exemple, le contact avec une armoire métallique, un lave-vaisselle, un sèche-linge ou une machine à laver, non relié à la terre et dont l'équipement électrique qu'elle contient présente un défaut d'isolement. Dans ce contact, le courant qui traverse la personne pouvant entraîner la mort [15-17].

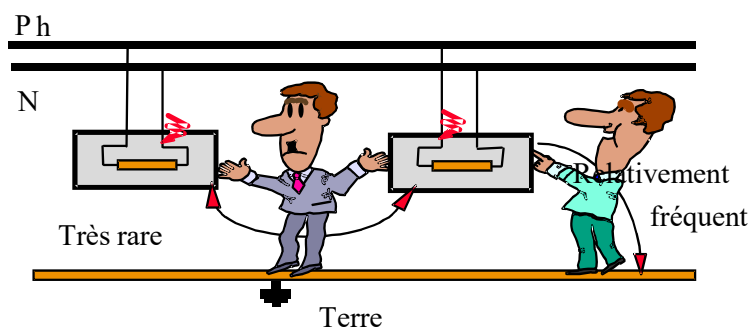


Figure II.4: Contact indirect

II.5. Prévention du risque électrique

La prévention du risque électrique repose sur des dispositions réglementaires figurant dans le Code du travail. Elle concerne la mise en sécurité des installations et des matériels électriques, et ce dès leur conception. L'objectif est d'éviter tout contact, qu'il soit direct ou indirect, avec des pièces nues sous tension ou mises accidentellement sous tension. En outre, le matériel doit être conforme à la réglementation en vigueur afin de protéger les utilisateurs [15-17].

II. 5.1. Protection contre les contacts directs

Un contact direct est un contact entre une partie du corps humain et une partie active (pièce normalement sous tension) d'une installation électrique. Pour prévenir les contacts directs il existe plusieurs moyens[15-17]:

II. 5.1.1. Éloignement

L'éloignement consiste à prévoir une distance entre les parties actives et les personnes de telle sorte qu'un contact fortuit soit impossible directement ou indirectement par l'intermédiaire d'un objet conducteur (perches, tubes métalliques...). On éloigne physiquement les conducteurs aériens nus (en général en les élevant par rapport au sol), la distance en BTA, BTB au dessus du sol est au minimum 2,3m.

II. 5.1.2. Barrière ou enveloppe

Elles constituent un obstacle (écran, boîtiers, armoires...) possédant un degré de protection minimal (IP2X ou IPXXB en basse tension, IP3X ou IPXXC en haute tension) et ne pouvant être ouverts qu'à l'aide d'une clé ou d'un outil [15-17].

II. 5.1.3. Isolation des parties actives

Celle-ci recouvre d'un isolant les parties actives et ne peut être enlevée que par destruction [15-17].

II. 5.2. Protection contre les contacts indirects

Un contact indirect est un contact entre une partie du corps humain et une masse conductrice mise accidentellement sous tension. Pour prévenir les contacts indirects il existe plusieurs moyens [15-17].

II. 5.2.1. Mise à la terre des masses des récepteurs

La prise de terre est l'ensemble des conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et permettant le passage des courants de défaut, de fuite ou de choc dans le sol. Pour les installations importantes telles que les postes et centrales, on emploie souvent l'expression du réseau de terre, ou le terme de prise de terre aux installations de faible étendue.

Cette méthode est valide si la résistance de la prise de terre est faible, ce qui n'est pas toujours facile à accomplir. Cela nécessite l'adjonction d'un dispositif différentiel qui coupe automatiquement l'alimentation dès que le potentiel des masses dépasse 25 à 50 V [15-17].

La réalisation d'une bonne prise de terre doit respecter trois éléments essentiels :

- la nature de la prise de terre.
- la nature et la résistivité du terrain.
- le conducteur de la terre

II. 5.2.2. Dispositifs de protection à courant différentiel résiduel (DDR)

La protection DDR (Dispositif Différentiel Résiduel) ouvre le circuit en cas de contact direct ou lors d'un défaut d'isolement d'un récepteur (courant de fuite). Il détecte une défaillance de l'isolement de l'alimentation se traduisant par un déséquilibre des courants dans les conducteurs. Lorsque l'intensité du courant de départ qui s'écoule dans la prise de terre atteint la valeur seuil (30 mA), l'alimentation est automatiquement coupée. Associé dans un même appareil à la protection contre les surintensités, il est appelé disjoncteur différentiel.

Le disjoncteur ou interrupteur différentiel est muni d'un tore magnétique qui détecte la différence entre le courant issu de la phase et du courant de retour du neutre.

En cas de défaut d'isolement d'un appareil électroménager, la protection est assurée conjointement par un dispositif différentiel et une bonne prise de terre. Si le courant de défaut $I_{\Delta} = I_P - I_N$ dépasse la sensibilité du disjoncteur différentiel, celui-ci ouvre le circuit. Ce dispositif ouvre donc le circuit avant qu'une personne ne touche l'appareil.

La résistance de la prise de terre des masses (RT) est liée à l'intensité du courant de déclenchement du disjoncteur (I_{Δ}) et à la tension limite de sécurité (UL) par la relation [15-17]:

$$R_d \times I_{\Delta} \leq U_L \quad (\text{II.1})$$

Endroit	Sec	Humide	Immergé
U_L	50 V	25 V	12 V

Tableau II.3: Tension limite conventionnelle de contact

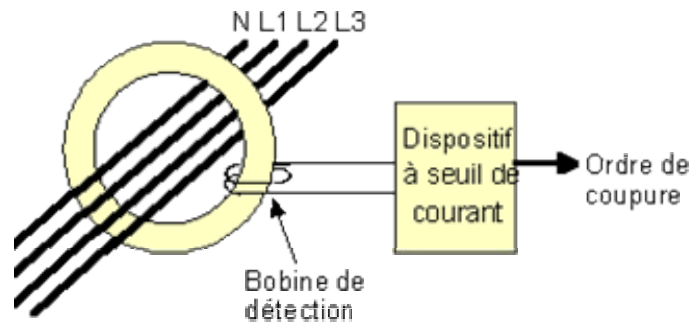


Figure II.5: Principe de fonctionnement d'un disjoncteur différentiel

Lors d'un défaut la somme vectorielle des courants dans les conducteurs de phase et le neutre est différent de zéro, il apparaît donc un courant dans la bobine de détection proportionnel au courant de défaut I_d . La bobine alimente un dispositif à seuil de courant qui donnera l'ordre de déclenchement à l'appareil de coupure (interrupteur, disjoncteur). Le disjoncteur différentiel comporte en plus de la fonction différentielle, un dispositif de protection contre les surcharges et les courts-circuits

II.5.2.3. Protection par séparation des circuits

Les transformateurs de séparation sont utilisés pour des raisons de sécurité pour créer localement une nouvelle installation du domaine BT, de faible étendue, entièrement isolée de la terre et des masses ainsi que la source d'énergie primaire du domaine BT.

Le transformateur de séparation interrompt la liaison entre le conducteur neutre et la terre. Suite à cette séparation, le conducteur de phase et le conducteur neutre ne présentent plus de différence de potentiel par rapport à la terre ; aucun courant ne circule si l'on entre en contact avec un conducteur [15-17].

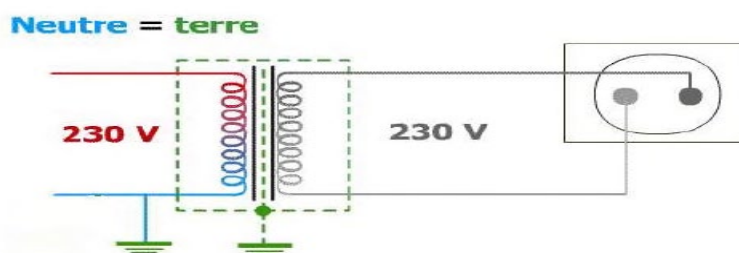


Figure II.6: Transformateur de separation

A droite de la figure , le circuit primaire dont une des bornes est reliée au neutre lui-même relié à la terre. L'autre borne est reliée à la phase. En cas de contact de la main avec la phase : le courant peut se reboucler via la terre. Dans le coté du circuit secondaire aucun risque n'est apparu, aucune borne de la bobine n'est référencée, on appelle cela une tension flottante.

II. 5.3.Equipements de protection et de sécurité

Les équipements de protection et de sécurité sont des éléments qui servent principalement à protéger les employés contre l'éventuel danger que représente certaines activités en contact avec l'énergie électrique entreprise. Ces dangers peuvent avoir de réelles conséquences sur la santé physique de l'employé qui y est exposé. Ils peuvent être individuelle ou collective [15-17].

II. 5.3.1.Equipements de protection individuelle

Les équipements de protection individuel (EPI) font partie intégrante de la sécurité électrique. Ils sont définis par le code du travail comme des « dispositifs ou moyens portés par une personne en vue de la protéger contre les risques susceptibles de menacer sa santé et sa sécurité ». Les conditions d'utilisation des EPI doivent :

- être conformes aux prescriptions de la réglementation et aux normes quand elles existent,
- faire l'objet du marquage de conformité CE.

Tout utilisateur doit vérifier son bon état à chaque utilisation. Les EPI détériorés sont remplacés et mis au rebut [15-17].

II. 5.3.1.1. Equipement d'un électricien

L'équipement d'un électricien est composé :

- d'un casque isolant et antichoc,
- d'une paire de gants isolants,
- d'un écran facial anti-UV
- des chaussures ou bottes isolantes de sécurité,
- d'une combinaison de travail en coton ignifugé ou en matériau similaire .

II. 5.3.1.2.Equipements individuels de sécurité

Les équipements individuels de sécurité (EIS). Ce sont :

- des tapis isolants,
- des tabourets isolants,
- des échelles isolantes pour les travaux en élévation,
- des perches isolantes,
- des outils isolés,
- de cadenas et d'étiquettes de consignation,
- d'un vérificateur d'absence de tension (VAT),
- des dispositifs de mise à la terre et en court-circuit.

II. 5.3.2. Equipements de protection collective

Les mesures de protection collective (EPC) sont des dispositifs techniques qui isolent un danger des personnes potentielles exposées à ce même danger, c'est toute mesure destinée à mettre hors de portée par éloignement, par obstacle ou par isolation, tels que les nappes isolantes, balisage de la zone de travail, l'utilisation d'appareils de mesurage portatifs, Les filets de protection antichute.

II.6. Régimes de neutre

Dans l'énergie électrique, un régime de neutre définit la façon dont est raccordée la terre du côté de la source de tension (ex : un transformateur) et du côté des masses de l'utilisateur (carcasses des équipements électriques). C'est-à-dire la façon dont les carcasses métalliques des appareils électriques sont raccordées à la terre[18-21].

II.6.1. Définition du régime de neutre

Egalement appelés "schémas de liaisons à la terre" (SLT). Ils sont définis par la norme CEI 60364-4-41. Le régime de neutre est représenté par deux lettres :

- La première lettre indique la situation du point neutre du transformateur par rapport à la terre :
 - **T** pour une liaison directe à la terre
 - **I** pour une absence de liaison à la terre ou une liaison par impédance
- La deuxième lettre indique la situation des masses du récepteur
 - **T** masse reliée à la terre
 - **N** masse reliée au neutre.

Les schémas de liaison à la terre ont pour but de protéger les personnes et le matériel en

maîtrisant les défauts d'isolement. En effet, pour des raisons de sécurité, toute partie conductrice d'une installation est isolée par rapport aux masses. Cet isolement peut se faire par éloignement, ou par l'utilisation de matériaux isolants. Mais avec le temps, l'isolation peut se détériorer (à cause des vibrations, des chocs mécaniques, de la poussière, etc.), et donc mettre une masse (la carcasse métallique d'une machine par exemple) sous un potentiel dangereux. Ce défaut présente des risques pour les personnes, les biens mais aussi la continuité de service. Il existe plusieurs régimes de neutre dont les plus utilisés [18-21].

II.6.2. Régime du neutre TT

Dans ce type de schéma, dit de "neutre à la terre" : le neutre de la source est relié à une prise de terre, en général distincte de celle des masses, toutes les masses protégées par un même dispositif de coupure doivent être reliées au même système de mise à la terre [13].

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut I_d , est évacué par le sol, par l'intermédiaire des prises de terre du neutre et des masses. Ce courant de fuite sera détecté, et l'installation mise hors service immédiatement. I_d est essentiellement limité par les résistances des prises de terre. Dans l'hypothèse d'un défaut franc, le courant de défaut est [18-22]:

$$I_d = \frac{U_0}{\sum R_{Terre}} \quad (\text{II.2})$$

Avec : $\sum R_{Terre}$ étant la somme des résistances de prise de terre du neutre R_n , et de prise de terre des masses R_m .

Ce courant de défaut induit une tension de défaut aux bornes de la résistance de terre des masses:

$$U_d = R_m \times I_d \quad (\text{II.3})$$

Ou:

$$U_d = \frac{U_0 \times R_m}{R_n + R_m} \quad (\text{II.4})$$

Les résistances de terre étant généralement faibles et de même ordre de grandeur (environ 10 V), cette tension de l'ordre de $U_0/2$ est dangereuse; il est donc obligatoire de prévoir une déconnexion automatique de la partie de l'installation concernée par le défaut

[18-22].

