

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Électrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Influences Des Perturbations Électromagnétiques Sur La
Conception D'une Mise A La Terre (SONELGAZ).

Présenté par :

- SOLTANI Karim
- AOUABDIA Oussama

Encadrant : KSENTINI Abdelhamid

Grade : MCA

Université : UBMA

Jury de Soutenance :

LABAR Hocine	Pr	UBMA	Président
KSENTINI Abdelhamid	MCA	UBMA	Encadrant
BENALIA Nadia	MCB	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout Puissant qui nous a donné la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur monsieur «Dr. ksontini abd elhamid», pour avoir accepté de nous encadrer tout au long de ce travail, pour sa disponibilité, son amabilité, ses conseils et suggestions.

Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir répondu présent à l'évaluation de ce notre travail de fin d'étude.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle

Enfin, nous remercions Nos amis aussi.

UNIVERSITÉBADJIMOKHTAR-ANNABA

PROMOTION 2023





Dédicaces



Puisse ALLAH le tout puissant l'accueillir en son vaste paradis et lui accorder sainte miséricorde.

*Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus proches de mon cœur, mes chers **parents** qui ont été toujours présents à mes cotés et pour ce qu'ils ont fait pour moi que Dieu me les gardes.*

A mes chères frères

A mes chères amies

*A mon professeur **Mr ksentini A/h** et les professeurs de l'année et l'ensemble de ma promotion **2023***

A tous les personnes qui ont m'aider à faire ce travail

OUSSAMA AOUABDIA



Dédicaces



Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **NAOUI**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse ; mon adorable mère **YASMINA**.*

*A ma chère amour de ma vie **MA FEMME** qui n'a pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Et mes précieux enfants **ABD ERRAHMENE ET OTHMENE**, Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

*A mes professeurs de département et l'ensemble de ma promotion 2023
A tous mes amis et mon binôme **AOUABDIA Oussama**.*

A tous ceux que j'aime.

Merci

KARIM SOLTANI





Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté de technologie

Département d'Electrotechnique

Résumé sur le travail de mémoire de Master

Présenté par Monsieur

SOLTANI KARIM

AOUABDIA OUSSAMA

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Intitulé du mémoire :

Influences Des Perturbations Électromagnétiques Sur La Conception D'une Mise A La Terre

ملخص

الهدف من هذا العمل المطروح في مذكرة الماستر يعتمد على دراسة انظمة ومدج الربط بالأرض لحالة عابرة الصاعقة البرق. في البداية تكلمنا وحددنا مختلف العوامل التي تؤثر على سلوك انظمة الربط بالأرض عند بث تيار من الصاعقة للقيام بنموذج كهرومغناطيسي حيث أن التيار المتدفق في انظمة الربط يقوم ببث إشعاع كهرومغناطيسي بجوار النظام

الكلمات المفتاحية: أنظمة، البرق، كهرومغناطيسي، إشعاع

Abstract:

The aim of this work presented in the master's note is based on the study of systems and modeling of ground connection for the case of a transient lightning bolt. In the beginning, we talked and identified the various factors that affect the behaviour of the ground-connection systems when a stream of lightning is transmitted to carry out an electromagnetic model, as the current flowing in the interconnection systems transmits electromagnetic radiation next to the system

Key words: systems, electromagnetic, ground, interconnection...

Résumé :

L'objectif de ce travail présenté dans le mémoire de maîtrise est basé sur l'étude des systèmes et la modélisation de la liaison au sol pour le cas d'un éclair transitoire. Au début, nous avons parlé et identifié les différents facteurs qui affectent le comportement des systèmes de connexion au sol lorsqu'un flux de foudre est transmis pour réaliser un modèle électromagnétique, car le courant circulant dans les systèmes d'interconnexion transmet un rayonnement électromagnétique à côté du système

Mots clés : systèmes, liaison, facteurs, foudre, électromagnétique.

Sommaire

Résumé.....	01
Introduction Générale.....	01

Chapitre I : Les sources de perturbations Électromagnétiques

I.	Introduction.....	05
I. 1	Définition d'une perturbation électromagnétique.....	05
I. 2	Perturbations conduites.....	05
I. 3	Perturbations rayonnées.....	06
I. 4	Les sources de perturbation.....	07
I. 5.	Champs créé par les émetteurs radio.....	07
I. 5.1	- Champs créés par les émetteurs radars.....	08
I. 6	Perturbations existantes sur le secteur.....	08
I. 7	Convertisseurs et générateurs HF.....	10
I. 8	Champ de fuite des transformateurs.....	10
I. 8.1	Les courts circuits.....	11
I. 9	Les sources de perturbation naturelles.....	11
I. 9.1	- La foudre.....	11
I. 9.2	- Effet de la foudre.....	12
I. 9.3	- Les surtensions.....	12
I. 10	Neutre mis directement à la terre (HT ou MT)	16
I. 11	Surtensions induites (indirectes)	19
I. 12	Montée en potentiel de la prise de terre.....	20
I. 13	Les décharges électrostatiques (DES)	21
I. 13.1	Caractéristiques des décharges électrostatiques.....	21
I. 13.2	Le bruit cosmique.....	22
I. 14	Dispositifs de protection.....	22
I. 14.1	Éclateurs à air.....	22
I. 14.2	Parafoudre au carbure de Silicium.....	23
I. 14.3	Parafoudre à Oxyde de Zinc.....	25
I. 15	Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO.....	26
I. 15.1	Caractéristiques des parafoudres ZnO.....	27
I. 15.2	Comportement dynamiques des parafoudres ZnO.....	28
I. 16	Conclusion.....	29

Chapitre II : Notions de base sur la mise à la terre

II.	Introduction.....	30
II. 1	Notions de base sur la mise à la terre.....	31
II. 2	Définition et but d'une mise à la terre.....	31
II. 3	Configurations.....	33
II. 4	Réseau de transport et mise à la terre des pylônes et d'un poste.....	33
II. 4.1	- Mise à la terre des postes.....	33

SOMMAIRE

II. 4.2	- Mise à la terre des pylônes	34
II. 4.3	- Configurations des prises de terre des pylônes.....	34
II. 5	Nature du sol.....	35
II. 5.1	- La porosité.....	36
II. 6	Mesure de terre de pylônes reliés par câble de garde.....	36
II. 6.1	- L'utilisation de 4 capteurs flexibles de courant.....	37
II. 6.2	- Une mesure à haute fréquence jusqu'à 5 kHz permet.....	37
II. 6.3	Résistance des piquets auxiliaires H et S.....	37
II. 7	Tension de pas.....	38
II. 8	Conclusion.....	40

Chapitre III : Le régime de neutre

III.	Introduction.....	41
III. 1	Les différents régimes de neutre.....	42
III. 2	Influence du régime du neutre.....	44
III. 2.1	Résistances d'isolement et capacités par rapport à la terre.....	44
III. 2.2	Prise de terre et résistance de terre.....	46
III. 3	Régime du neutre et courant de défaut.....	47
III. 4	tension de contact - tension limite non dangereuse.....	49
III. 4.1	- Contact direct.....	49
III. 4.2	- Contact indirect.....	50
III. 5	Régimes de neutre et schémas des liaisons à la terre utilisés en basse tension.	53
III. 5.1	- Neutre isolé ou impédant (Schéma IT).....	53
III. 5.2	- Neutre mis directement à la terre (schéma TT,)	54
III. 5.3	- Mise au neutre (schéma TN)	55
III. 5.3.1	o Premier cas.....	55
III. 5.3.2	o Deuxième cas.....	56
III. 6	Conclusion.....	57

Chapitre IV : Simulation des prises de terre des installations électriques

IV.	Introduction.....	60
IV. 1	Cas d'une simple électrode.....	62
IV. 1.1	Électrode enterrée verticalement.....	62
IV. 1.2	Électrode de terre Horizontale.....	63
IV. 2	Grille de mise à la terre.....	65
V.	Conclusion générale.....	68

❖ Référence

LISTE DES FIGURES

- Fig. I1** : représentation temporelle des harmoniques
Fig. I2 : Bruit HF supposé au secteur
Fig. I3 : champ de fuite au voisinage d'un Transformateur
Fig. I4 : le courant de foudre
Fig. I5 : L'impact direct sur une ligne électrique
Fig. I6 : tension entre le point neutre et la terre
Fig. I7 : schéma équivalent d'un défaut phase-terre
Fig. I8 : facteur de défaut à la terre en fonction des rapports 1
Fig. I9 : facteur de défaut à la terre en fonction des rapports 2
Fig. I10 : Surtension induite sur une ligne
Fig. I11 : un potentiel élevé par rapport à cette masse
Fig. I12 : caractéristique d'une décharge électrostatique
Fig. I13 : Schéma d'un éclateur
Fig. I14 : d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs
Fig. I15 : d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine
Fig. I16 : Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO
Fig. I 17 : Schéma représentatif des amplitudes des tensions en fonction de leur durée
Fig. II .1 : Système de mise à la terre du poste
Fig. II .2 : prises de terre des pylônes
Fig. II .3 : Principe de mesure
Fig. II .4 : Schéma équivalent d'une ligne à haute tension
Fig. II .5 : Tension de pas
Fig. II .6 : de diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point.
Fig. III.1 : schéma triphasé
Fig. III.2 : câble à champ radial 2
Fig. III.2 : câble à champ 1
Fig. III.3 : schéma équivalent d'un réseau
Fig. III.4 : montée en potentiel du point neutre
Fig. III.5 : répartition des courants lors d'un défaut phase-terre
Fig. III.6 : a contact direct
Fig. III.6 : b contact indirect
Fig. III.7 : a valeurs statistiques des impédances totales du corps humain valables pour un trajet courant main à main ou main à pied
Fig. III.7 : b effets du courant électrique 50/60 Hz
Fig. III.8 : neutre isolé ou impédant (schéma IT) en basse tension
Fig. III.9 : neutre mis directement à la terre (schéma TT) en basse tension
Fig. III.10 : schéma TNC
Fig. III.11 : schéma TNS
Fig. III.12 : combinaison des schémas TNC et TNS

LISTE DES TABLEAUX

Tableau .II.1 : sur les résistivités des différents types de sol

Tableau .III.1 : Les modes de raccordement du point neutre

Tableau .III.2 : câble à champ radial HT isolé à l'EPR

Tableau .III.3 : câble à champ radial HT isolé au PE

Tableau .III.4 : câbles à ceinture HT isolés au PVC

Tableau .III.5 : diagrammes vectoriels dans le cas d'un défaut franc à la terre

Tableau .III.6 a : maximale de maintien Temps théoriques de coupure en fonction de la tension de contact présumée

Tableau .III.6 b : durée maximale de maintien de la tension de contact présumée dans les locaux humides à ($U_L = 25$ V)

Introduction générale

Entre les centrales de production d'énergie électrique et les réseaux de distributions alimentant les consommateurs. De ce fait, c'est un maillon clé du système électrique sur le quel toute défaillance doit rester rare, puisqu'es conséquences peuvent aller jusqu'au 'black-out'.

Dans notre pays LA SONELGAZ consacre des efforts constants à l'optimisation de leur réseau de transport, afin d'en améliorer la qualité de fourniture et la sûreté de fonctionnement, en contrôlant et/ou en évitant les principaux phénomènes qui pourraient conduire à l'effondrement du système électrique.

Une source potentielle d'incidents, qui, par nature, est difficile à maîtriser, est la foudre. Ce phénomène est relativement fréquent. On estime ainsi à 1 million le nombre de coups de foudre qui s'abattent chaque année sur le territoire algérien, alors que le réseaudetransport d'énergie électrique subit en moyenne un peu plus de mille défauts par an imputables à la foudre. Le réseau de transport d'électricité rassemble les connexions hautes et très hautes tensions (63 KV à 420 KV en Algérie) qui assurent le lien, souvent sur de longues distances

La foudre a toujours été une cause de perturbations dans l'utilisation de l'électricité. Mais il faut noter l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, continuité de service.) Ainsi quel souci toujours permanent de minimiser les coûts reproduction. Cela conduit à constater que la foudre est devenue électriques.

C'est pour cela qu'elle fait maintenant partie des grandes préoccupations des électriciens, qu'ils soient distributeurs d'énergie, constructeurs de matériels, concepteurs ou installateurs.

Pour un ingénieur électricien, un coup de foudre peut être vu comme une impulsion de courant à front rapide (quelques μs) et dont la valeur crête peut prendre une valeur comprise entre quelques kA et 200 kA. La protection contre cette perturbation et nécessitent généralement un système de mise à la terre pour l'écoulement rapide des courants de défauts dans le sol. Ce dernier joue un rôle essentiel dans la protection des individus contre les accidents électriques et l'assurance des installations électriques [1].