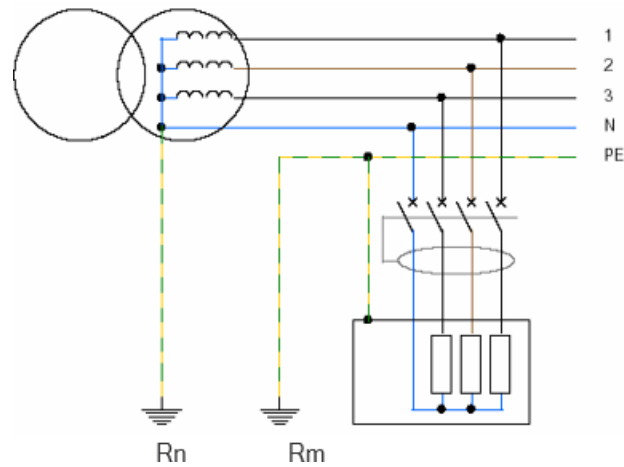


Figure II. 7: Représentation du regime de neutre TT

Le courant de défaut I_{d0} au-delà duquel il y a risque est estimé suivant la relation:

$$I_{d0} = \frac{U_L}{R_a} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

U_L : Tension limite maximum de contact

R_a : Résistance de la prise de terre

Au delà de cette valeur, il y a danger.

Il est nécessaire de mettre en oeuvre, en tête d'installation, au moins un disjoncteur différentiel résiduel (DDR). Pour améliorer la disponibilité de l'énergie électrique il fallait que ce disjoncteur employé aurait une sélectivité ampérométrique et chronométrique au déclenchement et un réglage de protection à maximum de courant. disjoncteur différentiel résiduel (DDR) aura un seuil de courant assigné ID_n inférieur à I_{d0} .

La mise hors tension, par intervention du disjoncteur différentiel résiduel (DDR), doit se faire d'après la norme en moins de 1s. A noter que la protection par disjoncteur différentiel résiduel (DDR):

- il est indépendante de la longueur des câbles;
- Il autorise plusieurs prises de terre R_m séparées (disposition non souhaitable car le

PE n'est plus une référence de potentiel unique pour l'ensemble de l'installation) [18-22].

II.6.2.1. Régime du neutre. Calcul d'une installation : vérification de la protection pour un défaut simple, franc

II.6.2.1.1. Calcul de la tension de contact

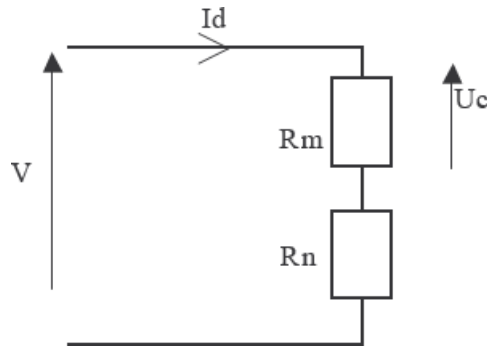


Figure II. 8: Schemas simplifiée du regime de neutre TT

Pour cet exemple, on prendra les valeurs : $V = 230 \text{ V}$, $R_m = 80 \Omega$, $R_n = 30 \Omega$

On considérera que le défaut est survenu dans un local sec ($U_L \leq 50 \text{ V}$). Pour le calcul de U_c , nous utiliserons le pont diviseur de tension [18-22] :

$$U_c = \frac{R_m \cdot V}{R_m + R_n} = \frac{80 \cdot 230}{80 + 30} = 167 \text{ V} \quad (\text{II.6})$$

Cette tension de contact est dangereuse car $U_c > U_L$ ($167 \text{ V} > 50 \text{ V}$), donc il est nécessaire de mettre hors tension l'installation électrique.

On observe que, plus la valeur de la prise de terre des masses est importante, plus la tension de contact sera grande: il faut donc rendre la valeur de la prise de terre des masses la plus faible possible.

II.6.2.1.2. Détermination du temps de coupure

Nous allons, à présent, déterminer le temps maximum que l'appareil de protection ne doit pas dépasser pour réagir sans mettre en danger la personne.

Voici un tableau donnant le temps de coupure maximal du dispositif de protection en fonction de la valeur de la tension de contact pour un défaut se situant dans un local où la valeur de la tension limite est 50 V .

D'après le tableau ci-dessous, l'alimentation devra être interrompue en un temps

inférieur ou égal à 0,17 s.

tension de contact présumée (V)	temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	
	courant alternatif	courant continu
< 50	5	5
50	5	5
75	0,60	5
90	0,45	5
120	0,34	5
150	0,27	1
220	0,17	0,40
280	0,12	0,30
350	0,08	0,20
500	0,04	0,10

Tableau II.4: Temps maximal de déclenchement en fonction de tension de contact

II.6.2.1.3. Calcul du courant de défaut

A l'aide du schéma équivalent précédent, on peut calculer courant de défaut suivant la relation ci-dessous [18-22]:

$$I_d = \frac{V}{R_m + R_n} = \frac{230}{80 + 30} = 2.1 \text{ A} \quad (\text{II.7})$$

Ce courant de défaut est trop faible pour faire réagir les protections contre les surintensités (disjoncteur magnétothermique, fusibles).

L'appareil de coupure automatique approprié sera un dispositif différentiel à courant Résiduel (D.D.R.).

Calculons, à présent, la valeur du courant (IP) traversant la personne qui toucherait la machine en défaut (on prendra la résistance corporelle $R_h = 1000 \Omega$), d'où:

$$I_p = \frac{U_c}{R_h} = \frac{167}{1000} = 167 \text{ mA} \quad (\text{II.8})$$

Ce courant est largement supérieur au seuil de non danger pour le corps humain (10 mA).

II.6.2.1.4. Choix de la sensibilité du D.D.R.

Pour ne pas mettre en danger les personnes, il faut que la sensibilité $I\Delta n$ du dispositif différentiel à courant Résiduel (D.D.R.) soit [18-22]:

$$I\Delta n \leq \frac{UL}{R_m} = \frac{50}{80} = 625 \text{ mA} \quad (\text{II.9})$$

On s'aperçoit qu'il est très simple d'assurer une bonne sécurité même si la prise de

terre des masses a une valeur assez élevée, il suffit pour cela de corriger la sensibilité du D.D.R.

Il nous faudra donc un appareil différentiel dont la sensibilité devra être inférieure à 625mA, et qui assurera une ouverture du circuit en défaut en moins de 0,17s.

II.6.3. Regime du neutre IT

Dans ce type de schéma, dit « à neutre isolé », le neutre du transformateur est [18-22]:

- Soit isolé de la terre (neutre isolé),
- Soit relié à la terre par une impédance élevée (neutre impédant) ; Toutes les masses de l'installation sont reliées à la terre.

Le premier défaut d'isolement engendre un courant de défaut I_d par l'intermédiaire de la prise de terre des masses R_m , de la prise de terre du neutre R_n , et de l'impédance élevée de liaison du neutre à la terre : le courant I_d est très faible (de l'ordre de 100mA).

La tension de contact U_c ne vaut alors que quelques dixièmes de Volts. Cette tension est non dangereuse, donc l'installation peut être maintenue en service.

$$U_c = R_m \times I_d \quad (\text{II.10})$$

Ce premier défaut doit néanmoins être signalé par le CPI (contrôleur permanent d'isolement). Il faut disposer d'un système de localisation du défaut pour pouvoir intervenir sur le champ.

Dans le cas contraire, dans l'hypothèse de la survenue d'un deuxième défaut, la sécurité est assurée comme en régime TN par le disjoncteur magnétothermique, ce qui entraîne une interruption de service.

Le limiteur de surtension a pour but d'éliminer les surtensions par rapport à la terre en cas de claquage entre enroulements du transformateur : il transforme le régime IT en régime TN en cas de surtension importante [18-22].

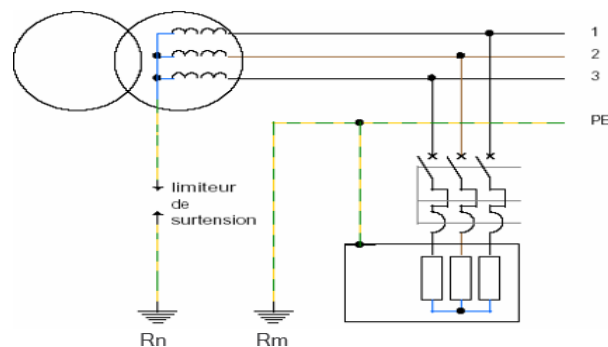


Figure II. 9: Représentation du regime de neutre IT

Pour la signalisation d'un défaut il nécessite d'installer un Contrôleur Permanent d'Isolément. Ce contrôleur mesure permanence l'isolement du réseau par rapport à la terre et signale toute baisse du niveau d'isolement [18-22].



Figure II. 10: Contrôleur Permanent d'Isolément

Pour la recherche de défaut, un générateur de courant très basse fréquence (10 Hz) est relié d'une part à la terre, d'autre part à l'un des conducteurs actifs du réseau à contrôler. Il fait circuler dans le défaut un courant qui peut être détecté en utilisant un transformateur tore associé à un filtre sélectif accordé sur cette fréquence [18-22].

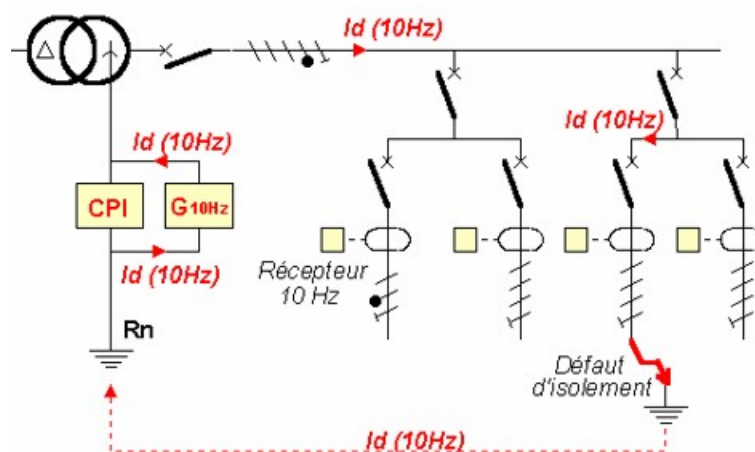


Figure II. 11: Recherche du défaut par un générateur de courant très basse fréquence

II.6.4. Régime du neutre TN

Dans ce régime, le neutre du transformateur est relié à la terre, les masses métalliques sont reliées au Neutre par l'intermédiaire du PE [18-22].

Pour le régime de neutre TN, la création d'un défaut d'isolement au niveau d'un récepteur peut être assimilé à une liaison entre une phase et le neutre (court-circuit). Il existe en fait, deux schémas d'installation possibles : les schémas TNC et TNS :

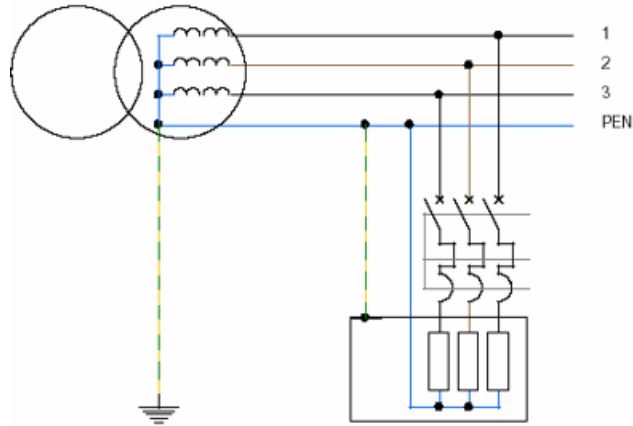


Figure II. 12: Représentation du régime de neutre TNC

Le conducteur neutre du récepteur est connecté au conducteur de protection PEN. Ce qui permet de n'utiliser qu'un dispositif de protection tripolaire (au lieu d'un tétrapolaire pour la prise en compte du neutre) [18-22].

Un défaut franc au niveau du récepteur équivaut à la création d'un court-circuit entre la phase 3 et le neutre.

Le schéma TNC est le schéma d'installation qui sera toujours recherché. A défaut de pouvoir utiliser le schéma TNC, on utilisera le schéma d'installation TNS (dont le coût est plus élevé). L'utilisation de ce schéma n'est autorisée que sur les conducteurs de section supérieure à : 10 mm² pour les conducteurs en cuivre ; 16 mm² pour les conducteurs en aluminium. TNS :

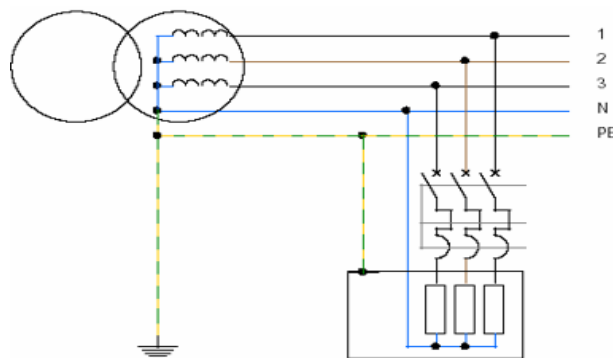


Figure II. 13: Représentation du régime de neutre TNS

Un défaut franc au niveau du récepteur équivaut à la création d'un court-circuit entre la phase 3 et le neutre. Le schéma TNS est à utiliser dans les cas où le schéma TNC ne

peut convenir, c'est-à-dire [18-22]:

Lorsque la section des conducteurs est $>$ à 10 mm^2 pour le cuivre. Lorsque la section des conducteurs est $>$ à 16 mm^2 pour l'aluminium.