Elle consiste à relier les masses ou le neutre de l'installation à une prise de terre par l'intermédiaire d'un ou plusieurs conducteurs de terre, qui sert à évacuer les courants permanents et aux courants de défaut vers la terre. Cette fonction exige un dimensionnement bien approprié d'un système de mise à la terre.

Cependant, même dans un bon fonctionnement de l'installation de mise à la terre, le passage du courant de foudre dans cette installation métallique est à l'origine d'un rayonnement électromagnétique qui peut devenir très importante avec la taille des boucles de courants (taille des mailles d'une grille de mise à la terre).

Malheureusement, les installations de contrôle-commande des postes, nécessaire au système de télé conduite, sont soumises à des perturbations électriques provenant soit des circuits à haute tension, soit de l'appareillage de contrôle-commande lui-même, soit des sources de rayonnement électromagnétique.

Les perturbations électromagnétiques, pénètrent dans les équipements bas niveaux des installations de contrôle-commande par action directe des champs électrique et magnétique et des rayonnements électromagnétiques, génèrent par diaphonie des perturbations conduites qui se propagent en mode commun et/ou différentiel.

Le problème de rayonnement électromagnétique d'un système de mises à la terre, indispensables dans les postes, qui écoulent généralement des courants de très fortes intensités aux perturbations comme le court-circuit la décharge orageuse. Ce rayonnement électromagnétique peut constituer un sérieux danger pour les équipements de bas niveaux du dispositif de contrôle-commande si des mesures de protection appropriées ne sont pas prises.

Le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) étudie le bon fonctionnement d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique, dans un environnement électromagnétique mais vérifie également que celui-ci ne produira pas lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour son environnement. Il convient donc de limiter le niveau des émissions non désirées provenant de l'appareil mais également de vérifier que cet appareil est suffisamment immunisé contre les perturbations extérieures quelles que soient leurs origines.

Afin d'étudier ces phénomènes électromagnétiques, de nombreuses études théorique set campagnes expérimentales ont été toujours menées. Cependant, devant le coût de certaines expérimentations et la complexité de certains cas, les simulations numériques ont pris une place de plus en plus importante lors des dernières décennies. Ceci est également dû en grande partie à l'amélioration constante des calculateurs informatiques, des modèles utilisés et des méthodes de résolution des équations de Maxwell qui permettent aux simulations numériques de s'approcher toujours plus près de la réalité. Ainsi, la modélisation et l'étude de problèmes complexes sont désormais possible via la simulation numérique.

De nombreux simulateurs en électromagnétisme ébrasés sourdes méthodes numériques qui résolvent les équations de Maxwell sous leurs formes dérivées (Flux3D, Flux, Vector Field, ...) ou sous formes intégrales (NEC, FEKO,) sont commercialisés pour certains depuis plus de deux décennies. Ces méthodes sont appliquées sur des formulations différentes, généralement fréquentiel, et possèdent toutes leurs avantages et leurs inconvénients.

Cependant, il est bien connu que la résolution numérique des équations de Maxwell est peu adaptée au traitement de dispositifs électromagnétiques d'importantes dimensions et particulièrement à frontières ouvertes. Les temps de calcul trop excessif et l'instabilité numérique sont les deux inconvénients rencontrés lors de la modélisation de ce genre de dispositifs.

Dans ce travail, notre intérêt est porté sur la réponse transitoire d'une grille de mise à la terre excitée par une décharge orageuse (foudre). Ce sujet a déjà fait l'objet de plusieurs travaux publiés consacrés majoritairement à l'analyse de l'augmentation du potentiel de la terre ainsi qu'à la variation de l'impédance transitoire de la mise à la terre (la résolution numérique d'une équation intégrale est souvent utilisée).

Les méthodes numériques sont devenues incontournables pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes des prises de terre et la résolution des équations de Maxwell.

Dans de nombreuses applications (calcul du courant, champ électromagnétique et impédance transitoire) les quantités électromagnétiques doivent être déterminées sur une large bande de fréquences et le système linéaire doit être résolu pour chaque fréquence d'intérêt. Ceci entraîne un coût de calcul important.

Dans le but de réduire les temps de calcul tout en réalisant une modélisation permettant d'accéder à l'ensemble des grandeurs (champ électromagnétique rayonné, répartition des potentiels et des courants transitoires) nécessaires à l'analyse CEM (écoulement rapide des courants de défauts et émission électromagnétique dans le poste) du comportement transitoire d'une grille de mise à la terre, nous proposons une approche réaliste utilisant la technique des ondelettes et la méthode basée sur les paramètres d'estimations (MBPE). Cette approche à deux étapes dans le domaine fréquentiel. Elle sert à accélérer l'analyse du comportement transitoire d'un système de mise à la terre par la méthode du moment (Momo).

Dans un premier temps, en basant sur un processus de réduction des coefficients différentiels d'ordre élevés des éléments de la matrice d'impédance. La matrice transformée en ondelettes (WMT) est utilisée pour obtenir une équation de matrice d'impédance creuse dans le domaine des ondelettes qui est résolu sur une la Gréban de fréquence. Dans la deuxième étape, en basant sur une technique qui cherche réduire le nombre de points de calcul dans le domaine fréquentiel nécessaires pour l'évaluation de la distribution spatio-temporelle du courant.

L'objectif :

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la conception et du dimensionnement des prises et des réseaux de terre de différent type dans le but d'optimiser la protection des systèmes électriques contre les défauts de courant de tout genre, en particulier les décharges atmosphérique (la foudre).

L'objectif principal de ce travail est de contribuer, pour faire l'investigation de la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre (électrodes simples et complexes) soumise à des décharges

Électromagnétiques. Ultiment, les modèles proposés devraient également être appropriés à l'étude de l'influence des différents facteurs sur la réponse transitoire des réseaux de terre, prenant en considération l'influence du phénomène d'ionisation du sol sur le comportement

transitoire des mises à la terre et évaluer les performances des mises à la terre en intégrant plusieurs cas et configurations possibles dans un sol homogène de résistivité, dans le souci de se rapprocher des réalités physiques. Des solutions concrètes pour la meilleure réalisation des mises à la terre en minimisant les différents dommages causés par la foudre seront proposées.

Chapitre I :

Les sources des perturbations Électromagnétiques

I.Introduction :

Tout appareil est soumis à diverses perturbations électromagnétiques(EM), et tout appareil électrique en génère. Ces perturbations sont générées de multiples manières. A la base, leurs faits générateurs sont principalement des variations brusques de grandeurs électriques, tension ou courant.

Ces dernières années, plusieurs facteurs se sont conjugués pour augmenter l'importance de l'EM :

- les tensions et courants de plus en plus forts,
- les circuits électroniques sont de plus en plus sensibles,
- les distances entre les circuits sensibles (électroniques) et les circuits perturbateurs (de puissance), se réduisent dans les installations,
- Côté à côté courants faibles et courants forts dans les appareils modernes (miniaturisation)

Dans ce chapitre nous allons décrire les principales sources de perturbation électromagnétiques et leurs effets. Connaître et comprendre l'origine d'une perturbation EM est essentiel si l'on veut résoudre un problème d'EM.

I.1 Définition d'une perturbation électromagnétique :

Une perturbation électromagnétique est tout phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte. [4]

Une perturbation électromagnétique peut être un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu propagation lui-même.

De plus une perturbation électromagnétique, comme son nom l'indique est composée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H

Un problème de perturbation EM met en jeu trois éléments :

- La source de perturbation, qui se caractérise par sa puissance, sa durée, son spectre de fréquence, son spectre qu'elle génère.
- Le vecteur par lequel la perturbation est transmise, on parle de mode de couplage.
- L'équipement victime de la perturbation.

I.2 Perturbations conduites :

Les perturbations transmises par conduction sont caractérisées par les courants engendrés sur les câbles et les tensions induites aux bornes des circuits électroniques. Les parasites ainsi générés, sont d'autant plus importants que les variations par rapport au temps du courant et de tension qu'elles entraînent, sont élevés. Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils, interconnectant des équipements vont eux même rayonner. De même des perturbations rayonnées vont

pouvoir induire des courants et tensions parasites dans différentes interconnexions. Les perturbations conduites et rayonnées sont donc intimement couplées.

I.3 Perturbations rayonnées :

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source.

- Le champ électrique s'exprime en V/m. Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée v (Figure 1).
- Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant i (Figure 2).

Rappels :

L'impédance de l'onde électromagnétique représente le rapport de l'intensité du champ électrique sur l'intensité du champ magnétique :

$$Z = \frac{E}{H} \dots\dots\dots (I .1)$$

La longueur d'onde peut être calculée en effectuant le rapport de la vitesse de propagation de l'onde (soit la vitesse de la lumière pour le vide et en première approximation pour l'air) sur la fréquence des signaux constituant cette onde électromagnétique :

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3.108 \text{ (m)} \dots\dots\dots (I .2)$$

Soit $\lambda = 1\text{m}$ pour $f=300\text{MHz}$.

Notations :

- Pour des distances à la source inférieures à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en **champs proches**.
- Pour des distances à la source supérieures à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en **champs lointains**.

Champs proches :

- Dipôle électrique : E varie en $1/r^3$, H varie en $1/r^2$, Z varie alors en $1/r$.

À faible distance le doublet rayonne essentiellement en champ E.

Dipôle magnétique : E varie en $1/r^2$, H en $1/r^3$, Z varie en r

À faible distance la boucle rayonne essentiellement en champ H.

Champs lointains :

- E et H décroissent en 1/r,

$$Z=Cte=377\Omega \text{ (impédance du vide)}$$

Le champ électromagnétique a les caractéristiques d'une onde plane

Exemple :

- Le champ E créé par une antenne boucle d'aire A, parcourue par un courant sinusoïdal
- D'amplitude I et de fréquence F, dans le plan de la boucle à une distance r, a pour expression en champ lointain :

$$E \approx 1,32 \cdot 10^{-14} \cdot A \cdot I \cdot \frac{F^2}{r} \dots \dots \dots (I .3)$$

I. 4. Les sources de perturbation :

Il existe deux types de sources de perturbations électromagnétiques :

- **Sources industrielles** : ces sources sont, en générale, les équipements et installations électroniques ou électriques (secteur d'alimentation, convertisseurs à hautes fréquences....). Les perturbations émises par ces sources peuvent être intentionnel ou non intentionnel.

Une source de bruit naturelle est définie par son origine. Celle-ci peut être terrestre, comme le rayonnement thermique émis par les corps chauds. Elle peut être atmosphérique, comme les décharges orageuses.

- **Sources naturelles** : ceux sont des phénomènes naturels (foudre, bruit cosmique ...exc.).Les perturbations émis par ce type de sources sont des perturbations non intentionnelles.

- **Les sources de perturbation industrielles :**

Ce sont des sources de bruit dues à l'activité humaine elles peuvent être soit intentionnelles, comme les émissions de radiodiffusion ou les radars, ou non intentionnelles, comme les parasites engendrés par les calculateurs, et ceux provenant du secteur d'alimentation...etc.

I.5 Champs créé par les émetteurs radio :

Suffisamment loin de l'antenne pour échapper aux phénomènes de champs dans la zone proches, le champ rayonné par un émetteur quelconque (AM, FM, TV, radars, etc.) Vaut :

$$E \text{ (v/m)} = \frac{1}{d} \sqrt{30 \cdot P \cdot G} \dots \dots \dots (I .4)$$

Avec :

d = Distance à laquelle se trouve l'antenne émettrice, en mètres.

P = Puissance réelle en sortie de l'émetteur, en Watts.

G = Gain de l'antenne, comparé à une antenne théorique isotrope (rayonnement constant dans 360°).

Le produit $P \times G$ est appelé « puissance équivalente (ou apparente) rayonnée ».

I.5.1. Champs créés par les émetteurs radars :

À cause de l'affaiblissement des ondes hyperfréquences, les radars, pour avoir une portée suffisante, utilisent des antennes à très grandes puissances. La précédente reste valable, mais on aboutit à des puissances crête (donc des champs pulsés équivalents à une modulation 100%)

Un radar serait donc, a priori, plus perturbateur qu'un émetteur radio ou TV.

Heureusement :

- a) On ne trouve ces radars que dans des endroits particuliers (aéroports, zones portuaires, zone militaire) :
- b) Des radars de cette puissance ne sont pas braqués vers le sol mais vers le ciel, ouvrent une cible bien précise.

I.6 Perturbations existantes sur le secteur :

Les principales perturbations existantes sur le secteur sont :

➤ Les Microcoupures :

Une microcoupure est une disparition totale de la tension d'alimentation durant moins d'une demi-période (quelques ms). Les microcoupures sont dues à deux causes principales :

- Court-circuit proches du point de consommation.
- Interruptions de la fourniture dues à la commutation de lignes et déclenchement des protections avec ré-enclenchement automatique.

❖ Effet :

Sur des équipements avec des fonctions de mémoire ou de logique, une coupure de l'alimentation (même de courte durée) provoque généralement des dysfonctionnements fonctionnels. Les équipements informatiques sont en général très sensibles à ces perturbations qui peuvent entraîner la perte de données très précieuses.

➤ Les tensions harmoniques :

Le distributeur met à disposition des utilisateurs des tensions sinusoïdales à 50 Hz que certains équipements perturbateurs (électronique de puissance, microordinateurs,) peuvent déformer (**Fig. I.1**). Une tension déformée est la superposition d'une sinusoïde à 50 Hz et d'autres sinusoïdes à des fréquences multiples entières de 50 Hz,

que l'on appelle Harmoniques. On dit que la sinusoïde de Fréquence 100 Hz est de rang 2, celle de Fréquence 150 Hz de rang 3, etc.

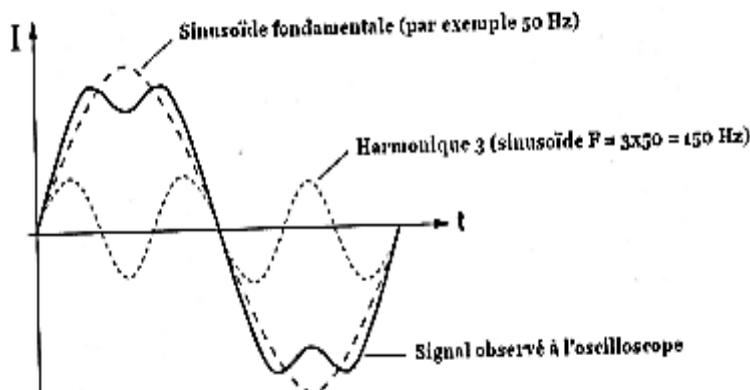


Fig. I.1 : représentation temporelle des harmoniques

La présence de tensions harmoniques sur le réseau génère des courants harmoniques dans les équipements électriques, ce qui provoque des échauffements.

➤ **Les variations de fréquence :**

L'origine de ce phénomène est les groupes électrogènes dont la fréquence d'entraînement n'est Pas régulée.

L'un des problèmes de variation de fréquence est que les harmoniques se déplacent en fréquence avec un décalage proportionnel à leurs rangs, par exemple : une variation de 1 Hz de la source correspond à une variation de 11 Hz de l'harmonique 11.

Sachant que tous les matériaux électroniques ne peuvent pas supporter des variations de fréquences de $\pm 4\%$ pendant une durée de 10 ms, sauf le cas de gros systèmes avec des transformateurs fonctionnant à la limite de saturation, ils peuvent subir un échauffement excessif par une fréquence faible.

➤ **Bruit HF :**

Dans leurs parcours, les lignes d'énergie sont exposées aux champs de nombreux émetteurs radio, ainsi qu'à la pollution par les consommateurs produisant de la haute fréquence (convertisseurs, hacheurs, soudeuses, appareils HF industriels, matériel médical à fréquences radioélectrique, etc)

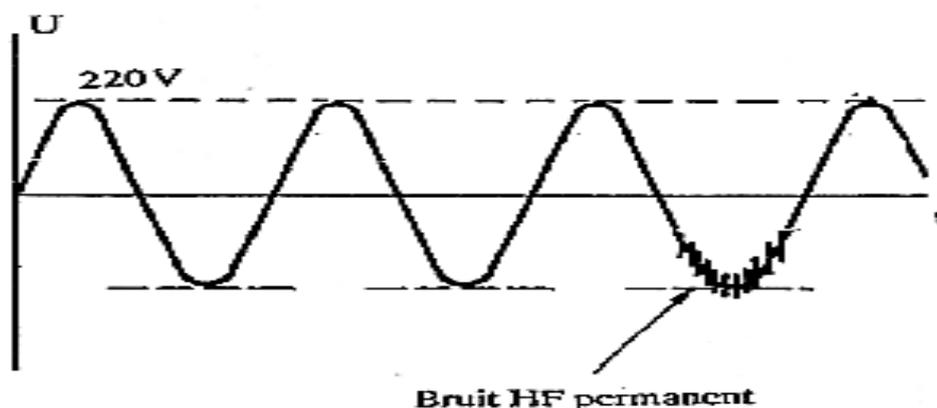


Fig. I.2 : Bruit HF supposé au secteur

On trouve donc couramment des signaux HF superposés au secteur (**Fig. I.2**), souvent modulés aux types de fréquences AM, FM, TV, etc. Les amplitudes vont de quelques centaines de mV efficaces jusqu'à plusieurs volts pour les cas extrêmes.

I.7 convertisseurs et générateurs HF :

De nombreux équipements de puissance utilisent des convertisseurs fréquences :

a) Pour la conversion d'énergie :

- Régulateurs de tension à découpage (fréquence de découpage 20 KHz à plusieurs centaines de KHz) ;
- convertisseurs de fréquence pour entraînements à vitesse variable
- convertisseurs/onduleurs statiques.

b) pour utiliser les propriétés de la haute fréquence à des fins industrielles (chauffage, découpage, collage, ultrasons, Ets.) ou scientifiques et médicales.

Ces appareils peuvent appliquer des puissances importantes (la dizaine de KW jusqu'à plusieurs MW) à des fréquences qui leur ont été allouées par des règlements internationaux, comme : 618 MHz, 13,56 MHz, 27,2 MHz, 40 MHz, 68 MHz, 915 MHz, 2 450 MHz.

Tous ces équipements superposent en permanence des courants HF sur le réseau d'alimentation. Ils peuvent également rayonner par leurs câbles et leurs capots, puisqu'ils sont assimilables à des émetteurs. A proximité, on peut trouver des champs magnétiques importants (une dizaine d'A/m à une distance de l'ordre du mètre).

I.8 Champ de fuite des transformateurs :

Les transformateurs d'alimentation fonctionnent toujours près de leur saturation.

L'induction crête dans le fer dépasse 1.5 T (tesla) et peut même dans certain cas atteindre 2 T.

Avec de tels niveaux d'induction, le fer sature (**Fig. I.3**) et le champ magnétique dans l'air dépasse 100 A/m (et peut atteindre 1000 A/m) au voisinage du transformateur.

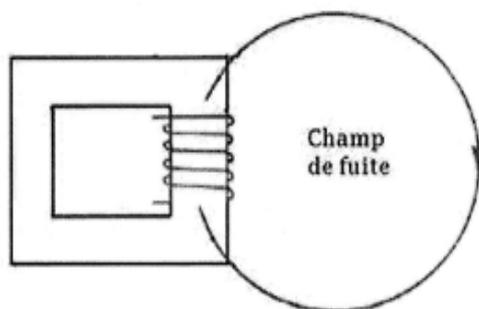


Fig. I.3 : champ de fuite au voisinage d'un Transformateur

L'effet le plus fréquent du champ de fuite est la déformation des images de tubes cathodiques. Un tube cathodique classique supporte à peine 5 A/m en basse fréquence. Les autres effets de ce champ sont: l'induction de bruit dans les têtes de lectures (magnétophones, dérouleurs de bande, lecteurs de disquettes...) et dans les boucles de câblage.

Le champ magnétique rayonné par un transformateur, et de manière générale par toute source localisée, décroît rapidement avec la distance.

I.8.1 Les courts circuits :

Les courts circuits sur les lignes d'alimentation se traduisent par :

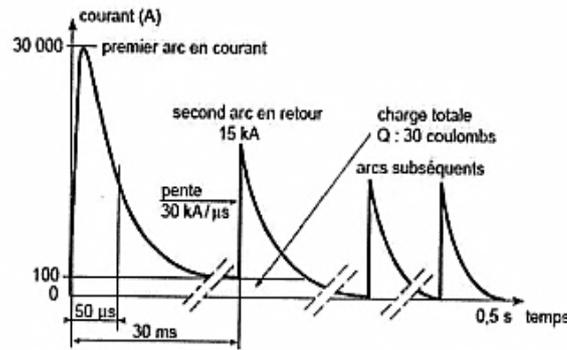
- La d.d.p. de la ligne qui chute à zéro.
- Le courant de court-circuit génère un champ transitoire intense : sur un réseau électrique, le courant de court-circuit au voisinage d'un transformateur d'alimentation est de 5 à 50 fois supérieures au courant nominal. Le champ magnétique rayonné durant un court-circuit n'est gênant que pour les électroniques sensibles à bas niveau.

I.9 Les sources de perturbation naturelles :

I.9.1 La foudre :

La foudre est une décharge électrique se produisant entre un nuage orageux chargé et la Terre. La foudre est équivalente à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur, on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à 108 m/s. c'est « l'arc en retour » ou « return stroke ». La foudre est en général constituée de plusieurs décharges partielles (**Fig. I.4**) s'écoulant par le même canal ionisé. Lorsque la décharge principale est terminée [4].

Après une durée environ de 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires.



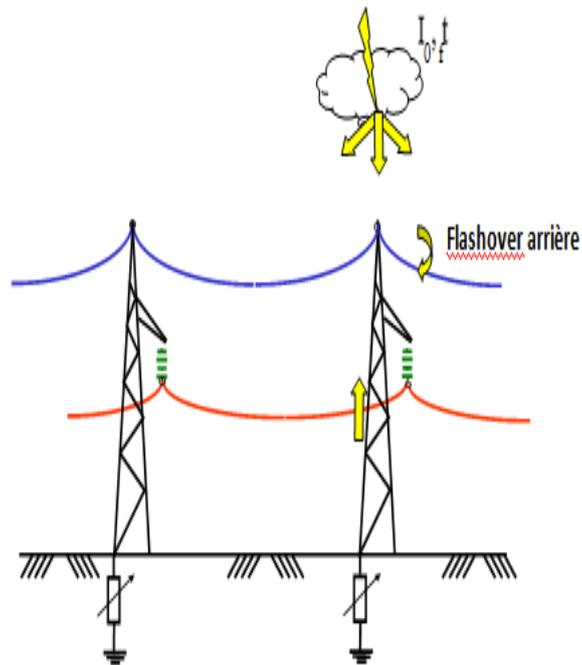
(Fig. I.4) : le courant de foudre

I.9.2 Effet de la foudre :

➤ **Surtensions directes :**

L'impact direct sur une ligne (électrique ou téléphonique), génère une onde de tension qui se propage sur la ligne (Fig. I.5). Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10 kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300 Ω, l'onde de tension atteindra 1500 kV.

Le taux d'interruption annuel causé par un flashover de l'isolation de la ligne résultant des coups sur les tours et sur les fils de mise à la terre



(Fig. I.5) L'impact direct sur une ligne électrique

I.9.3 Les surtensions

Une surtension est toute tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel, définie par la norme CEI 71-1.

Une surtension est dite de mode différentiel si elle apparaît entre conducteurs de phase ou entre circuits différents. Elle est dite de mode commun si elle apparaît entre un conducteur de phase et la masse ou la terre. [5]

■ Origine des surtensions

Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe.

□ Origine interne

Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même.

À titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur. [5]

□ Origine externe

Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple :

- surtension provoquée par la foudre
- propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau interne d'usine. [5]

■ Classification des surtensions

La norme CEI 71-1 donne la classification des surtensions selon leur durée et leur forme. Selon la durée, on distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

- **surtension temporaire** : surtension à fréquence industrielle de durée relativement longue (de quelques périodes à quelques secondes). [6]
- **surtension transitoire** : surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie. [6]

Les surtensions transitoires sont divisées en :

- . Surtension à front lent
- . Surtension à front rapide
- . Surtension à front très rapide.

■ Formes de tensions normalisées

La norme CEI 71-1 donne les formes d'ondes normalisées utilisées pour effectuer les essais des matériels :

- **Tension de courte durée à fréquence industrielle** : c'est une tension sinusoïdale de fréquence comprise entre 48 Hz et 62 Hz et de durée égale à 60 s. [6]
- **Tension de choc de manœuvre** : c'est une tension de choc ayant une durée jusqu'à la crête de 250 μ s et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 2500 μ s. [6]

- **Tension de choc de foudre** : c'est une tension de choc ayant une durée de front montant de 1,2 µs et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 50 µs.

■ **Conséquences des surtensions**

Les surtensions dans les réseaux électriques provoquent des dégradations du matériel, une baisse de la continuité de service et un danger pour la sécurité des personnes.