Lorsqu'une longueur de câbles trop importante fait baisser la valeur du courant de court-circuit et par conséquent, le temps de déclenchement du dispositif de protection.

Les protections à associer sont des appareils de protection contre les courts circuits type disjoncteurs pour les installations dont les liaisons sont courtes [18-22].

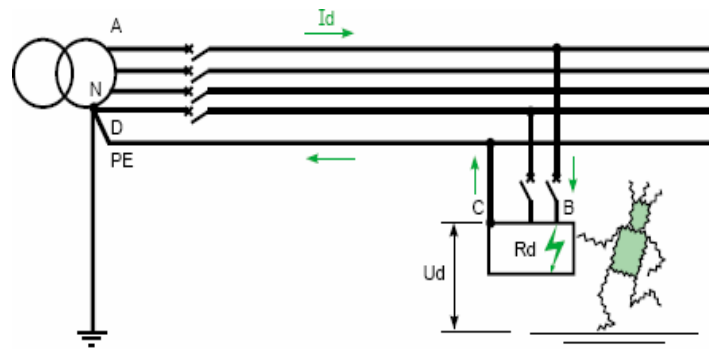


Figure II.14: Présence d'un défaut d'isolement dans un régime du neutre TNS

Pour les installations à liaisons longues, une protection différentielle se révèle indispensables.

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut I_d n'est limité que par l'impédance des câbles de la boucle de défaut [18-22]:

$$I_d = \frac{U_0}{R_{ph} + R_d + R_{PE}} \quad (\text{II.11})$$

Pour un départ et dès que $R_d = 0$, l'équation précédente devient:

$$I_d = \frac{0.8 \times U_0}{R_{ph} + R_{PE}} \quad (\text{II.12})$$

En effet, lors d'un court-circuit, il est admis que les impédances en amont du départ considéré provoquent une chute de tension de l'ordre de 20 % sur la tension simple U_0 , qui est la tension nominale entre phase et terre, d'où le coefficient de 0,8.

Le courant de défaut I_d induit donc une tension de défaut, par rapport à la terre égale

à [18-22]:

$$U_d = R_{PE} \times I_d \quad (\text{II.13})$$

En substituant la valeur donné du courant dans l'équation précédente, on obtient :

$$U_d = \frac{0,8 \times U_0 \times R_{PE}}{R_{ph} + R_{PE}} \quad (\text{II.14})$$

Pour les réseaux 230/400 V, cette tension de l'ordre de $U_0 / 2$ (si $R_{ph} = R_{PE}$) est dangereuse car elle est supérieure à la tension limite de sécurité, même en milieu sec ($U_L = 50$ V). Il est alors nécessaire d'assurer une mise hors tension automatique et immédiate de l'installation ou de la partie de l'installation [18-22].

Pour que la protection assure bien sa fonction, il faut $I_a < I_d$, d'où l'expression de L_{max} , longueur maximale autorisée par la protection ayant pour seuil I_a :

$$L_{max} = \frac{0,8 \times U_0 \times S_{ph}}{\rho(1+m)I_a} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

L_{max} : longueur maximale des cables en m ; U_0 est la tension simple du réseau triphasé ; ρ est la résistivité du conducteur à la température de fonctionnement normal ; I_a est le courant de coupure automatique ; m est le rapport des sections (sans unité).

Pour un disjoncteur $I_a = I_m$ (I_m courant de fonctionnement du déclencheur magnétique ou court-retard), pour un fusible, courant tel que le temps total de coupure du fusible (temps de préarc + temps d'arc) soit conforme à la norme [18-22]:

$$m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

S_{ph} : La section des conducteurs de phase

S_{PE} : La section du conducteur de protection

Si la ligne est d'une longueur supérieure à L_{max} , il faut soit diminuer I_a , soit augmenter S_{PE} , soit mettre en œuvre un Dispositif Différentiel Résiduel (DDR).

En conclusion, l'installation TN est économique (TNC notamment), mais doit d'abord être calculée

avant d'être installée, puis vérifiée.

II.7. Calcul de la résistance de mise à la terre

La résistance de terre est une notion de base qui caractérise une mise à la terre (MALT) d'un système d'alimentation d'énergie, le passage du courant engendre une élévation du potentiel dans le sol. La résistivité du sol est de loin la plus importante pour servir à la détermination de plusieurs paramètres pour limiter une telle surtension [21,23].

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales ou horizontales telles que des tiges, des conducteurs ou autres pièces métalliques. La disposition physique des appareils et des structures métalliques à mettre à la terre dans un poste commande en pratique la forme de la prise de terre.

Elle sera généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et forme le treillis du poste. La MALT d'une ligne de transport est habituellement constituée des fondations du pylône ou des ancrages en contact avec le sol.

Sur le tableau II.5 , sont présentées les formules de calcul de la résistance de terre pour les configurations les plus courantes:

Constitution de la prise de terre	Calcul	Definition des grandeurs
Electrode hémisphérique	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}$ (II.17)	r est le rayon du disque hémisphérique (m); ρ est la resistivité du sol
Electrode cylindrique verticale	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \log\left(\frac{4 \cdot L}{d}\right)$ (II.18)	L=longueur de l'électrode (m) ρ = resistivité du sol d=diamètre de l'électrode (m)
Electrode par cable horizontal	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \left(\log\left(\frac{2 \cdot L}{\sqrt{d \cdot h}}\right) - 1\right)$ (II.19)	L=partie enterrée de l'électrode ρ =résistivité du sol d=diamètre l'électrode h= profondeur d'enfouissement
Plaque verticale	$R = \frac{0,8 \cdot \rho}{L}$ (II.20)	ρ =résistivité du sol L = périmètre de la plaque

Tableau II.5 : Les différents calcul de la résistance de terre

II.8. Tensions de contact et de pas

Lorsqu'un défaut se produit, le courant de défaut s'écoule vers la terre en raison duquel le gradient de potentiel à proximité de l'équipement électrique s'est développé. Ce gradient potentiel peut affecter une personne de deux manières, soit par contact, soit par pas [24].

II.8.1. Tension de contact

Lorsqu'un courant s'écoule au sol par une prise de terre, la densité du courant J diminue avec l'éloignement. Il en va de même du champ électrique E et du potentiel V .

La tension de contact est la différence de potentiel entre deux points susceptibles d'être touchés simultanément par les extrémités d'un individu. Cette différence de potentiel est causée par le passage d'un courant vers le sol à travers une MALT, ce qui élimine le cas d'un contact avec un objet normalement sous tension. Un individu peut être impliqué dans un accident électrique selon différentes situations [23].

La tension de touche (contact) est déterminée par l'équation suivante:

$$V_{contact} = \left(R_h + \frac{R_c}{2} \right) \cdot \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

R_h est la résistance corporelle ;

R_c est la résistance de contact du personne avec le sol et avec le conducteur actif, elle est égale à $3 \rho_s$; ρ_s est la résistivité du sol

t est la durée de passage du courant en secondes

K est une constante qui dépend du poids du personne : pour les personnes pesant moins de 70 kg $K = 116$; et pour les personnes pesant plus de 70 kg, $K = 157$.

II.8.2. Tension de pas

La tension de pas est la différence de potentiels entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum. Supposant que le corps humain constitue la trajectoire du courant soit d'une main à des pieds. la résistance du corps humain R_h est représentée par une valeur qui est égale à 1000Ω . En suite la tension de pas est déterminée comme suit [23]:

$$V_{pas} = (R_h + 2.R_c) \cdot \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.22})$$

V_{pas} est la tension tolérable entre deux points du sol qui peuvent être touchés simultanément par les deux pieds d'un être humain.

Dalziel en basant sur ses études, il a développé une formule empirique concernant la durée de passage du courant à travers le corps humain que provoque la fibrillation ventriculaire (VF), elle est exprimée par la relation suivante :

$$I_v = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (\text{II.23})$$

II.9. Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé à exposer l'essentiel de notions théoriques concernant le risque électrique, ses conséquences sur l'être humain et les facteurs de gravité associés, en suite les types de contact avec les conducteurs actifs et les moyens de protection nécessaires, la notion de mise à la terre et les différentes liaisons des neutres avec le sol a été introduite brièvement ainsi que l'incidence d'un défaut d'isolement et les différents modes de protection qui constitue la principale objective de cette étude. Lors d'un défaut d'isolement, l'intensité de court-circuit est élevée et peut provoquer des effets indésirables pour les agents d'intervention et de maintenance, ainsi que des dommages aux matériels du réseau électrique. Pour garantir la sécurité des individus et des biens, il faut que la résistance de la prise de terre et la selectivité des appareils de protection différentiels soient bien appropriées.

Chapitre III

III.1 Introduction

L'énergie électrique présente de multiples *avantages* pour l'être humain dans sa vie quotidienne, mais sa mauvaise utilisation entraîne des risques tant pour les personnes que pour les matériels. Si un courant traverse le corps humain, il y a risque de lésions. Il est donc nécessaire de protéger les personnes contre de tels risques. Le risque électrique comprend le risque de contact, direct avec les conducteurs actifs ou non direct avec les masses métalliques mises accidentellement sous tension, pour des raisons de sécurité, ces masses sont reliées par un conducteur de protection lui-même relié à une prise de terre. La sécurité des personnes et du matériel est assurée différemment en fonction du régime de neutre utilisé dans une installation électrique.

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation concernant le système de mise à la terre et la protection contre les contacts dus aux défauts d'isolement des récepteurs.

III.2. Calcul de la résistance de système de mise à la terre

Le système de mise à la terre est un élément essentiel du système de sécurité électrique, le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre est extrêmement complexe, A part les méthodes de calculs analytiques qui permettent de la calculer approximativement la résistance de mise à la terre. Toutefois, quatre facteurs affectant la résistance de terre.

III.2. 1. Effet de la résistivité du sol

La figure III.1 montre les valeurs des résistances de différentes configurations en fonction de la résistivité du sol supposé homogène, plus la résistivité du sol augmente, plus la résistance de terre est grande, Le facteur de la valeur de résistance du sol n'est pas contrôlable et est généralement sujet à de grandes variations, en raison de la composition du sol (par ex. argile, gravier et sable), l'humidité, de la température et de la teneur en produits chimiques, elle varie en fonction de la profondeur et décroît généralement.

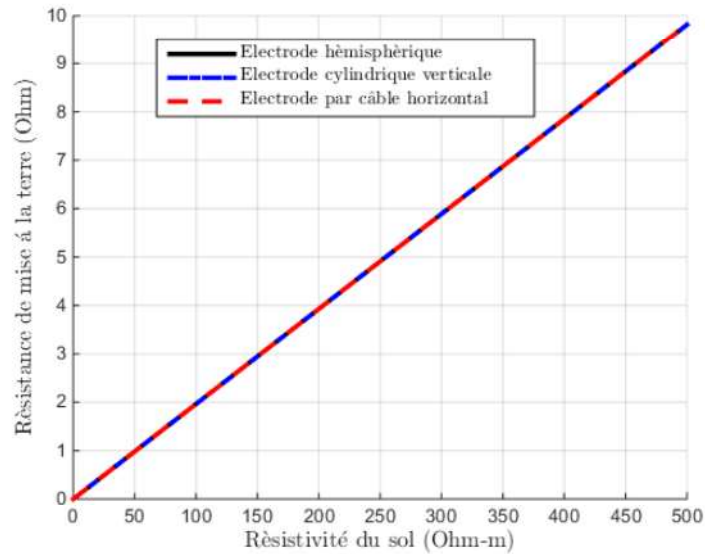


Figure III.1: Résistance de mise à la terre en fonction de la résistivité du sol

III.2. 2. Effet du rayon de l'électrode de la prise de terre

La résistance de la mise à la terre en fonction du rayon de l'électrode de la prise de terre d'un sol homogène de résistivité 100Ω pour plusieurs configurations est montrée dans la figure III-2. Comme est représentée dans cette figure, l'augmentation du rayon de l'électrode de la prise de terre diminue fortement la résistance de l'électrode hémisphérique, et il a très peu d'effet sur l'abaissement de la résistance des électrodes cylindrique et du câble horizontal.