Les conséquences peuvent être très diverses suivant la nature des surtensions, leur amplitude et leur durée. Elles sont résumées dans ce qui suit :

- claquage du diélectrique isolant des équipements dans le cas où la surtension dépasse leur tenue spécifiée
- dégradation du matériel par vieillissement, causé par des surtensions non destructives mais répétées
- perte de l'alimentation suite aux coupures longues causées par la destruction d'éléments du réseau

❖ **Surtensions à fréquence industrielle**

Les surtensions à fréquence industrielle ont généralement pour origine :

- un défaut à la terre
- une résonance ou une Ferro-résonance
- une rupture du conducteur neutre
- un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur
- une surcompensation de l'énergie réactive suite à un défaut d'un régulateur var métrique
- un délestage de charge, notamment lorsque la source d'alimentation est un alternateur.

Les surtensions qui apparaissent lors d'un défaut à la terre dépendent fortement du régime de neutre du réseau considéré.

Neutre isolé (MT ou BT) ou mis à la terre par impédance (MT). [6]

La figure I-6 montre que lors d'un défaut à la terre franc, la tension entre le point neutre et la terre devient égale à la tension simple :

$$|V_{Neutre}| = V_n$$

V_n : tension simple nominal

$$V_{Neutre} = -V_1$$

Pour un défaut sur la phase 1,

La tension phase-terre des phases saines de vient donc égale à la tension composée :

D'où

$$V_{2T} = V_{neutre} + V_2 = V_2 - V_1$$

$$V_{3T} = V_{Neutre} + V_3 = V_3 - V_1$$

$$|V_{2T}| = |V_{3T}| = \sqrt{3} V_n$$

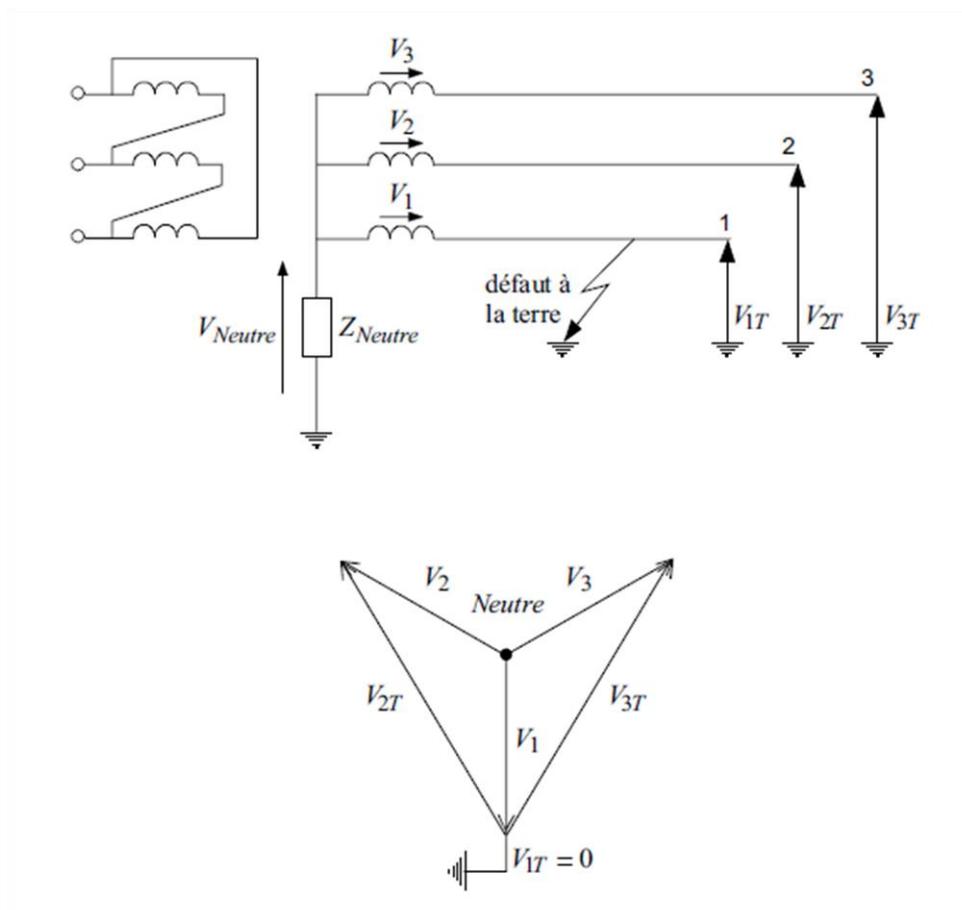


Figure I-6 la tension entre le point neutre et la terre

- V_1, V_2, V_3 : Tensions phase-neutre
- V_{1T}, V_{2T}, V_{3T} : Tensions phase-terre
- Z_{Neutre} : Impédance de mise à la terre (Z_{Neutre} pour un neutre isolé)

Surtension sur un réseau à neutre isolé ou mis à la terre par impédance lors d'un défaut Monophasé à la terre

Note 1 : pour un neutre mis à la terre par impédance, la valeur de Z_{Neutre} est très supérieure à la valeur des impédances du transformateur et du câble et de la résistance de défaut, c'est la raison pour laquelle $V_{Neutre} = -V_1$

Note 2 : dans les réseaux de distribution publique aériens, il existe des défauts très résistants (plusieurs kW), de valeur proche ou supérieure à l'impédance de mise à la

terre. Dans ce cas, un défaut très résistant provoquera une surtension inférieure à $\sqrt{3}V_n$

I.10 Neutre mis directement à la terre (HT ou MT)

Lors d'un défaut à la terre d'une phase du réseau, il s'établit un courant élevé qui circule dans le circuit formé par la phase en défaut, la terre et la prise de terre du neutre (voir **fig. 1-7**).

Au point de défaut, le système des tensions triphasées est perturbé. La tension de la phase en défaut par rapport à la terre est presque nulle si l'on néglige la résistance de défaut. Les tensions des deux autres phases par rapport à la terre sont supérieures à la tension simple, tout en restant inférieures à la tension composée.

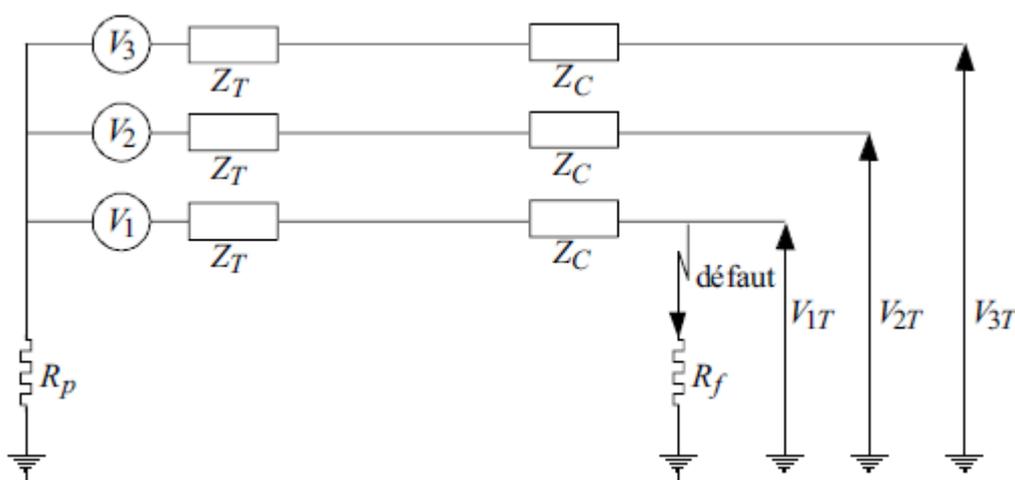


Figure 1-7: schéma équivalent d'un défaut phase-terre lorsque le neutre est mis directement à la terre

V_1, V_2, V_3 : tensions simples

Z_T : impédance du transformateur

Z_C : impédance du câble

R_p : résistance de la prise de terre du neutre

R_f : résistance du défaut

Ainsi, on définit un facteur de défaut à la terre k caractérisant la surtension phase-terre apparaissant sur les phases saines :

$$V_{2T} = V_{3T} = k V_n$$

V_n : tension simple nominale

Les calculs par la méthode des composantes symétriques. du *Guide des protections*) permettent de déterminer la valeur de k en fonction des impédances directes, inverses et homopolaires :

$$K = \left| 1 - \frac{z_d + a^2 + az_0}{z_d + z_i + z_0 + 3R_f} \right| \dots\dots\dots (I.5)$$

Dans la plupart des réseaux, les alternateurs sont suffisamment éloignés pour prendre l'approximation $Z_d = Z_i$; on a alors

$$K = \left| 1 + \frac{a(z_d - z_0)}{2z_d + z_0 + 3R_f} \right| \dots\dots\dots (I.6)$$

Des abaques permettent de déterminer le facteur k pour une résistance du défaut nulle

($R_d = 0$) en fonction des rapports $\frac{R_0}{X_d}$ et $\frac{X_0}{X_d}$ pour $R_d = 0$ et $R_d = 0,5 X_d$

avec :

R_d : résistance directe vue du point de défaut

X_d : réactance directe vue du point de défaut

R_0 : résistance homopolaire vue du point de défaut

X_0 : réactance homopolaire vue du point de défaut

Lorsque la résistance du défaut n'est pas nulle, on voit dans la formule exprimant k que la surtension est plus faible. Le calcul de la surtension avec une résistance de défaut nulle fournit donc une valeur par excès.

En reprenant le schéma de la figure 5-2, on peut déterminer ces impédances pour un cas pratique :

En posant : $\left. \begin{matrix} Z_T = R_T + j X_T \\ Z_C = R_C + j X_C \end{matrix} \right\}$ Impédances directes

$\left. \begin{matrix} Z_{0T} = R_T + j X_{0T} \\ Z_{0C} = R_C + j X_{0C} \end{matrix} \right\}$ Impédances homopolaires

on détermine : $R_d = R_T + R_C$ $X_d = X_T + X_C$

$R_0 = 3 R_p + R_T + R_C$ $X_0 = X_{0T} + X_{0C}$

Nota : il apparaît un facteur 3 devant R_p , la raison est expliquée **figure I-8** du Guide des protections des réseaux industriels.

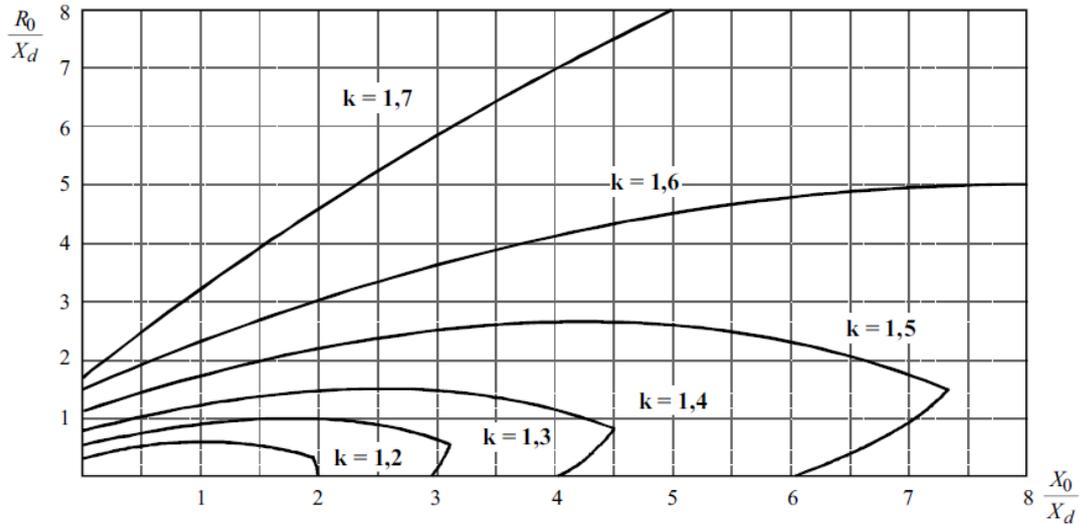


Figure I-8 : facteur de défaut à la terre en fonction des rapports $\frac{X_0}{X_d}$ et $\frac{R_0}{X_d}$
 Pour $R_d=0$ et $R_f=0$

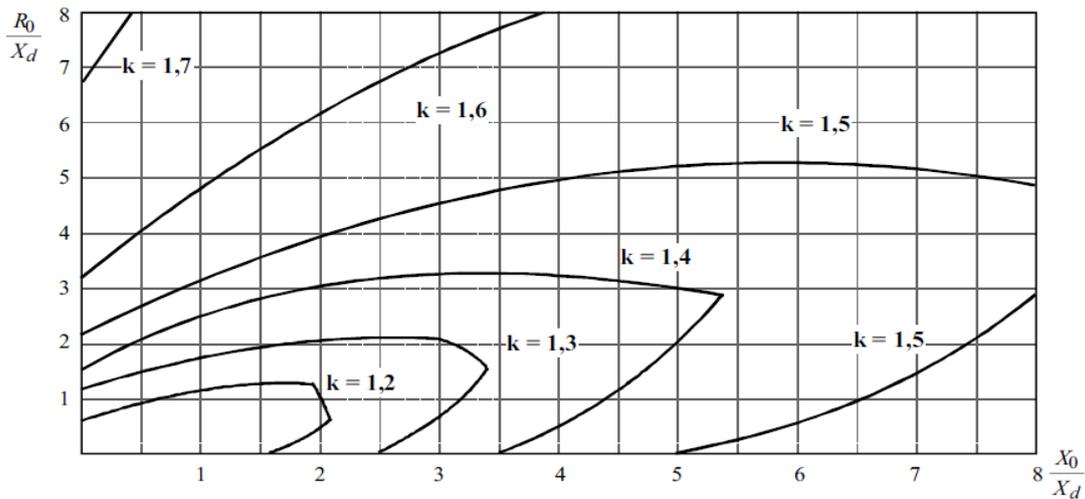


Figure I-9 : facteur de défaut à la terre en fonction des rapports
 Pour $R_d=0.5X_d$ et $R_f=0$

• Exemple

On considère un transformateur YN, 33 kV / 11 kV de puissance $S_n = 24 \text{ MVA}$ (voir CEI 909-2 tableau 3 A) alimentant un réseau de câble 240 mm² Alu dont le départ le plus long est de 5 km. La résistance de la prise de terre du neutre est 0,5 Ω.