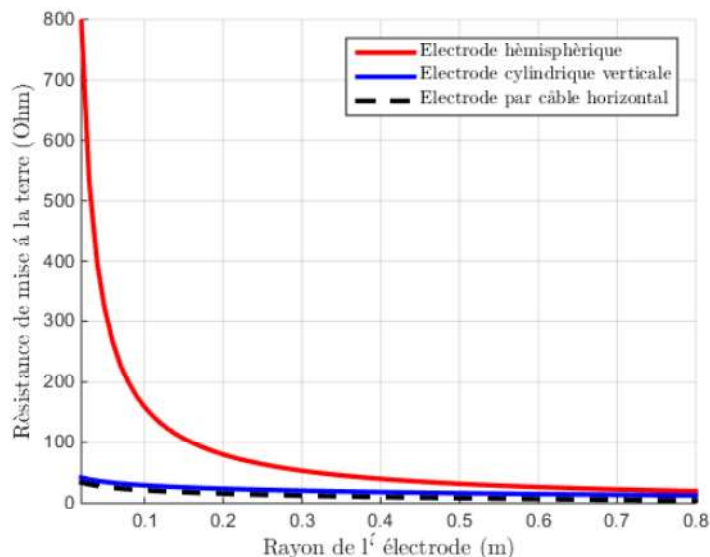


Figure III.2: Résistance de mise à la terre en fonction du rayon de l'électrode

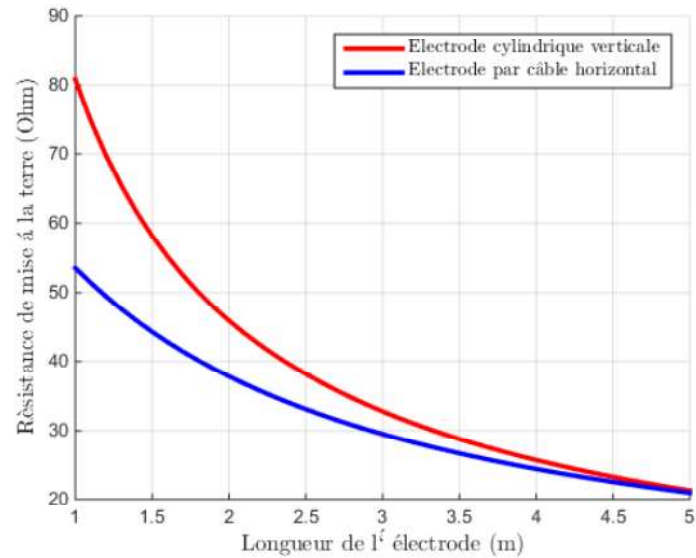


Figure III.3: Résistance de mise à la terre en fonction de la longueur de l'électrode

III.2. 3. Effet de la longueur de l'électrode de la prise de terre

La figure III-3 montre les valeurs des résistances pour différentes valeurs de la longueur de l'électrode d'un sol homogène de résistivité 100Ω , cette figure montre que l'augmentation de la longueur de l'électrode réduit la résistance de mise à la terre.

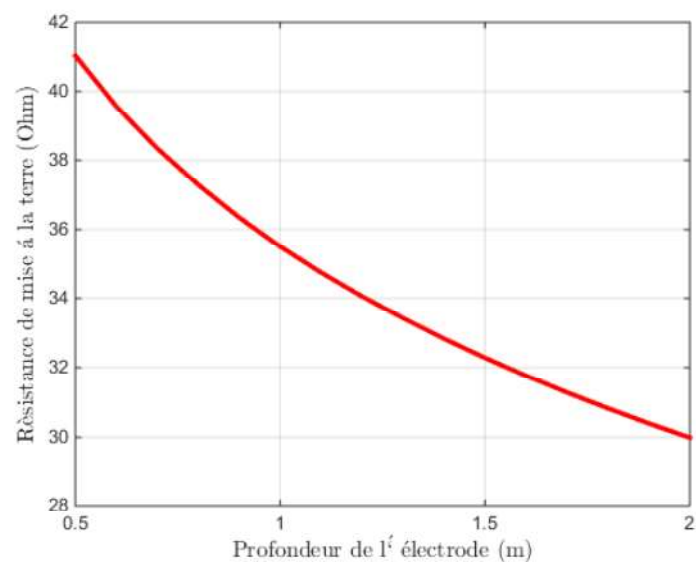


Figure III.4: Résistance de mise à la terre en fonction de la profondeur de l'électrode du câble horizontal

III.2. 4. Effet de la profondeur de l'électrode de la prise de terre

La figure III-4 montre l'influence de la profondeur l'électrode du câble horizontal sur les valeurs des résistances de mise à la terre homogène de résistivité 100Ω , cette figure montre que l'augmentation de la profondeur de l'électrode fait baisser la résistance de mise à la terre.

III.3. Mise en évidence d'un défaut d'isolement

Le choc électrique c'est l'effet physiopathologique résultant du passage d'un courant électrique de choc dans le corps humain lors d'un contact direct ou indirect.

Un courant de choc dangereux peut traverser le corps humain si les conditions suivantes sont remplies :

Le corps humain sert d'élément conducteur dans un circuit fermé ;

Les conducteurs actifs ou les masses métalliques se trouvent à des potentiels différent l'un de l'autre.

L'intensité du courant est suffisamment élevée ou la durée du passage du courant électrique dans le corps est suffisamment longue

Généralement, le corps humain est un bon conducteur, sa résistance évolue suivant beaucoup de paramètres, l'intensité du courant, durée du passage du courant, état de la peau (sèche, humide, mouillée), nature du sol, capacité d'isolation des chaussures portées. On peut considérer que la résistance moyenne du corps humain y compris sa résistance de contact avec le courant et avec le sol est de l'ordre de 2000Ω

En effet, prenons le cas d'une machine avec une carcasse métallique. Il se peut que le fil de phase finisse par se dénuder et touche la carcasse métallique. Dans ce cas la carcasse acquiert le potentiel du conducteur par rapport à la terre. Si une personne vient à toucher la carcasse alors un courant de défaut (fuite) va traverser le corps de cette personne pour rejoindre la terre. Le schéma équivalent électrique de la maille dans laquelle circule le courant de défaut est représenté dans la figure III-5.

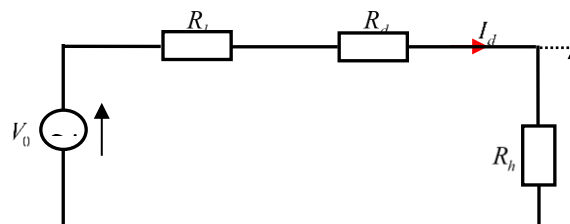


Figure III.5: Représentation de la boucle de défaut dans le circuit électrique

La loi d'Ohm est considérée comme l'équation du risque électrique. Elle relie la résistance, la tension et l'intensité du courant. Elle permet alors de déterminer l'intensité du courant qui va traverser le corps humain lorsque la personne est en contact avec une tension électrique. L'expression du courant de choc est donnée par :

$$I_d = \frac{V_0}{R_l + R_d + R_h}$$

Où :

I_d est le courant de défaut; V_c est la tension appliquée dans le circuit; R_l est la résistance de la ligne active (faible valeur); R_d est la résistance de fuite (défaut); R_h est la résistance du corps humain.

La tension de contact dans la quelle soumise le corps humain est donnée par la relation suivante :

$$U_c = I_d \times R_h$$

Pour cet exemple, on prendra les valeurs:

$$V_c = 230 \text{ V}, R_l = 0.5 \text{ } \Omega, R_d = 20 \text{ } \Omega, R_h = 2000 \text{ } \Omega$$

Le courant de choc est de valeur :

$$I_d = \frac{V_0}{R_l + R_d + R_h} = \frac{230}{0.5 + 20 + 2000} = 113,8 \text{ mA}$$

La personne est soumise à une tension d'une valeur :

$$U_c = I_d \times R_h = 113,8 \times 2000 = 227,7 \text{ V}$$

En effet, suivant la figure III-6, un courant de 113,8 mA traversant une personne pendant 1 seconde est mortel pour un être humain.

Selon la figure III-7, la valeur de la tension de contact dans laquelle est soumise cette personne $U_c = 224,28 \text{ V}$ est dangereuse quel que soit la tension limite choisie et il faut donc couper, le plus rapidement possible, pour protéger les personnes

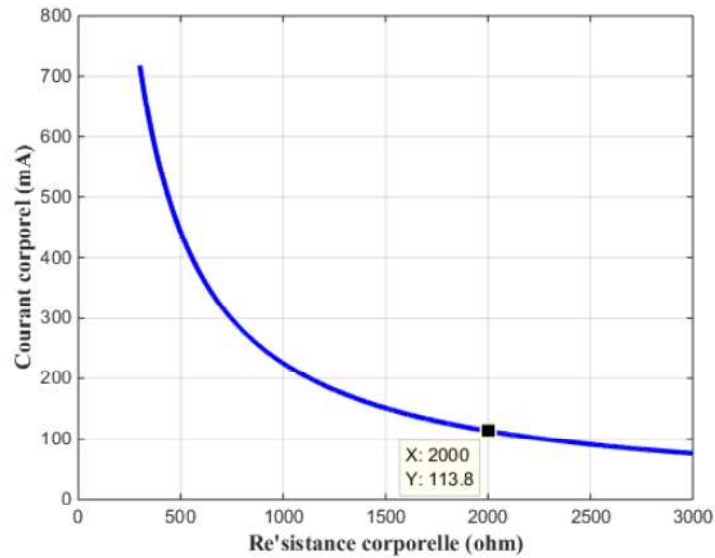


Figure III.6: Variation du courant de défaut (courant corporel) avec la résistance corporelle

La figure III-6 représente le courant corporel(mA) en fonction la résistance corporelle(ohm)

Si on démunie le courant la résistance augmente donc sont proportionnels.

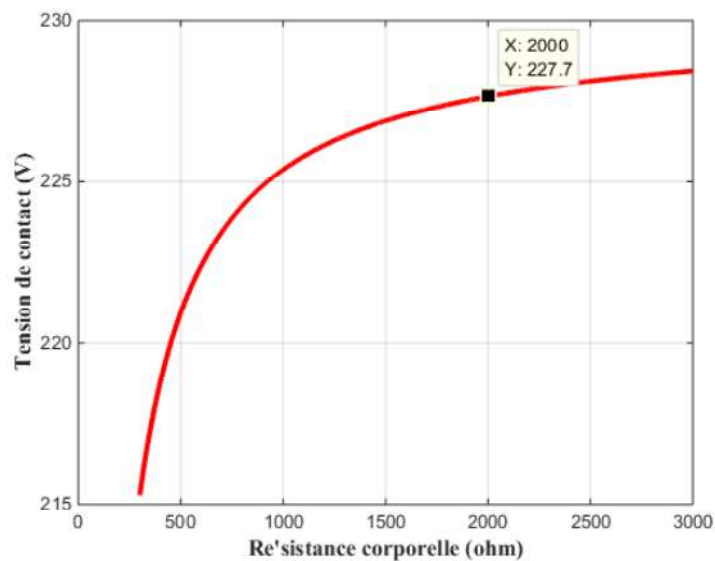


Figure III.7: Variation de la tension de contact avec la résistance corporelle

On remarque d'après le schéma si dessus que si on augmente la résistance corporelle la tension de contact augmente aussi

Dans le cas ou la carcasse de l'appareil en défaut est mise à la terre avec une résistance de $R_m = 25 \Omega$.

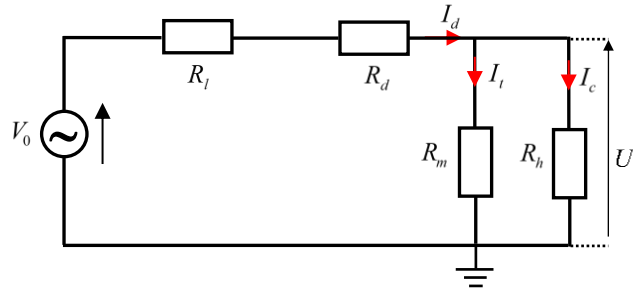


Figure III.8: Schéma équivalent du circuit électrique en cas de mise à la terre de la carcasse

Le courant de défaut est donné par la relation :

$$I_d = \frac{V_0}{R_l + R_d + \left(\frac{R_m \times R_h}{R_m + R_h} \right)} = \frac{230}{0.5 + 20 + \left(\frac{25 \times 2000}{25 + 2000} \right)} = 5,09 \text{ A}$$

La personne est soumise à une tension d'une valeur :

$$U_c = I_d \times \left(\frac{R_m \times R_h}{R_m + R_h} \right) = 5,09 \times \left(\frac{25 \times 2000}{25 + 2000} \right) = 125,68 \text{ V}$$

L'intensité du courant traversant le corps humain est donnée comme suit :

$$I_d = \frac{U_c}{R_h} = \frac{125,68}{2000} = 62.84 \text{ mA}$$

L'intensité du courant évacué vers le sol à travers la résistance de la mise à la terre de la masse métallique qui induit une tension aux ses bornes est donnée comme suit :

$$I_r = \frac{U_c}{R_l} = \frac{125,68}{25} = 5.03 \text{ A}$$

On constate malgré la mise à la terre de la masse métallique que les valeurs de la tension de contact et le courant corporel diminuent mais restent dangereuses car ils dépassent les limites permises par les normes en vigueur.

Dans le cas où le neutre du circuit et la carcasse de l'appareil en défaut sont mises à la terre avec des résistances identiques de $R_n = R_m = 25 \Omega$.

Le schéma équivalent électrique du circuit est schématisé dans la figure III-8.