- caractéristiques du transformateur :

$$U_{cc} = 24,2 \%$$

$$\frac{RT}{XT} = 0,046 \dots \dots \dots (I.7)$$

$$\frac{X_{0T}}{X_T} = 0,07$$

On déduit $X_T = U_{cc} \times \frac{UN^2}{SN} \frac{11 \times 10^3}{24 \times 10^6} = 1,22 \Omega$.

$$R_T = 0,056 \Omega$$

$$X_{0T} = 0,85 \Omega$$

Nota :

La valeur de U_{cc} est très élevée par rapport aux transformateurs alimentant un réseau à neutre mis à la terre par résistance de limitation. Il s'agit d'un transformateur du Royaume-Uni adapté au régime de neutre mis directement à la terre.

La tension de court-circuit est volontairement choisie élevée afin de minimiser le courant de Court-circuit .En effet si U_{cc} est élevé, la valeur est minimisée car ($X_d = X_t + X_c$)

Ce qui diminue le facteur de surtension (voir Fig. I-8 et I-9).

- caractéristiques du câble : $X_C = 0,1 \Omega / km$

On suppose que $X_{0C} = 3 X_C = 0,3 \Omega / km$

Pour un défaut franc ($R_f = 0$) aux bornes du transformateur :

$$R_d = R_T = 0,056 \Omega$$

$$R_0 = 3 R_p + R_T = 3 \cdot 0,5 + 0,056 = 1,56 \Omega$$

$$X_d = X_T = 1,22 \Omega$$

$$X_0 = X_{0T} = 0,85 \Omega$$

I.11 Surtensions induites (indirectes):

Le courant de la foudre provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. À cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact (**Fig. I.7**).

Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

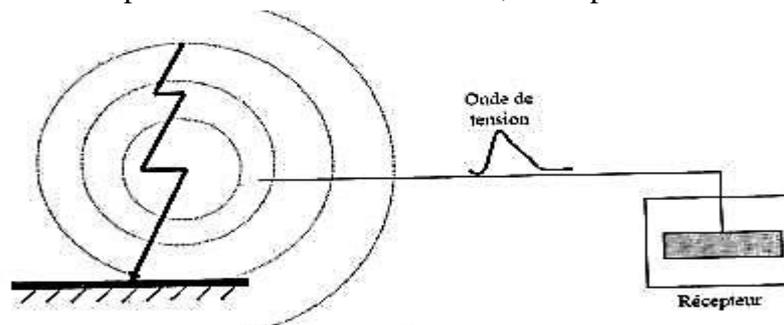


Fig. I.10 : Surtension induite sur une ligne

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 à 100 kA/μs). Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important.

Pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivante :

$$U = Z_0 \cdot I \cdot h/d$$

Z_0 : l'impédance de la ligne.

$$Z_0 = \frac{0.25\pi}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} \dots\dots\dots (I .8)$$

h : hauteur du conducteur.

d : distance entre la ligne et le point d'impact de la foudre.

I : courant de la foudre.

I.12 Montée en potentiel de la prise de terre :

Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises de terre.

La valeur du potentiel de terre à proximité de l'impact d'une foudre est donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi \cdot d} \dots\dots\dots (I .9)$$

I : courant de foudre crête, en ampère.

ρ : résistivité moyenne du sol (Ω.m).

d : distance par rapport à l'impact de foudre.

Pour avoir une idée sur les ordres de grandeur nous allons calculer la d.d.p. en les deux pieds d'un piéton à proximité d'un impact de foudre. Pour cela on choisira les valeurs suivantes :

$$I = 50 \text{ Ka}$$

$$\rho = 500 \text{ } \Omega.m$$

$$dI \text{ (distance du pied l par rapport au point d'impact)} = 100.5 \text{ m}$$

d_2 (distance du pied² par rapport au point d'impact) = 100 m

$$V_2 = 500 * 50000 / (2 * 3.14 * 100) = 39808 \text{ v}$$

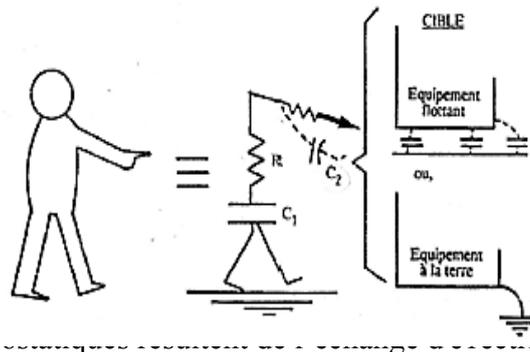
$$V_1 = 500 * 50000 / (2 * 3.14 * 100.5) = 39610 \text{ v}$$

$$V_2 - V_1 = 198 \text{ v}$$

La distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin Parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée Tension de pas.

I.13 Les décharges électrostatiques (DES) :

On désigne par le terme «décharge électrostatique» les impulsions de courant parcourant un objet quelconque, lors du contact (direct ou indirect) de cet objet relié à la masse, avec un autre objet (souvent une personne) présentant un potentiel élevé par rapport à cette masse (**Fig. I.11**).



(Fig. I.11).Présentant un potentiel élevé par rapport à cette masse

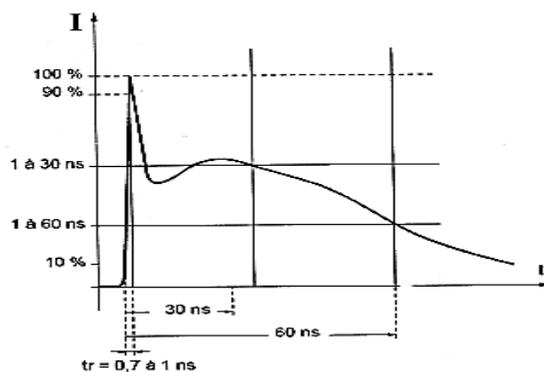
Entre le corps humain et les matériaux. Ce phénomène est favorisé par la combinaison de matériaux synthétiques (plastiques, tissu ...) et une atmosphère sèche.

Le processus peut résulter par exemple de la charge d'une personne lorsqu'elle marche sur une moquette (échange d'électrons entre le corps et le tissu), le frottement des vêtements d'un opérateur assis sur sa chaise. Les décharges peuvent se produire entre une personne et un objet ou entre des objets chargés.

I.13.1Caractéristiques des décharges électrostatiques :

Les éléments significatifs de ces perturbations sont (**Fig. I.12**) :

- La très faible durée du temps de montée de l'impulsion (0.7 à 1 ns).
- La durée de l'impulsion 60 ns-
- Le caractère isolé du phénomène : 1 décharge.
- La tension très élevée à l'origine de la décharge (2 à 15 kV).



(Fig. I.12) : caractéristique d'une décharge électrostatique

Les perturbations de types décharges électrostatiques sont des perturbations de type haute fréquence « HF » que l'on trouve sous forme conduites, mais qui se couplent facilement sur d'autres conducteurs par rayonnement.

L'effet de la décharge d'un opérateur sur un matériel peut aller du simple dysfonctionnement jusqu'à la destruction du matériel.

I.13.2 Le bruit cosmique :

Ce bruit est dû aux étoiles qui émettent d'énormes quantités d'énergie, particulièrement le soleil dont l'énergie irradiée se situe dans la bande allant de quelques MHz à quelque GHz. D'autres sources principales de ce bruit sont les centres de toutes les galaxies.

I.14 Dispositifs de protection :

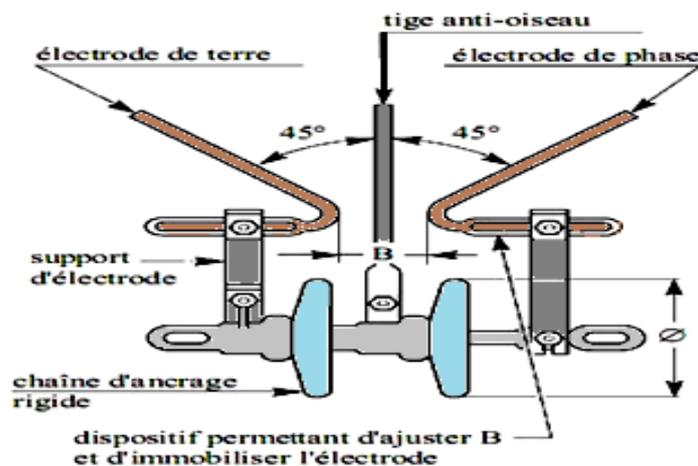
Pour éviter que les surtensions n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtensions à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installe, dans les postes, des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtensions à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse.

Les dispositifs de protection peuvent être classés en deux catégories :

- Les éclateurs à air.
- Les parafoudres.

I.14.1 Éclateurs à air :

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension de contournement. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes. La forme et la nature de ces électrodes sont très variables. Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix (Fig. I-13). [7]



(Fig. I.13) : Schéma d'un éclateur

Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction.

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans inconvénients :

- Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne se désamorce pas spontanément. Le défaut artificiel ainsi créé doit être éliminé par l'action des protections et du disjoncteur associé. Il est, par ailleurs, à l'origine de coupures brèves très gênantes pour la qualité de service.
- Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité.
- Le niveau d'amorçage est très fluctuant.
- Les éclateurs sont sensibles aux agressions extérieures.

En tout état de cause, l'éclateur demeure un excellent moyen de protection des isolations dans l'air puisque la tenue diélectrique du matériel à protéger subit les mêmes fluctuations que sa tension d'amorçage. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique. On est alors amené à le remplacer de façon avantageuse par des parafoudres.

I.14.2 Parafoudre au carbure de Silicium :

Les parafoudres SiC (Fig. I.14) permettent de remédier à la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Ce type de parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances en carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs, l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante remplie d'un gaz sec (air ou azote). L'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion interne donc la dérive des caractéristiques et, à terme, la défaillance du parafoudre. En subdivisant l'intervalle d'amorçage en

plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre. [7]

Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destiné à éviter les contournements.

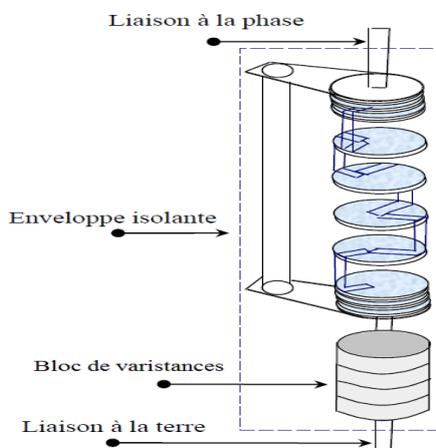
Sous la tension de service, les éclateurs internes isolent le parafoudre. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs deviennent conducteurs et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les varistances dont la résistance diminue au fur et à mesure que le courant augmente, ce qui permet de limiter la surtension. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la non-linéarité des varistances entraîne une décroissance très rapide du courant pouvant alors être facilement interrompu au premier passage par zéro de la tension appliquée. Ainsi, la surtension est écrêtée sans provoquer de défaut. [6]

Son niveau de protection est la valeur maximale des trois tensions suivantes :

- La tension maximale d'amorçage au choc de foudre (1.2/50 μ s).
- La tension maximale d'amorçage sur onde à front raide, divisée par 1,15.
- La tension résiduelle au courant nominal de décharge.

Bien que d'un coût plus élevé, le parafoudre SiC se révèle très avantageux par rapport à un éclateur à air classique :

- L'extinction de l'arc interne est spontanée après passage de la surtension.
- La tension à ses bornes est non nulle après amorçage, ce qui évite la transmission d'une onde de tension coupée :



(Fig. I.14) : Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs

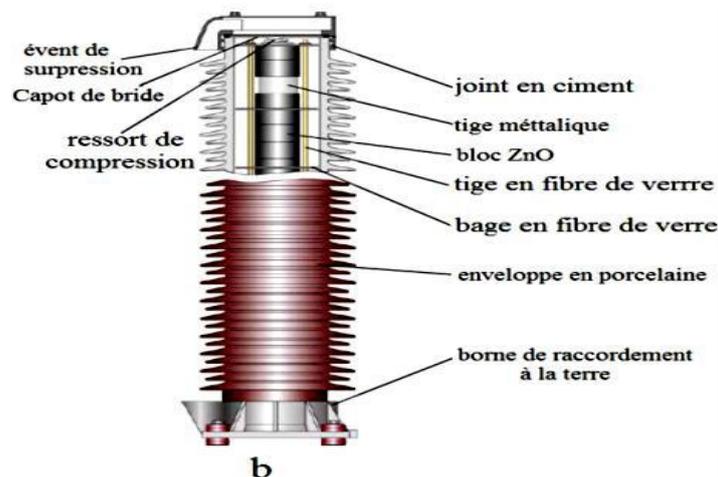
- Sa tension d'amorçage est plus stable ;
- Il présente une bonne insensibilité aux agressions extérieures puisque les éléments actifs sont placés dans une enveloppe hermétiquement fermée.

I.14.3 Parafoudre à Oxyde de Zinc :

C'est au cours des années 1970 que des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces varistances qui présentent deux avantages essentiels :

- Un coefficient de non-linéarité très important sur une large plage de courant.
- Une capacité d'absorption d'énergie très élevée.

La partie active des parafoudres ZnO est simplement constituée d'un empilage de varistances à Oxyde de Zinc, placé dans une enveloppe étanche et isolante en porcelaine ou, plus récemment, en matériau synthétique (**Fig. I.15**). [6]



(**Fig. I.15**) : Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction. La fabrication de ces céramiques requiert en effet beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur fiabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible. Elles sont principalement constituées d'Oxyde de Zinc (90% en masse) et d'un mélange d'autres Oxydes (Oxyde de Bismuth, de Cobalt, de Manganèse, de Chrome, d'Étain...) de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlées, qui sont mélangés en phase aqueuse. Ce mélange est ensuite asséché et la poudre résultante est compactée sous forme de disques. Les pièces sont alors frittées à très haute température (1000°C et plus) de façon à densifier l'ensemble et obtenir l'effet de non-linéarité recherché. Les disques sont finalement revêtus, en périphérie, d'une couche isolante assurant la tenue diélectrique de la varistance, puis métallisés sur chacune de leurs faces par projection d'un alliage métallique en fusion. [6,7]

I.15 Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO :

Les parafoudres ZnO protègent l'isolation des équipements dans les systèmes électriques contre les surtensions internes et externes.

Sous la tension de service permanent, l'impédance d'un parafoudre ZnO est très élevée si bien qu'il est parcouru par un courant très faible dit courant de fuite (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît, sa résistance diminue rapidement de manière à constituer un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre, et donc à limiter le niveau de la contrainte résiduelle.

Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant le parafoudre passe de 0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ : cela fait du parafoudre ZnO un dispositif de protection presque idéal. Les parafoudres ZnO ont rapidement remplacé les parafoudres SIC, cela est dû à la forte non-linéarité de leurs caractéristiques (V-I ou E-J) comme il est montré sur la (**Fig. I.16**), ce qui a pour effet d'éliminer les éclateurs qui étaient présents dans leurs prédécesseurs et les caractéristiques électriques sont exclusivement déterminées par les propriétés des varistances ZnO.

On augmente la tension assignée en ajoutant des varistances en série par contre pour avoir de plus forte énergie on augmente le diamètre des varistances ou on réalise des colonnes parallèles. Le niveau de protection d'un parafoudre ZnO correspond à sa tension résiduelle au courant nominal de décharge qui le caractérise.

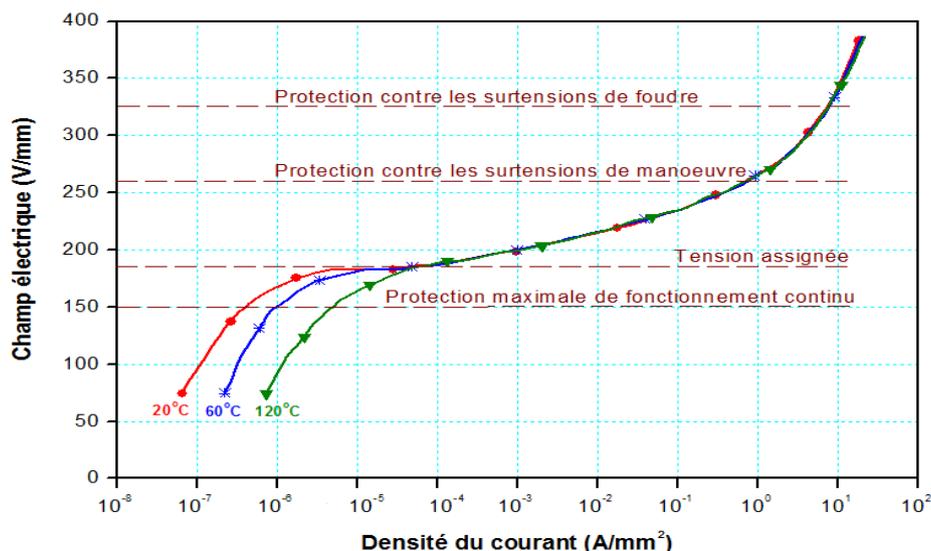
A partir des caractéristiques d'une varistance, dimensionner un parafoudre ZnO consiste à définir le nombre de varistances élémentaires à associer en série. [6,7]

Deux exigences influent sur le nombre de varistances à placer en série :

- Un bas niveau de protection (un nombre maximal) ;
- La tenue à une tension de service donnée (un nombre minimal).

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable en toutes circonstances de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui lui est injectée. Lors de l'écrêtage d'une surtension, l'échauffement des varistances peut être considéré comme adiabatique. Il est donc nécessaire que la puissance dissipée par le parafoudre soit, à tout instant, supérieure à la puissance qu'il absorbe, sachant que celle-ci croît fortement avec la température. Dans le cas contraire, un phénomène appelé "emballement thermique" conduit à la défaillance du parafoudre.

En dehors des décharges de foudre, le parafoudre écrête toutes les surtensions du réseau. La norme [2.6] définit ainsi des classes de décharge de ligne de 1 à 5 correspondants à des capacités d'énergie croissantes.



(Fig. I.16) Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [6,7]

Pour les réseaux de distribution moyenne tension, la classe habituelle est la classe 1. Les classes 2 et 3 se retrouvent usuellement sur des réseaux de 60 à 225 kV et les classes 4 et 5 pour les réseaux 225kV, 400kV et au-delà

I.15.1 Caractéristiques des parafoudres ZnO :

L'étude des propriétés des parafoudres ZnO et l'analyse des contraintes d'exploitation ont permis de définir les caractéristiques électriques des parafoudres fixées par les spécifications d'essai.

➤ La notion de tension assignée (U_r), bien qu'ambiguë, est capitale. En fait, elle caractérise la tenue du parafoudre aux surtensions temporaires. Il s'agit plus précisément de la surtension maximale à fréquence industrielle que l'on peut appliquer, pendant 10s et suite à l'absorption d'une forte énergie, sans constater d'emballement thermique du parafoudre.

➤ La tension maximale de service permanent (U_c) est la tension maximale que le parafoudre est capable de supporter en permanence dans des conditions ambiantes données.

➤ Le courant nominal de décharge (I_n) est la valeur de crête d'une onde de courant de forme bi-exponentielle 8/20 μ s, qui sert à classer le parafoudre. En moyenne tension,

il peut prendre la valeur 5 kA ou 10 kA.

Le niveau de protection du parafoudre est défini à ce courant.

➤ La capacité d'absorption énergétique est traduite par la tenue aux ondes de courant de forme bi-exponentielle

4/10 (65 kA pour $I_n = 5$ kA et 100 kA pour $I_n = 10$ kA)

et par la tenue aux ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité.

L'utilisation d'un parafoudre n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui les séparent du matériel à

protéger et de sa terre, d'où l'importance de la notion de distance de protection du parafoudre.

I.15.2 Comportement dynamiques des parafoudres ZnO :

L'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres ZnO et les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que les parafoudres ZnO ont des caractéristiques dynamiques qui dépendent de la fréquence et qui sont très importantes lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide [2.5]. Pour des contraintes ayant des temps de montée inférieur à $8\mu\text{s}$, la tension de décharge du parafoudre atteint son maximum avant que le courant de décharge du parafoudre atteigne le sien et la tension de décharge du parafoudre ZnO augmente, lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette augmentation de la tension résiduelle peut atteindre 6% quand le temps de montée est réduit de $8\mu\text{s}$ à $1,3\mu\text{s}$.

La figure 1.17 montre les différentes surtensions en fonction de leurs plages de durée et amplitudes. Elle présente aussi la relation liant les surtensions, les niveaux de protection du parafoudre et les tensions de tenue d'un équipement.

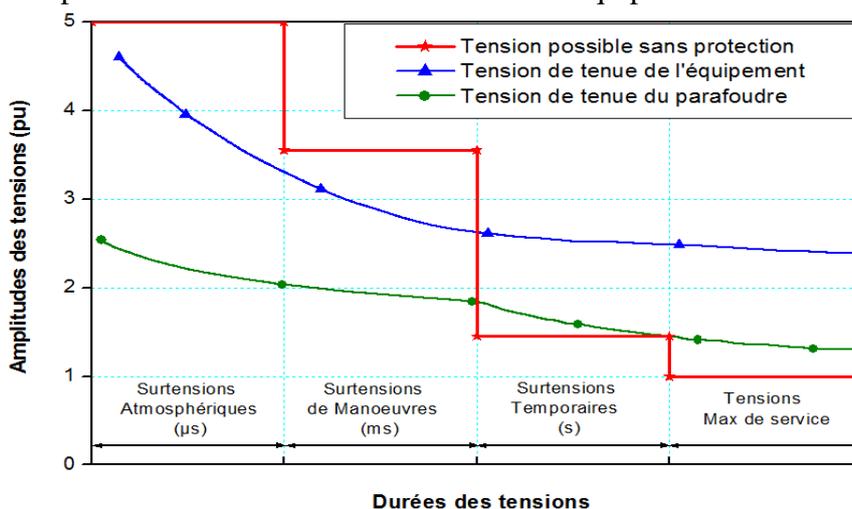


Fig. II-17 Schéma représentatif des amplitudes des tensions en fonction de leur durée, tensions de tenue de l'équipement et des niveaux de protection des parafoudres

Pour les surtensions de manœuvre et atmosphérique, l'amplitude de la surtension pourrait dépasser la tension de tenue des équipements, toutefois, le rôle du parafoudre est de limiter ces surtensions à des valeurs inférieures. En conséquence, l'isolation doit résister à des surtensions qui pourraient survenir en cas d'absence du parafoudre. Comme les surtensions temporaires étant généralement inférieures à la tension de tenue, le parafoudre ne limite pas ce type de surtensions. [7]

I .16 Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre les différentes sources de perturbations Électromagnétiques. On a mis en évidence quelque source de perturbations fréquentes, en les classant dans deux catégories différentes : naturelles et industrielles. Et après nous nous intéressons aux contraintes de tension et à leurs pendants, les tenues diélectriques des matériels.

Par ailleurs, nous avons donné des informations d'ordre général sur les effets électromagnétiques de la foudre et sur les dispositifs de protection des systèmes électriques.

Il peut être conclu que si l'on veut améliorer la qualité du service, il s'avère nécessaire de faire un choix rationnel des isolements ce qui impose donc à la fois la connaissance des diverses contraintes électriques apparaissant dans un réseau, la connaissance de la réponse des isolations à ces contraintes, celle des caractéristiques de l'appareillage de protection.

Chapitre II

Notions de base sur la mise à la terre

II Introduction :

La problématique de la qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité), ou intervenants divers (fournisseurs d'électricité ou de services, organismes de régulation...).