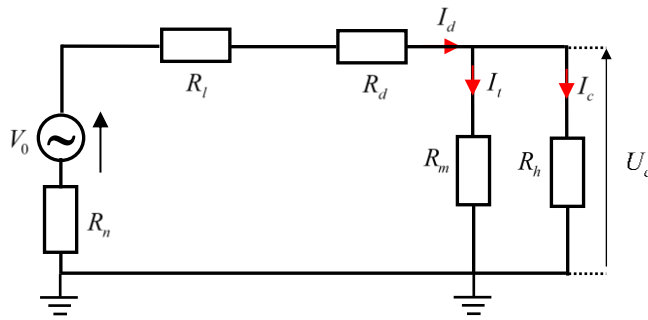


Figure III.9: Schéma équivalent du circuit électrique en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse

Le courant de défaut est estimé dans ce cas par la relation :

$$I_d = \frac{V_0}{R_n + R_t + R_d + \left(\frac{R_m \times R_h}{R_m + R_h} \right)} = \frac{230}{25 + 0.5 + 20 + \left(\frac{25 \times 2000}{25 + 2000} \right)} = 3,28 \text{ A}$$

La personne est soumise à une tension d'une valeur :

$$U_c = I_d \times \left(\frac{R_m \times R_h}{R_m + R_h} \right) = 3,28 \times \left(\frac{25 \times 2000}{25 + 2000} \right) = 80,99 \text{ V}$$

L'intensité du courant traversant le corps humain est donnée comme suit :

$$I_c = \frac{U_c}{R_h} = \frac{80,99}{2000} = 40,49 \text{ mA}$$

L'intensité du courant évacué vers le sol à travers la résistance de la mise à la terre de la masse métallique qui induit une tension aux ses bornes est donnée comme suit :

$$I_t = \frac{U_c}{R_t} = \frac{80,99}{25} = 3,24 \text{ A}$$

Les figures III- (10,11 et 12) montrent les valeurs de la tension de contact et les intensités du courant de défaut et corporel. Avec la mise à la terre du neutre et de la carcasse de l'appareil en défaut, ces valeurs diminuent en plus mais restent encore dangereuses car ils dépassent les limites permises par les normes en vigueur.

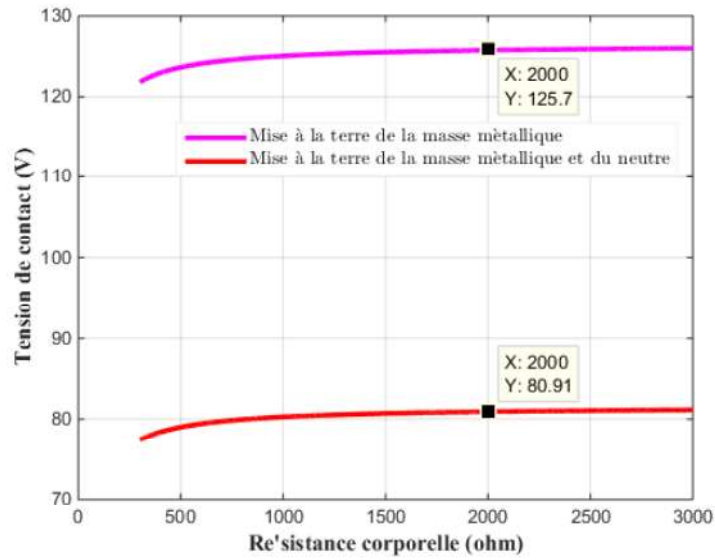


Figure III.10: Tension de contact de la personne en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse.

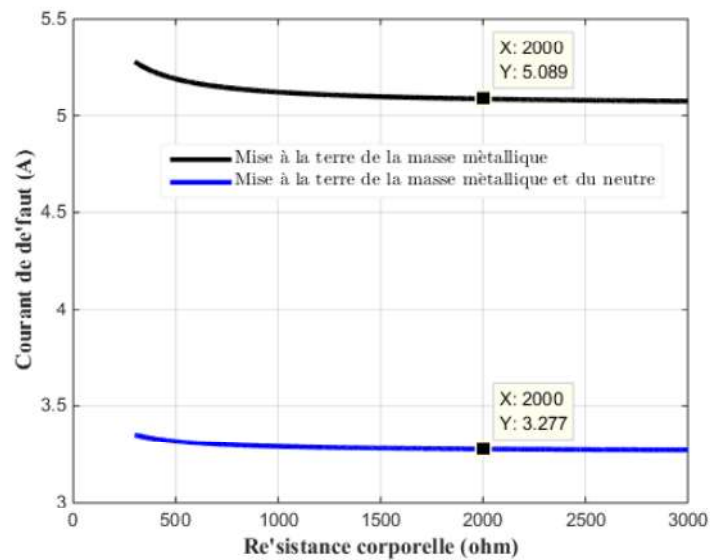


Figure III.11: Courant de défaut en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse

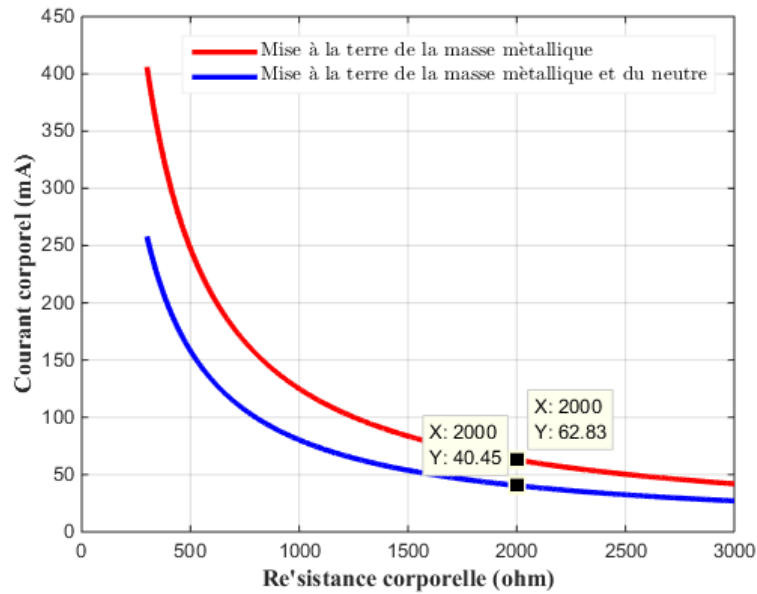


Figure III.12: Courant corporel en cas de mise à la terre du neutre et de la carcasse

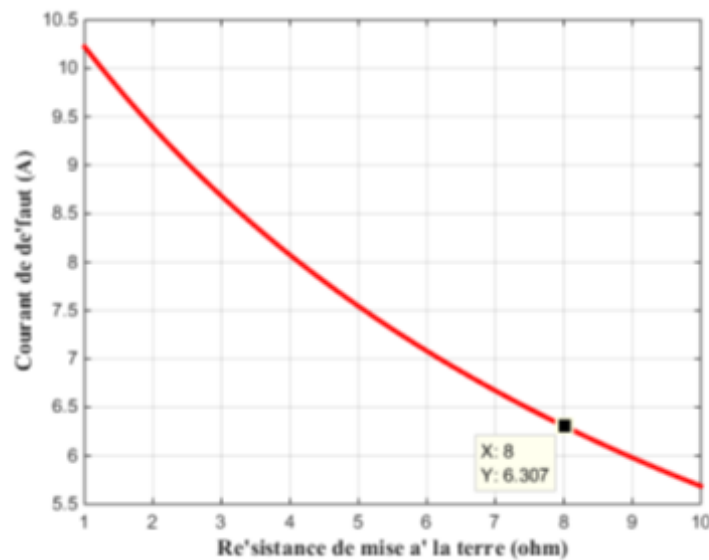


Figure III.13: Courant de défaut en cas d'une résistance appropriée de mise à la terre du neutre et de la carcasse avec une valeur

On comprend l'importance de vérifier la qualité de la mise à la terre de l'installation, la résistance de la mise à la terre de la masse métallique doit être appropriée d'une valeur plus faible. On peut d'autre part envisager une protection par disjoncteur magnétothermique ou un disjoncteur différentiel résiduel (DDR).

Suivant les normes en vigueur la tension de contact alternative permise pour une personne en milieu sec doit être égale à une valeur constante de 50 V.

On suppose que les valeurs de mise à la terre de la masse et de neutre soient identiques, la figure III-14 met en évidence la tension de contact recommandée par les normes en vigueur

en fonction de la valeur de la résistance appropriée de mise à la terre appropriée du neutre et de la carcasse. On constate clairement que pour une valeur de résistance de mise à la terre inférieure à 8Ω , la tension de contact de l'être humain est inférieure à 50 V qui est une valeur très sécurisée.

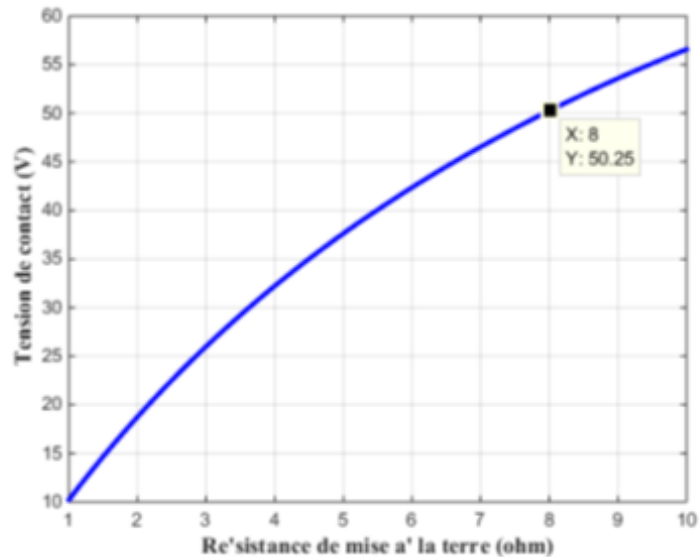


Figure III.14: Tension de contact en cas d'une résistance de mise à la terre appropriée du neutre et de la carcasse

La figure III- 15 présente les valeurs des intensités du courant corporel. On remarque que pour une valeur de résistance de mise à la terre inférieure à 8Ω , le courant corporel est inférieure à 25 mA.

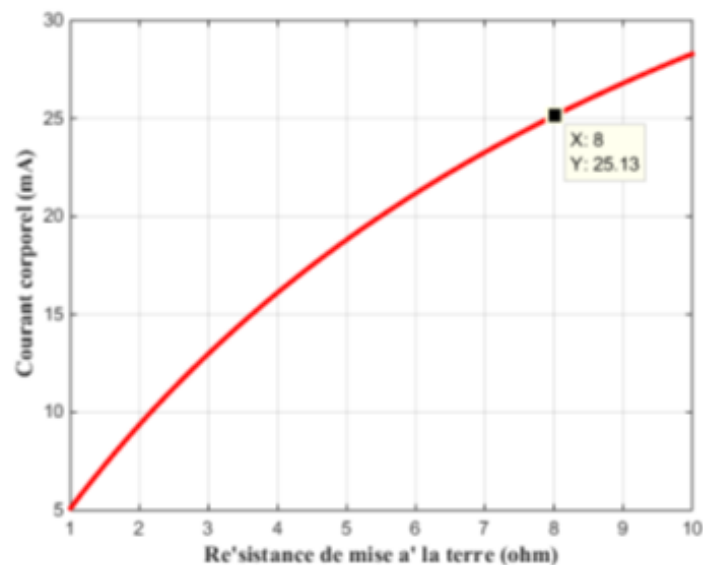


Figure III.15: Courant corporel en cas d'une résistance appropriée de mise à la terre du neutre et de la carcasse

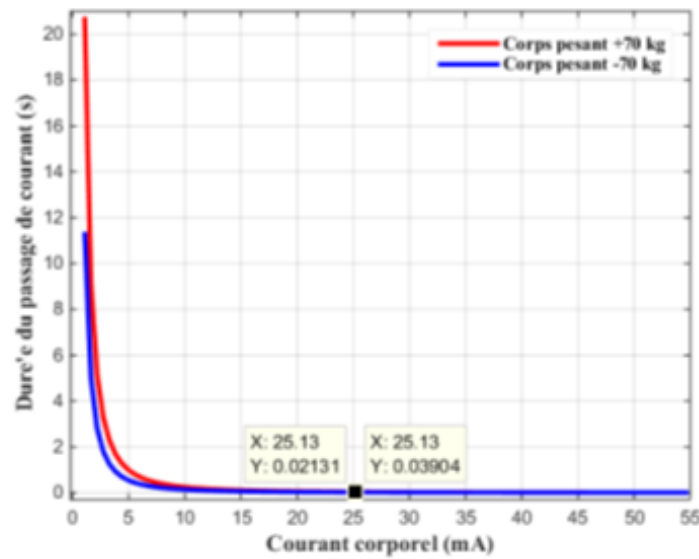


Figure III.16: Temps de la fibrillation ventriculaire en fonction du courant corporel

La figure III-16 est un graphique de la formule de Dalziel. Comme on le voit sur cette figure, il faut un très peu de temps pour induire une fibrillation ventriculaire. Par exemple, si le courant est d'environ 25.13 mA, il faut environ 0,04 s pour tuer une personne de plus de 70 kg, tandis qu'une personne pesant moins de 70 kg peut survivre pendant seulement 0.02 s. Dans les deux cas, la durée de survie est très courte pour un si petit courant

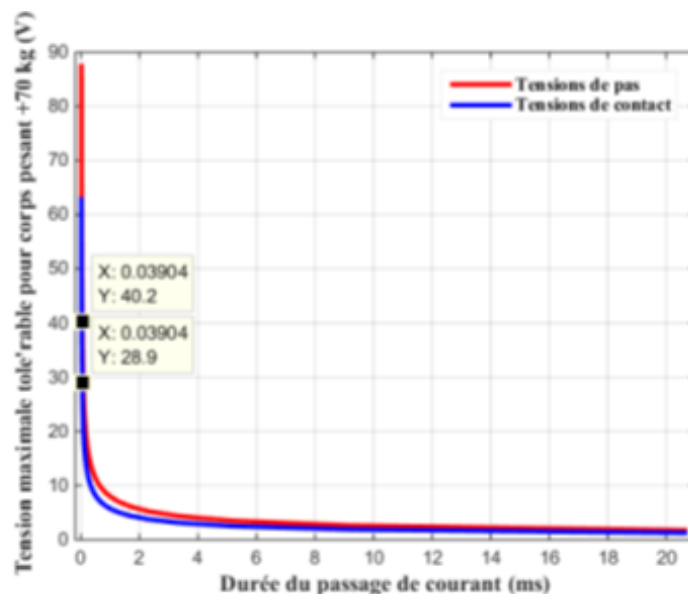


Figure III.17: Tensions de contact et de pas pour un corps humain pesant plus de 70 kg

Si une personne touchant une masse métallique d'un appareil électrique affecté par un défaut d'isolement interne est soumise à un contact indirect. Les figures III-17 et III-18

montrent qu'un courant inférieur à 25 mA traversant le corps humain peut être considéré comme non dangereux. Il correspond à une tension de contact moins de 50 V.