Parmi tous ces acteurs, le gestionnaire de réseau occupe une position centrale. Sa responsabilité est de mettre en œuvre les moyens permettant de maîtriser la qualité aux interfaces entre le réseau et le monde extérieur (utilisateurs du réseau, réseaux voisins), dans le souci du respect du Règlement Technique et des contrats.

Le besoin de répondre à un ensemble de critères de qualité a toujours été présent dans ce domaine d'utilité publique. Ce besoin est d'autant plus sensible que la fourniture d'énergie par un réseau est caractérisée par un degré de "volatilité" qui est unique en son genre : la quantité d'énergie accumulée dans le réseau électrique stricto sensu correspond à quelques secondes de consommation.

Toutefois, le besoin de qualité a pris une acuité nouvelle dans le contexte de monde entier, en raison de la volonté de considérer l'électricité comme un "produit" dont le marché est en voie de libéralisation complète. Les réseaux de transport et de distribution deviennent accessibles à tout producteur cherchant à vendre son produit à n'importe quel consommateur, comme cela est pratiqué pour d'autres produits en empruntant le réseau routier. On comprend aisément que la "qualité" d'un produit véhiculé de la sorte doive être soumise à une vérification quantitative plus rigoureuse que les simples "règles de l'art" qui pouvaient suffire antérieurement.

L'énergie électrique est un facteur primordial du développement. Les pays en développement, souvent situés dans les régions tropicales, ont encore à ce jour un déficit en taux d'électrification et, en plus, les réseaux électriques existants connaissent de nombreuses perturbations, dues notamment aux problèmes de mise à la terre.

Depuis plusieurs décennies, des recherches se sont intensifiées dans le domaine des mises à la terre des installations électriques. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements de ces mises à la terre à fréquence industrielle et en régime établi ; en plus, la résistivité du sol considérée était généralement proche de 100 $\Omega.m$ (valeur souvent rencontrée dans les régions tempérées), ce qui n'est pas le cas en région tropicale dans certains types de terrain (comme pour l'Algérie).

En outre, les normes relatives aux mises à la terre se basent principalement sur ces données qui ne sont plus vraies en ce qui concerne la résistivité pour certains types de sol en milieu tropical. Pire, dans certaines de ces régions, le niveau karénique est élevé.

La nécessité de la mise à la terre se fait sentir d'une façon très aiguë avec l'augmentation de l'importance des systèmes d'alimentation, des tensions nominales et de la capacité des courts circuits. En cas de défaut, les systèmes non reliés à la terre produisent des surtensions plus

importantes que ceux qui sont reliés ; ce qui présente un grand avantage pour les systèmes reliés à la terre. Pour limiter les surtensions lors d'un défaut, une méthode consiste à mettre en série une résistance adéquate dans le circuit de terre comme il y a une autre méthode qui conduit à d'autre type de mise à la terre, soit par réactance soit direct.

II.1 Notions de base sur la mise à la terre :

Dans le présent chapitre, nous allons rappeler les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des installations électriques à fréquence industrielle, en mettant un accent particulier sur les propriétés des sols. Les schémas de liaison à la terre seront abordés sous l'aspect de leurs relations avec les réseaux de terre.

Toutefois, l'efficacité des mesures de sécurité mises en œuvre n'est garantie que si des contrôles réguliers attestent de leur bon fonctionnement.

Les risques liés à un non mise en sécurité des installations électriques peuvent présenter :

- De réels dangers pour la vie des personnes,
- La mise en péril des installations électriques et des biens.

Au niveau de l'utilisateur, une personne soumise à une tension électrique subit, selon l'importance de celle-ci, des effets plus ou moins graves pouvant aller jusqu'à la mort.

Les études réalisées par un groupe de travail composé de médecins et d'experts en matière de sécurité ont conduit à la détermination d'une tension de contact permanente admise comme non dangereuse pour les individus : 50 V AC pour les locaux secs, 25 V AC pour les locaux humides et 12 V AC pour les locaux immergés.

C'est donc par souci de sécurité que la législation a rendu obligatoire l'installation d'une prise de terre. Elle évite des élévations dangereuses de potentiel des masses et une mise sous tension accidentelle de masses métalliques ou conductrices pouvant être touchées par un individu. Quand une tension anormale (ou « tension de défaut ») est créée, l'écoulement via la prise de terre du « courant de défaut » associé, permettra le déclenchement si nécessaire des dispositifs de protection. Une prise de terre doit toujours donc être associée à un dispositif de coupure, sinon elle n'a pratiquement aucun intérêt.

II.2 Définition et but d'une mise à la terre :

Les mises à la terre ont été introduites par Benjamin Franklin. Célèbre inventeur des parafoudres. Un système de mise à la terre est constitué d'une tige enfouie dans le sol et reliée par un conducteur au neutre du circuit sur lequel différents équipements sont branchés. Elles jouent un rôle essentiel dans la protection des individus contre les accidents électriques et l'assurance du fonctionnement adéquat des installations électriques.

- D'une manière générale, une mise à la terre a pour but :
- D'écouler dans le sol les courants de défaut à la terre et de foudre ;
- D'assurer et maintenir à tout moment la sécurité des biens et des personnes ;

- De maintenir un potentiel de référence ;
- La compatibilité électromagnétique (CEM), c'est-à-dire la limitation des perturbations électromagnétiques ;
- Le fonctionnement correct du réseau d'alimentation électrique afin d'assurer une bonne qualité d'énergie.

À fréquence industrielle, l'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité (dans une moindre mesure sa permittivité aussi), des caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol.

Mise à la terre du réseau de transport d'énergie

Une mise à la terre d'un réseau de transport d'énergie est une exigence pour détourner les courants indésirables et potentiellement dangereux de toutes les parties métalliques exposées, telles que châssis d'équipement (pylône, poste, portique...) à des fins de protection des personnes et afin d'éviter tout endommagement potentiel de l'équipement.

Comme les courants utilisent toujours le chemin à l'impédance la plus basse, un conducteur doté d'une impédance faible peut être utilisé pour connecter tous les composants à un système de mise à la terre.

Système de mise à la terre

Un système de mise à la terre est défini comme 'une connexion conductrice intentionnelle ou non intentionnelle entre un circuit électrique ou un équipement doté d'une terre et un corps conducteur servant de terre'. Il constitue en outre un moyen de dérivation efficace des courants de défaut, des coups de foudre, des décharges électriques, des perturbations électromagnétiques et des interférences hautes fréquence. Cette protection a pour objectif d'assurer à l'utilisateur une mise à la terre garantissant toute sécurité à la l'intérieur de l'installation.

Conception et réalisation des systèmes de mise à la terre d'un poste

Les dispositions constructives des systèmes de mise à la terre doivent être appropriées à l'environnement de l'ouvrage et ceci pour garantir la sécurité des personnes et des biens et limiter le nombre de défauts dus aux amorçages en retour.

Les systèmes de mise à la terre peut être assurée soit par la nature même des matériaux constituant la fondation (par exemple : pieu battu lisse), soit par des aménagements appropriés (boucle de terre, piquet de terre...). Une liaison équipotentielle doit être réalisée entre la mise à la terre, les pieux et la virole ou l'armature métallique noyée dans le béton armé.

Plus généralement, et quelle que soit la configuration de la fondation d'un système de mise à la terre, il est nécessaire d'interconnecter tous les éléments métalliques enterrés.

D'autre part, les prises de terre doivent être dimensionnées, vis-à-vis de l'échauffement, de manière à éviter la diminution de leur résistance mécanique et la détérioration des matériaux

environnants. La taille du conducteur doit être déterminée à partir des valeurs de courants de défaut de la ligne en tenant compte de la structure du réseau à long terme. Les électrodes, étant en contact direct avec le sol, celles-ci doivent être constituées de matériaux capables de supporter la corrosion (attaque chimique ou biologique, oxydation, électrolyse,...) et les contraintes mécaniques. Ainsi, pour des sols à teneur élevée en chlorure, il y aura lieu d'utiliser des conducteurs en acier inoxydable spéciaux adaptés aux caractéristiques du sol.

Critères et contrainte à respecter

La conception des installations d'un système de mise à la terre doit répondre à 5 exigences : Résisté aux contraintes mécaniques et à la corrosion supporter, d'un point de vue thermique, le courant de défaut le plus élevé calculé, limiter les perturbations apportées aux installations

Électriques, assurer la sécurité des personnes vis-à-vis des tensions apparaissant sur l'installation de mise à la terre lors du défaut à la terre, assurer la fiabilité de la ligne vis-à-vis de la foudre.

Les paramètres à prendre en compte au départ pour le dimensionnement des installations des systèmes de mise à la terre sont :

- ✓ les caractéristiques du sol,
- ✓ la valeur du courant de défaut,
- ✓ la durée du défaut,
- ✓ la distance vis-à-vis des ouvrages tiers ou des personnes.
- ✓ Le facteur coût de réalisation sera également intégré au cours de l'étude pour comparer
- ✓ Différentes solutions possibles.

II.3. Configurations

La configuration d'un système de mise à la terre dépend de la nature de la structure connectée et de l'environnement.

Un système de mise à la terre peut être composé d'un ou plusieurs sous-systèmes qui ne sont pas nécessairement connectés directement mais sont mutuellement influencés par couplage électromagnétique. On représente ainsi en Fig.2.1 le cas d'un réseau de transport. Chaque système de mise à la terre est relié en un ou plusieurs points de connexion au réseau électrique.

Pour des systèmes de mise à la terre de faible étendue, comme c'est le cas pour les postes et les pylônes, on pourra parler de 'prise de terre' [1].

II.4 Réseau de transport et mise à la terre des pylônes et d'un poste.

II.4.1 Mise à la terre des postes

La mise à la terre des postes de transformation est cruciale, tout d'abord parce qu'ils constituent chacun un point clé du réseau sur lequel les incidents doivent rester exceptionnels,

et ensuite parce qu'ils sont munis d'équipements onéreux et fréquentés par des opérateurs dont il faut assurer la sécurité.

Une mise à la terre de poste classique est constituée d'une grille dont les dimensions (L et H sur la Fig. II .1) approchent la centaine de mètres et dont le maillage est resserré autour des installations [1].

De nombreux éléments du poste sont connectés à la grille de mise à la terre (portiques, transformateurs, bâtiments ...). Par exemple, sur la Fig. II .1, le poste dispose de \square points de connexion avec le reste du réseau. Cette configuration de type 'grille' permet de limiter les tensions de pas (liées au gradient de potentiel au sol) en maîtrisant la décroissance de potentiel autour de la structure (en 50Hz) et d'obtenir une valeur de résistance de terre R inférieure à 1Ω [1].

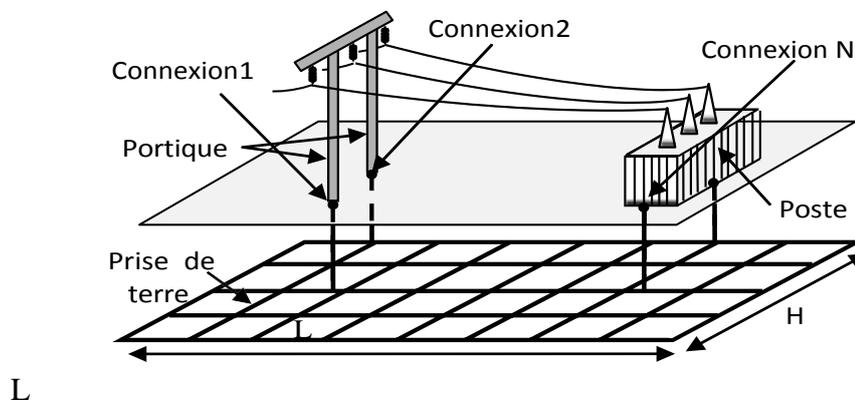


Fig II .1 Système de mise à la terre du poste [9]

II.4.2.Mise à la terre des pylônes

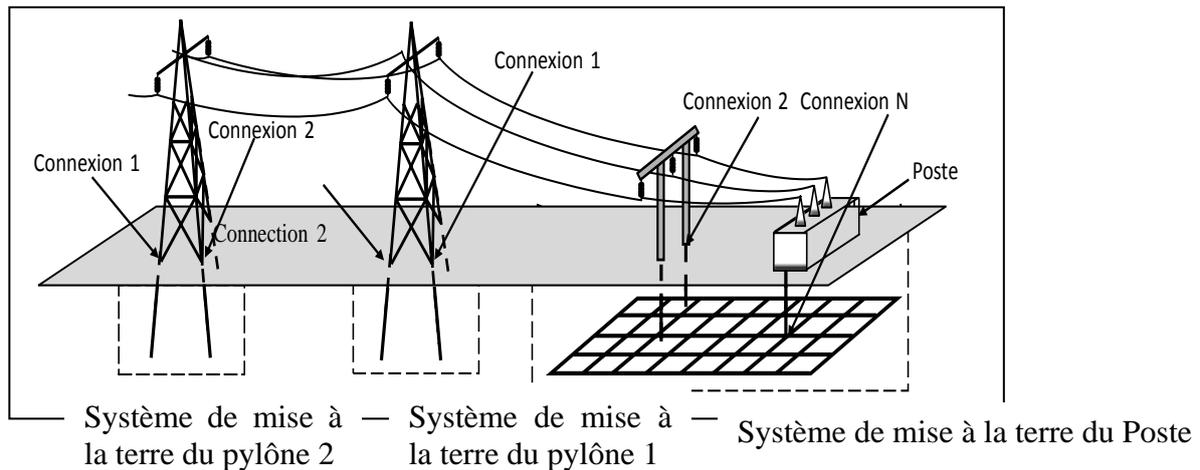
Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance [2].