Généralement suivant la plupart des normes internationales (comme exemple la norme européenne EN 50522), la tension de contact à ne pas dépasser en cas de défaut d'isolement est de 50 V (valeur efficace) en tout point de l'installation électrique.

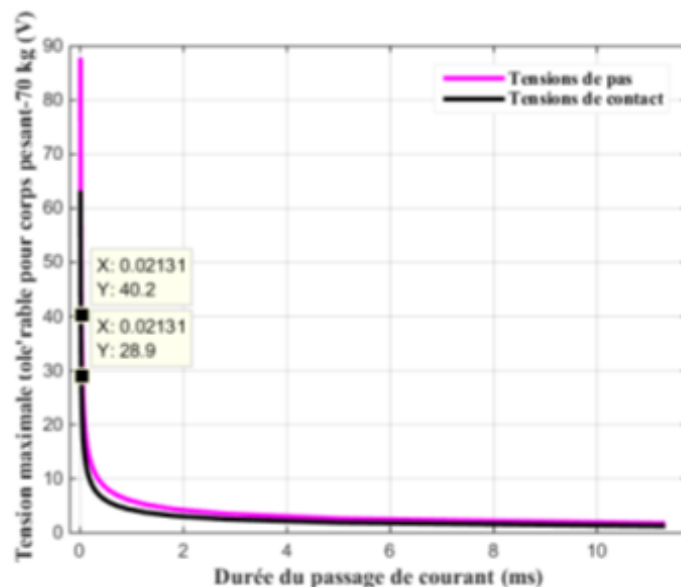


Figure III.18: Tensions de contact et de pas pour un corps humain pesant moins de 70 kg

Ces figures également mettent en évidence le risque de la tension de toucher ou de pas, ce danger se fait par le sol conducteur, qui peut diffuser le courant dans un périmètre de plusieurs mètres autour le corps humain, un courant rentre alors par une jambe et ressort par l'autre. Plus les pieds du personne sont écartés, plus la tension de pas qui la parcourt est élevée, tout petit pas, la tension sera très faible.

A cet égard, Les personnes doivent être maintenues à une certaine distance où la tension de pas serait insuffisante pour causer des dommages. La valeur admissible pour la tension de pas est beaucoup plus élevée que pour la tension de contact. Si les exigences pour le système de mise à la terre concernant la tension de contact sont remplies, en général aucune tension de pas dangereuse ne peut se produire.

III.4. Protection contre le défaut d'isolement

III.4. 1. Protection par le système de mise à la terre

Pour une résistance de mise à la terre réduite (la plus faible possible), les valeurs de la tension de contact et le courant corporel deviennent assez acceptable en point de vue de sécurité humaine, comme montrent les figures III-19 et III-20.

Comme exemple pour une valeur de résistance de mise à la terre $R_m = R_n = 4\Omega$, les valeurs de la tension de contact et le courant corporel seront 32.23 V et 16.11 mA.

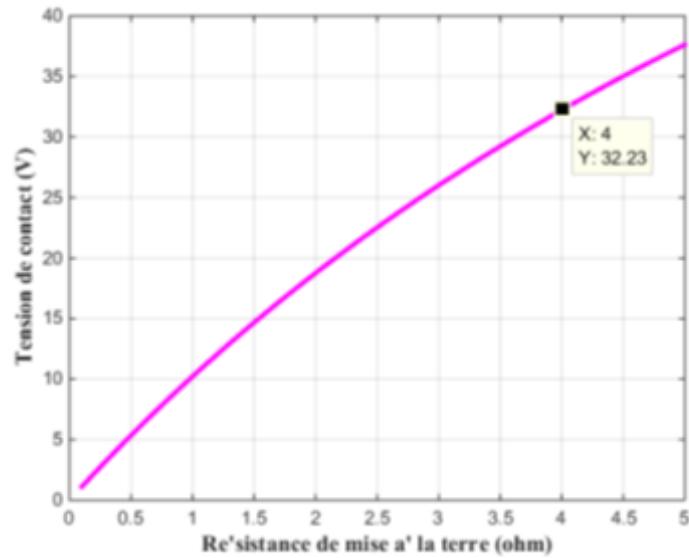


Figure III.19: Tension de contact en cas d'une résistance de mise à la terre réduite

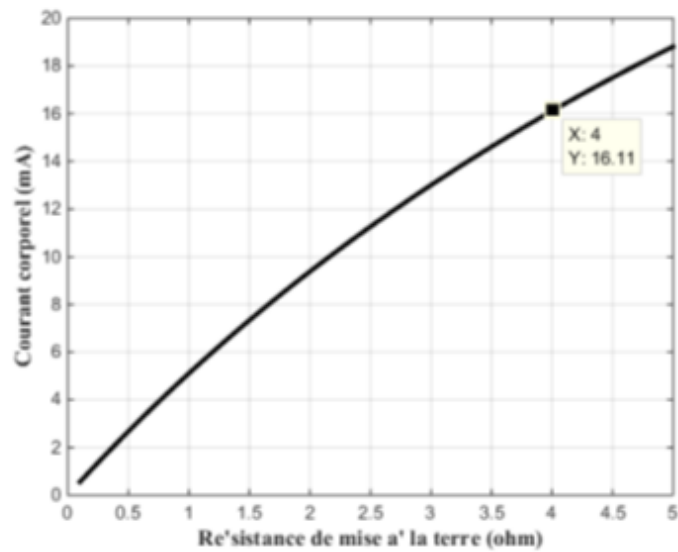


Figure III.20: Courant corporel en cas d'une résistance de mise à la terre réduite

III.4. 2. Protection par un disjoncteur magnétothermique

Supposons que l'appareil récepteur absorbe un courant nominal d'emploi $I_n = 2.5$ A, et que le seuil de déclenchement du magnétothermique est réglé à une limite de 4A.

Si le défaut d'isolement est franc ($R_m=0\Omega$), alors le courant I_c qui traverse la personne touchant la carcasse métallique est :

$$I_c = \frac{V_0 \times R_m}{(R_n + R_l) \times (R_m + R_h) + (R_m \times R_h)} = \frac{230 \times 25}{(25 + 0.5) \times (25 + 2000) + (25 \times 2000)} = 56.57 \text{ mA}$$

Le courant I_t de défaut passant de la carcasse au sol à travers la résistance R_m est :

$$I_t = \frac{I_c \times R_h}{R_m} = \frac{56,57 \times 2000}{25} = 4.53 \text{ A}$$

La personne est soumise à une tension d'une valeur :

$$U_c = I_c \times R_h = 56.57 \times 2000 = 113,14 \text{ V}$$

Le courant $I_t = 4.53 \text{ A}$ provoque le déclenchement du magnétothermique réglé à 4A, en local sec, il n'y a pas de danger si le temps de déclenchement est rapide, il n'excède pas 170ms ($t < 170 \text{ ms}$) pour une tension de 230V au cas où la personne touche la carcasse lors de l'apparition du défaut ou de la mise sous tension de l'appareil, donc la personne est protégée.

Si le défaut n'est pas franc, le magnétothermique ne va pas forcément déclencher. Prenons l'exemple précédent avec une résistance de défaut (fuite) $R_d = 20\Omega$.

$$I_c = \frac{V_0 \times R_m}{(R_n + R_d + R_l) \times (R_m + R_h) + (R_m \times R_h)} = \frac{230 \times 25}{(25 + 20 + 0.5) \times (25 + 2000) + (25 \times 2000)} = 40.45 \text{ mA}$$

La personne est soumise à une tension d'une valeur :

$$U_c = I_c \times R_h = 40.45 \times 2000 = 80,9 \text{ V}$$

Le courant I_2 de défaut passant de la carcasse au sol à travers la résistance R_m est :

$$I_t = \frac{U_c}{R_m} = \frac{80,9}{25} = 3.24 \text{ A}$$

Le courant de défaut $I_t = 3.24 \text{ A}$, le seuil de déclenchement du magnétothermique a été réglé à 4A, comme le courant de défaut est inférieure à cette limite, le disjoncteur magnétothermique ne déclenche pas.

III.4. 3. Protection par un disjoncteur différentiel résiduel (DDR)

DDR est un appareil assurant la protection des personnes et capable d'interrompre automatiquement un défaut d'isolement en cas de fuite à la terre du courant appelé courant résiduel, il a le pouvoir de détecter une très basse défaut d'isolement.

Le disjoncteur différentiel résiduel (DDR) est placé à l'entrée de l'installation, sur le conducteur de phase et sur le neutre, il déclenche rapidement lorsque la différence entre le courant amené par la phase et celui emmené par le neutre excède son seuil $I_{\Delta n}$ (courant différentiel résiduel nominal).

Si l'installation est sous tension du 230 V qui comportant une résistance de défaut $R_m = 25 \Omega$, il suffit que le seuil de déclenchement du DDR soit réglé à une valeur $I_{\Delta n} = I_t = 3 A$ et les personnes sont protégées, mais le défaut parfois peut avoir une résistance assez élevée ou la résistance de terre des masses peut être mauvaise, ce qui peut entraîner un non déclenchement du DDR.

Pour avoir une sécurité parfaite, le seuil de déclenchement du DDR devra être réglé à une valeur inférieure à :

$$I_{dec} \leq \frac{U_L}{R_m} \quad \text{Avec : } R_h \gg R_m$$

Où :

R_m : Résistance de la prise de terre qui doit être la plus faible possible,

I_{dec} : Courant de déclenchement du DDR,

U_L : Tension de contact maximale de limite de sécurité suivant le milieu (50V locaux secs, 24V locaux humides, 12V locaux mouillés).

Dans notre cas ci-dessus, Le courant différentiel-résiduel assigné

$$I_{\Delta n} = I_{dec} \leq \frac{U_L}{R_m} = \frac{50}{25} = 2 A$$

D'une façon générale, la relation ci-dessus donne la valeur maximale de la résistance de la prise de terre des masses qu'il faut essayer de respecter compte tenu du seuil I_{dec} de l'appareil différentiel.

Le seuil de réglage (sensibilité) I_{dec} , le principe étant que, pour des courants de fuite supérieurs à I_{dec} , le dispositif doit obligatoirement déclencher.

La norme tolère une plage de fonctionnement :

$I_d < \frac{I_{dec}}{2}$: Non déclenchement assuré ;

$\frac{I_{dec}}{2} \leq I_d \leq I_{dec}$: Déclenchement possible ;

$I_d \geq I_{dec}$: Déclenchement assuré.

III.5. Protection contre les contacts indirects avec les régimes de neutre

Les réseaux de distribution sont caractérisés essentiellement par la nature du courant et le nombre de conducteurs actifs, ainsi que par la liaison à la terre ou régimes de neutre. La sécurité des personnes et du matériel est assurée différemment en fonction du régime de neutre utilisé dans une installation électrique.

III.5.1. Cas du régime neutre TT

Lorsqu'une phase touche la masse, il y a élévation du potentiel de cette masse, une tension de contact apparaît entre les masses métalliques et le sol.

Soit, la résistance de conducteur $R_l = 5 \Omega$, la résistance de défaut $R_d = 25 \Omega$, la résistance de la prise de terre du neutre est supposée égale à la résistance de la prise de terre des masses, on trace les valeurs de courant de défaut et la tension de contact et le courant corporel en fonction des différentes résistances d'une personne, sous une tension du circuit de $V_c = 230 V$.

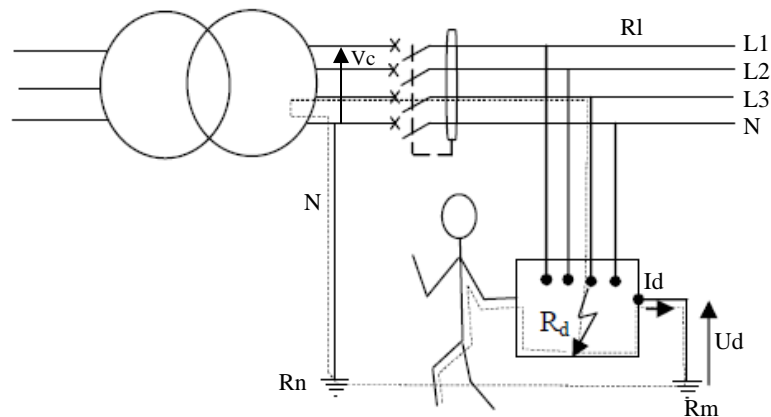


Figure III.21 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime TT

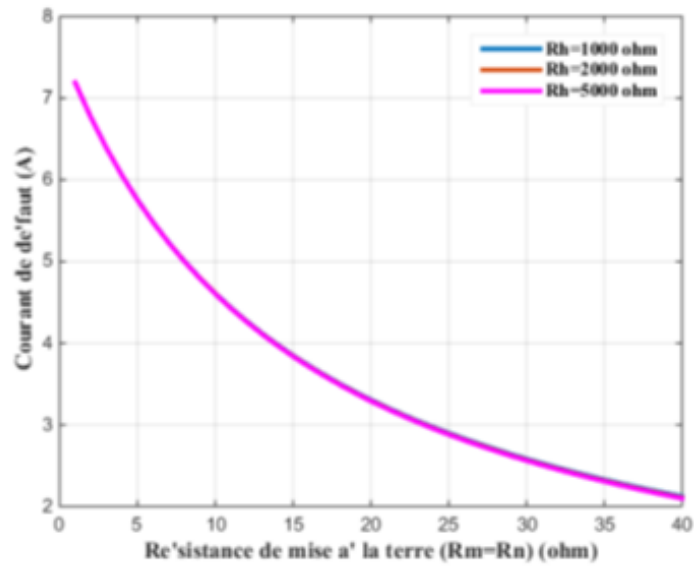


Figure III.22: Courant de défaut en cas du régime neutre TT

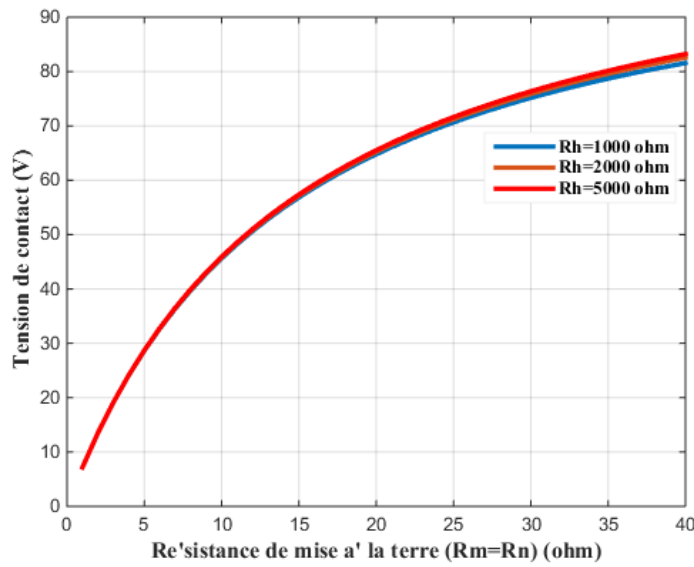


Figure III.23: Tension de contact en cas du régime neutre TT

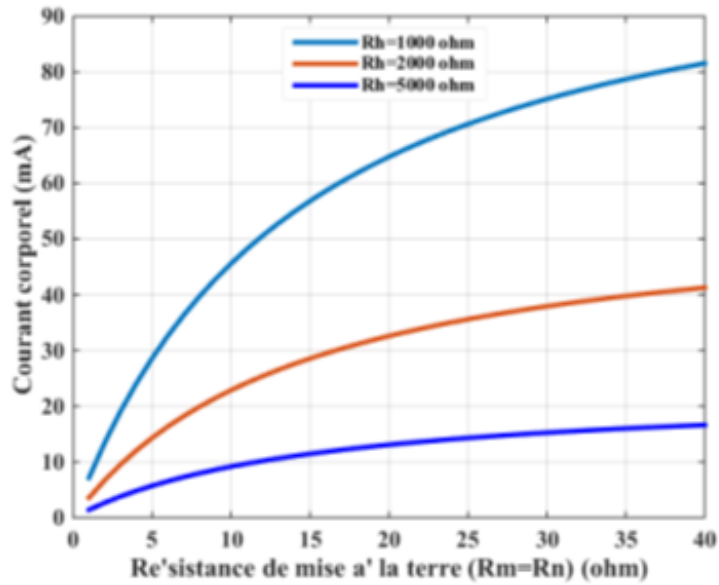


Figure III.24 : Courant corporel en cas du régime neutre TT

III.5.2. Cas du régime neutre TN

Le neutre de l'alimentation est mis à la terre et les masses sont reliées au neutre ; Ainsi, tout défaut d'isolement est transformé en un défaut entre phase et neutre soit un court-circuit dont la valeur est limitée par l'impédance des conducteurs.

Soit l'installation suivante présente un défaut d'isolement qui peut être dangereux en cas de contact avec un organe d'un être humain.

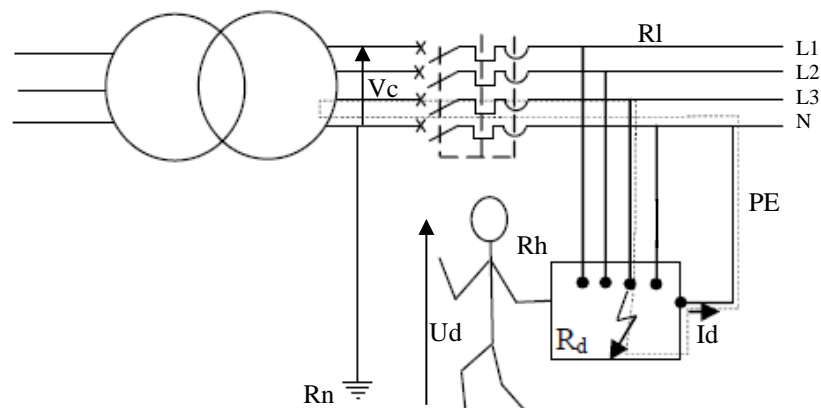


Figure III.25 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime TN

Où :

V_c : Tension de la source

R_m : Résistance de prise des masses ;

R_n : Résistance de la prise de terre neutre ;

R_d : Résistance de défaut ;

R_h : Résistance humaine ;

R_l : Résistance du conducteur de phase;

I_d : Courant de défaut ;

U_d : Tension de défaut.

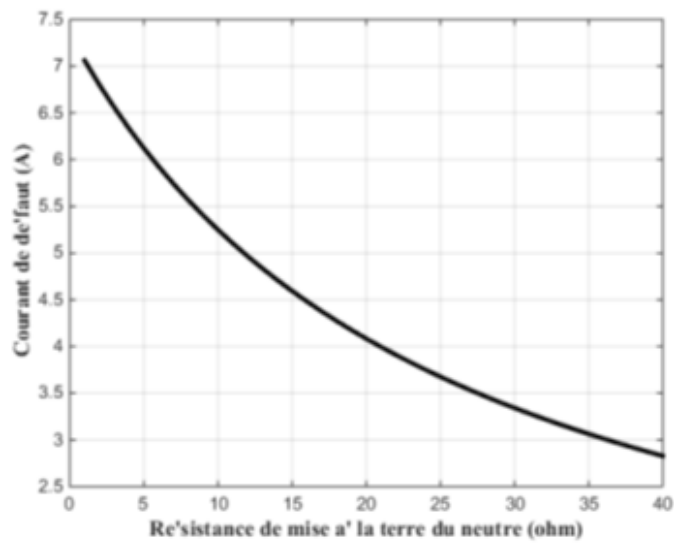


Figure III.26 : Courant de défaut en cas du régime neutre TN

Dans les deux cas de ce régime de neutre, le courant de défaut n'est plus limité que par l'impédance des câbles et de la source de tension, ce qui donne un courant de défaut très élevé.

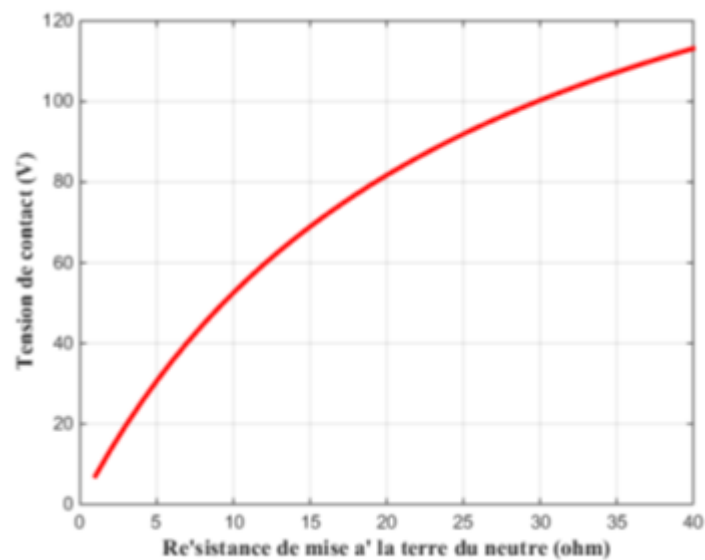


Figure III.27 : Tension de contact en cas du régime neutre TN

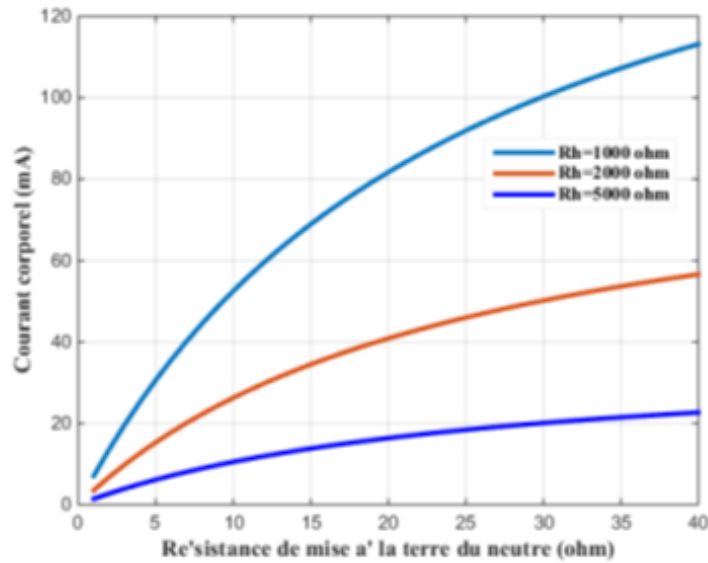


Figure III.28 : Courant corporel en cas du régime neutre TN

La tension de contact peut être dangereuse pour les personnes, si la protection du circuit est assurée par un disjoncteur de calibre Ia avec un relais magnétique qui déclenche si le courant I_{mag} atteint 7 fois l'intensité nominale. Lorsque le courant de défaut $I_d > I_{mag}$, il provoque le déclenchement du disjoncteur.

Si la section des conducteurs de phase utilisés est égale à 2 fois la section du conducteur de protection électrique, la condition de déclenchement en fonction de l'intensité nominale du relais magnétique est présentée dans la Figure III-29.

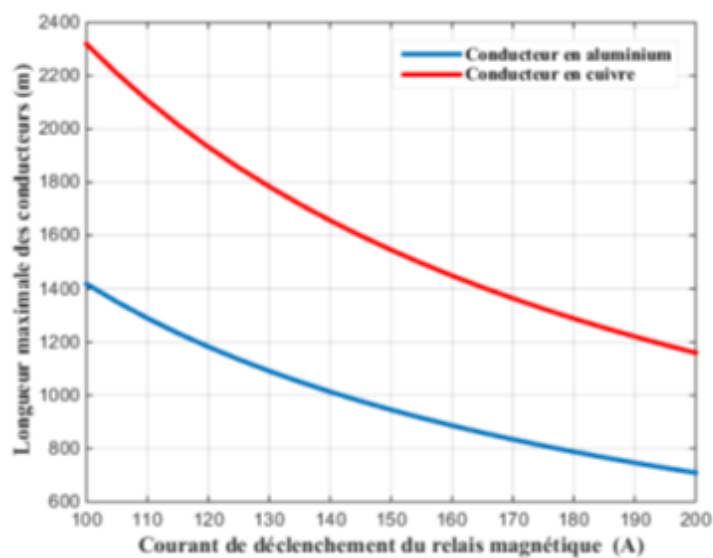


Figure III-29 : Calcul des conditions de déclenchement du relais magnétique en cas du régime neutre TN

La protection contre les contacts indirects est assurée lorsque la longueur maximale des conducteurs est inférieure à la longueur calculée, dans le cas contraire, on doit agir sur le réglage du calibre du relais magnétique en le diminuant.

III.5.3. Cas du régime neutre IT

Dans ce régime le neutre est isolé, les masses sont reliées à la terre, puisque le neutre isolé. Il faut prévoir un appareil de contrôle et d'écoulement de toute sorte de surtension. Ce dispositif est un limiteur de surtension d'impédance Z .

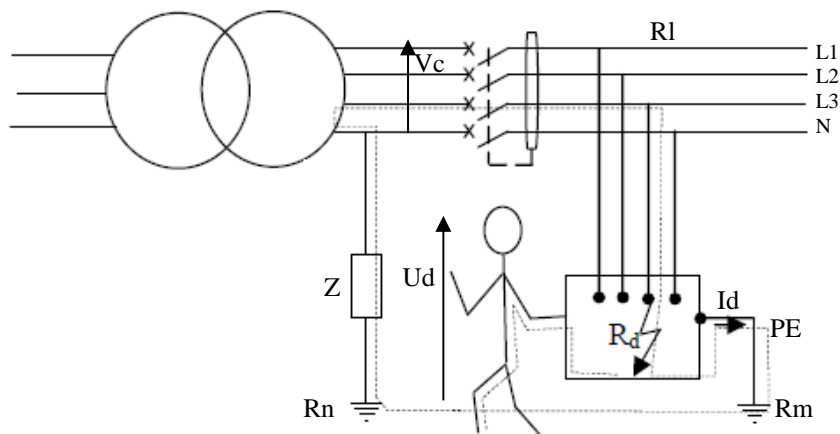


Figure III.30 : Présentation d'un défaut d'isolement en régime IT

Où :

Z_i : Impédance d'isolement

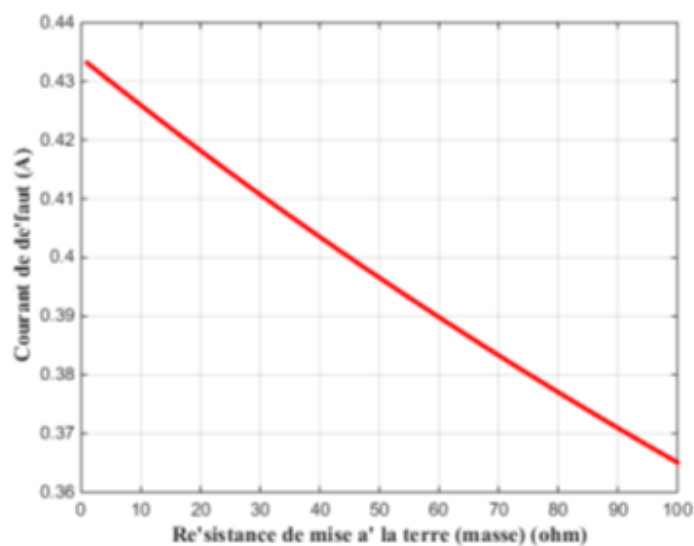


Figure III.31 : Courant de défaut en cas du régime neutre IT

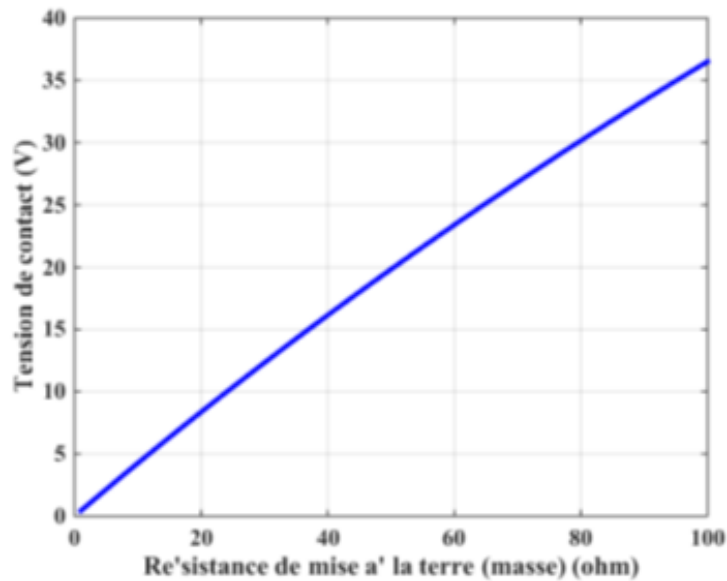


Figure III.32 : Tension de contact en cas du régime IT

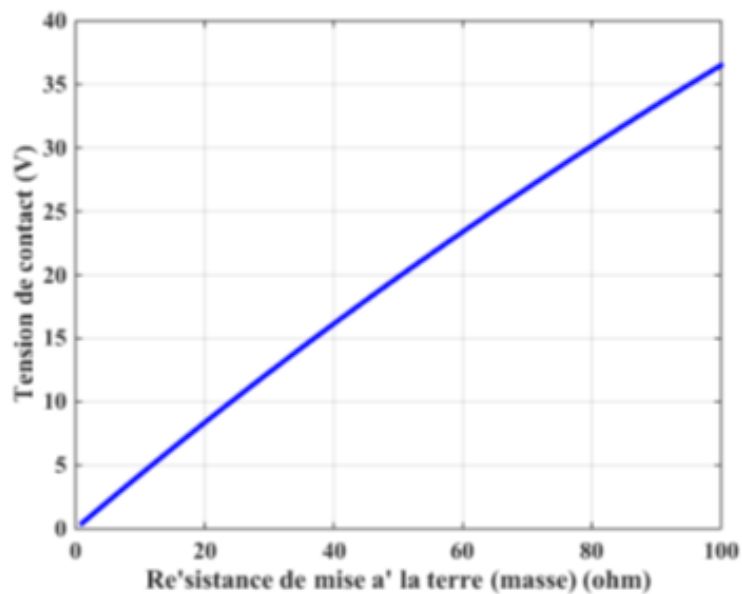


Figure III.33 : Courant corporel en cas du régime neutre IT

Ce régime de neutre présente un courant de défaut très faible. Ce dernier n'est pas dangereux pour l'utilisateur.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des différentes méthodes de calcul de la résistance de mise à la terre et les facteurs affectant la valeur de cette résistance, le choix de la prise de terre dépend au premier lieu de la résistivité du sol, aussi une analyse d'un défaut d'isolement a été abordée avec les différents moyens de protection des personnes disponibles et les

différents schémas de liaison de neutre possible ont été exploités dans une installation électrique. Le régime du neutre est un facteur déterminant pour la sécurité d'alimentation ; en terme de continuité de service, la protection du réseau et le personnel. Les trois régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation .IL ne peut donc être question de faire en choix à priori.

Conclusion générale

Conclusion générale

Aujourd'hui, l'énergie électrique est considérée comme une énergie propre active utilisée pour faire fonctionner des secteurs vitaux comme l'industrie, les moyens de communication et les équipements électriques dont se servent la société humaine, elle peut cependant dans certaines circonstances compromettre la sécurité et la santé de l'être humain. Le réseau électrique est soumis à des multiples perturbations électriques notamment les courts-circuits, les surcharges, les défauts d'isolement, elles peuvent endommager les différents éléments constituant le réseau électrique de transport et de distribution.

Dans le présent travail les risques électriques créés par les défauts d'isolement sont mis en évidence. Un défaut survenant dans un matériel électrique provoque la circulation d'un courant qui doit être interrompu dans un temps compatible avec la sécurité des personnes et équipements, ces risques liés à l'électricité sont de différentes natures. Il s'agit principalement des risques d'électrisation, d'électrocution et de brûlure. Ces risques ont pour origines des contacts directs ou indirects avec les conducteurs électriques actifs. Les appareillages de protection installés dans les réseaux électriques désignent l'ensemble des appareils de surveillance et de protection assurant la stabilité d'un réseau électrique et la sécurité parfaite des personnes, toute installation électrique doit comporter une bonne prise de terre et des protections différentielles.

Afin d'être sûr qu'un bon système de mise à la terre est mis en place, il est nécessaire de connaître les différentes méthodes pour évaluer la résistance de mise à la terre. Il faut maintenir une faible résistance à la terre éloignée de toutes les électrodes et une faible résistivité du sol local. Ainsi, connaissant les avantages et les inconvénients de fonctionnement de différents régimes de neutre.

Finalement le travail se termine par la présentation et l'analyse des résultats concernant le calcul de la résistance de mise à la terre et les différentes grandeurs affectant cette résistance, les défauts d'isolement dans les différents schémas des liaisons à la terre du neutre et de la masse métallique des équipements électriques.

Pour les raisons de sécurité dans le réseau électrique, le neutre et les masses sont reliées par un conducteur de protection lui-même relié à une prise de terre. La mise à la terre permet d'évacuer le courant de défaut généré par un contact accidentel à la masse, les différents types de liaison à la terre du neutre se distinguent par leur mode de raccordement du point neutre, leur technique d'exploitation et le coût d'investissement, généralement le courant de défaut est

défecté et l'alimentation électrique de l'installation est coupée, dans ce cas de courant de défaut un interrupteur différentiel assure la coupure de l'alimentation électrique.

En perspective, on suggère que cette étude pourrait être élargie à un calcul qui met en évidence les différents et multiples défauts d'isolement et pour le choix de la meilleure protection.

Bibliographie

- [1] Mohamed Boumechraz, Énergies et Environnements, Université Mohamed Khider de Biskra, Support de cours, 2ème année Licence GE, Année Universitaire 2015/2016.
- [2] Abdelhakim Belkaid, Énergies et Environnement, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, Support de cours, 2ème année Licence GE, Année Universitaire 2016/2017.
- [3] Mathieu Caujolle. Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA. Energie électrique. Supélec, 2011.
- [4] Outaba Samia, Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC, thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2009.
- [5] Tebani Hocine, Production de l'Energie Electrique, Département d'Electrotechnique. Polycopié de Cours. Licence 2 année ST, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2019/2020.
- [6] Cours UEF - ELTF 214 intitulé. Dr. MERAHI Amir. Maître de conférences classe B. 2018 / 2019. Analyse des réseaux de transport et de distribution I. Département de Génie Électrique, Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique d'Oran
- [7] Khadija BEN KILANI, Réseaux Électriques de Puissance, Fascicule de Cours , École nationale d'ingénieurs de Tunis, 2ème année Génie Électriques, 2013-2014.
- [8] Bellamouchi Abdelhai, Bekkouche Moussa, Bekkouche ELhadi, Conception et simulation de lignes électriques à haute tension, Mémoire de Mémoire, Université Hamma Lakhdar. El Oued, 2021.
- [9] Farid Hamoudi, « Réseaux de transport et de distribution électrique », Cours Génie électrique, université A/Mira- Bejaia, 2016.
- [10] Mekanet Mohammed, Schémas et appareillages , TD , TP et COURS, 3ELT , université Amar thelidji – Laghouat, 2019
- [11] Benaired Noredine, Schémas et Appareillages électriques, Commande des systèmes électriques 1ère année Master, Centre Universitaire de Relizane, 2014.
- [12] Tarek Kenti, La qualité d'énergie (Les harmoniques), Mémoire de Licence Electrotechnique, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, 2016/2017.
- [13] M. Nait Ikene , Etude des protections des départs MT Application poste 60/30KV FREHA, Mémoire De Fin d'études. En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2007-2008.
- [14] Hamdi Saada, Etudes et essais pratique des protections numériques installées au niveau de poste d'interconnexion, mémoire de Master, UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA, 2019.

- [15] Djekidel Rabah, Typologie des risques , support cours, 2ième année License Hygiène Sécurité Industrielle, Université Amar Telidji de Laghouat,2016.
- [16] Denis VEYRAT, securite electrique, Mafpen Toulouse,RCB 526, 527,1995
- [17] Guedarez Ratiba & Bouzidi Amel, Etude des régimes de neutre et protection des personnes et équipements, mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma,2012
- [18] B. Aitmohammed, : Dj. Mansouri , Etude D'une Mise À La Terre D'une Installation Électrique. Mémoire de Master. Génie Électrotechnique Et Automatique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [19] Adjabi Fadia et Mergag Besma, Contribution à l'étude des schémas de liaison à la terre Etude du cas IT, Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2020.
- [20] Boussaid Hayet, Mise à la terre, Mémoire de master,Université Akli Mohand Oulhadj ,Bouira,2017.
- [21] Zidane Zine Abiddine , Modélisation Et Simulation Des Prises De Terre Dans Les Systèmes Électrique , mémoire de Magister,Université Ferhat Abbas Sétif ,2012.
- [22] Protection des personnes : Les Schémas de Liaison à la Terre – cours BTS
Electrotechnique
- [23] Bourechak Rania ,Khadraoui Ikram, Etude des prises de terre dans les systèmes électrique, Université 8 Mai 1945 – Guelma,2020.
- [24] Semaan Georges , Evaluation de l'effet de la mer et du contrepoids sur le profil de la tension d'un systeme de mise a la terre d'une ligne de transport d'energie a haute tension dans un sol résistif, Thèse de doctorat, Université du QUEBEC,2001.