II.4.3.Configurations des prises de terre des pylônes

La prise de terre d'un pylône est dimensionnée en fonction du type de ses fondations et de la valeur de la résistivité du sol, pour obtenir une résistance de terre \square à 50 Hz inférieure à 10Ω pour les niveaux de tension HT 220 kV.

Ces valeurs ont été choisies de manière à limiter le nombre de défaillances des ouvrages HT par amorçage en retour à un niveau globalement acceptable sur le réseau et à permettre un fonctionnement correct des protections de distance (détection des défauts).

En pratique, la résistivité du sol est mesurée avant la mise en place des pylônes. Si sa valeur est trop élevée pour permettre d'obtenir avec les boucles une résistance de terre inférieure à 10Ω , la prise de terre est complétée par des conducteurs enterrés horizontalement (antennes) ou verticalement (pieux).



FigII.2 prises de terre des pylônes [9]

▪ **Environnement : Sol et Fondations**

Le comportement d'un système de mise à la terre dépend beaucoup des caractéristiques électriques de son environnement immédiat, c'est-à-dire du sol et des fondations.

II.5.Nature du sol

La nature des sols du territoire algérien est très variée. Elle dépend de la position géographique. Pour connaître précisément de façon locale la topologie d'un terrain et la nature des différentes couches, on effectue des 'forages'. Pratiquement c'est difficile d'exploiter dans le domaine qui nous intéresse. Il existe de nombreux types de sol et les caractéristiques électriques correspondantes ne sont pas évidentes à déterminer.

De plus, pour des raisons financières, il n'est pas raisonnable d'envisager de réaliser un forage avant chaque installation d'un pylône ou poste. Pour le dimensionnement d'un système de mise à la terre, on se contente donc en pratique de mesurer localement les paramètres électriques du sol.

Le comportement électrique du sol est caractérisé par les trois grandeurs suivantes :

- Sa résistivité.
- Sa permittivité.
- Sa perméabilité.
- Résistivité.

Les propriétés de conduction de sol sont importantes, en particulier sa résistivité spécifique qui est l'un des principaux facteurs qui déterminent la résistance d'une électrode de terre. La résistivité électrique du sol, notée ρ , dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à plusieurs facteurs. Ces principaux facteurs sont :

Le type du sol (par exemple : l'argile, limon, grès et de granit) : la compaction du sol aura une incidence sur la résistivité car un sol meuble est moins conducteur par rapport à un sol compacté avec le même contenu.

La dimension des grains.

II.5.1 La porosité.

Le pourcentage d'eau contenu dans le sol : L'augmentation de l'humidité relative du sol de quelques pour cents à quelques dizaines de pour cents amène une réduction de la résistivité par un facteur de dix.

Le pourcentage d'acide et de bases : la présence de produits chimiques, est également importante d'un point de vue corrosif, ils peuvent augmenter la corrosion de l'électrode métallique.

La température : une augmentation de la température à 100° C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une diminution de la résistivité du sol. Par contre une diminution de la température au-dessous de 0°C, comme le cas des régions froides, la conductivité du sol diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

II.6 Mesure de terre de pylônes reliés par câble de garde :

Les lignes haute tension sont le plus souvent munies d'un câble de garde permettant d'écouler les courants de foudre à la terre à travers les pylônes.

Tous les pylônes étant reliés entre eux par ce conducteur, toutes les résistances de terre des pylônes sont en parallèle et la problématique est identique à celle vu ci-dessus pour les réseaux de terre multiples en parallèle.

En effet, l'utilisation de méthodes traditionnelles ne permet de mesurer que la terre globale de la ligne à haute tension soit la mise en parallèle de toutes les terres.

Le nombre de pylônes étant important, cette valeur globale mesurée peut être très faible alors que la mise à la terre de l'un d'entre eux est trop élevée. La mesure de la résistance d'un pylône est ainsi impossible par les méthodes traditionnelles, à moins d'isoler la terre à mesurer en déconnectant le câble de garde, ce qui s'avère dangereux

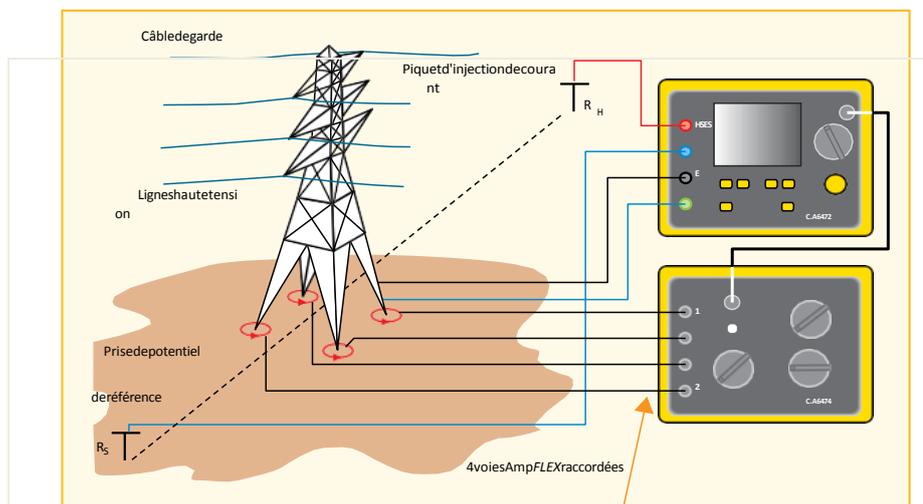


Fig II.3 Principe de mesure

Le C.A 6472, associé au C.A 6474, unité de traitement vectoriel, offre la possibilité de mesurer la résistance de terre d'un pylône même si celui-ci appartient à un réseau de terre en parallèle, en réalisant une mesure sélective du pylône considéré.

Le concept C.A 6472 + C.A 6474 combine deux principes de mesure

II.6.1 L'utilisation de 4 capteurs flexibles de courant

(AmpFLEX™) placés autour des pieds du pylône permet de mesurer exactement le courant circulant dans la terre du pylône considéré ; cette mesure sélective est basée sur le même principe qu'une mesure sélective avec pince ampère- métrique où la pince est remplacée par un AmpFLEX™.[11]

II.6.2 Une mesure à haute fréquence jusqu'à 5 kHz permet :

D'obtenir une valeur de Z équivalent (cf schéma) beaucoup plus grande que la valeur de résistance de terre à mesurer ; ainsi, le courant dévié par le câble de garde vers les autres pylônes devient négligeable et la valeur du courant circulant par la terre devient plus important ; ceci permet d'augmenter considérablement la précision de mesure.

de réaliser un balayage en fréquence de 41 Hz à 5 kHz pour étudier le comportement de la mise à la terre en fonction de la fréquence et prévoir son comportement en cas de foudre. [10]

II.6.3 Résistance des piquets auxiliaires H et S:

Une valeur de résistance de piquets élevée influence la précision de la mesure. En effet, si les piquets auxiliaires H et S ont une résistance très élevée à cause d'un sol très résistif (terrain rocheux par exemple), le courant de mesure devient extrêmement faible et peut dans certains cas ne plus être suffisant pour réaliser la mesure de terre.

Les contrôleurs de terre Chauvin-Arnoux de la gamme

C.A 647X permettent de mesurer la valeur des piquets auxiliaires et permettent donc de connaître celui qui possède une valeur trop élevée. Cette mesure permet de gagner un temps précieux sur le terrain puisque le piquet auxiliaire en défaut est identifié et évite des allers retours inutiles entre les différents piquets.

Il est possible de remédier à ce problème de résistance de piquet trop élevée en ajoutant des piquets en parallèle, en enfonçant davantage les piquets, et/ou en humidifiant le sol. De plus, tous les contrôleurs de terre n'acceptent pas la même valeur maximale de résistances de piquets auxiliaires, ce qui fait la différence entre un contrôleur de terre basique ou plus expert. [10]

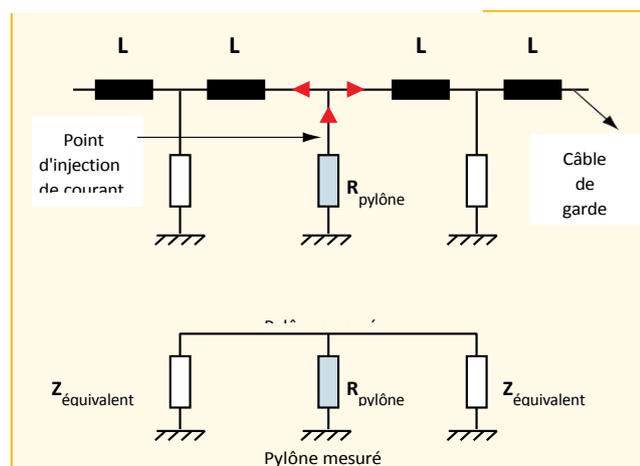


Fig II.4 Schéma équivalent d'une ligne à haute tension

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités des différents types de sol :

Nature du sol	Résistivité en $\Omega.m$
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000
Granits et grès très altérés	100 à 600

Tableau II.1 sur les résistivités des différents types de sol [11]

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène. Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre, la structure, ...

II.7 Tension de pas

Comme représenté à la figure ci-dessous, la tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance de un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum.

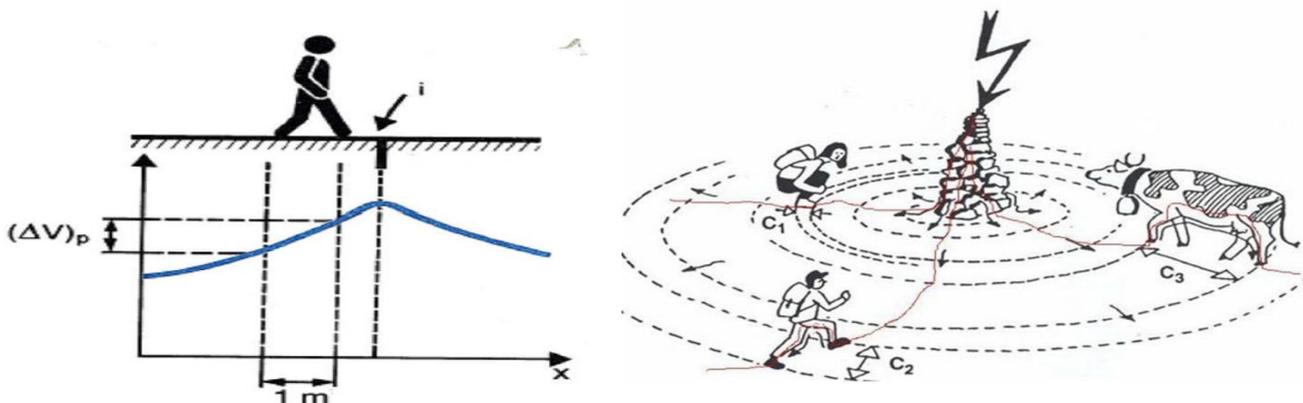


Fig II.5 Tension de pas

Dans un sol supposé homogène, la tension de pas est directement proportionnelle à la résistivité du sol. En général, elle dépend de la distribution de potentiel dans le sol.

À une distance de l'impact d'un courant de foudre au sol, en considérant un sol homogène de résistivité ρ et une répartition purement résistive de potentiel, elle est donnée par la relation :

$$U_p = \rho \frac{I}{2\pi(d+1)d} \dots\dots\dots (II.1)$$

Dans ce cas, pour un courant de foudre de valeur de crête 50 kA par exemple, la tension de pas à une distance de 30 m du lieu d'impact est de :

- $U_p = 855.67$ V pour $\rho = 100\Omega.m$ (Algérie par exemple) et
- $U_p = 25.67$ Kv pour $\rho = 3000\Omega.m$ (Annaba par exemple),
Sid = 30 m.

La courbe de la figure donne la tension de pas en fonction de la distance pour une résistivité typique de 100 $\Omega.m$. [8]

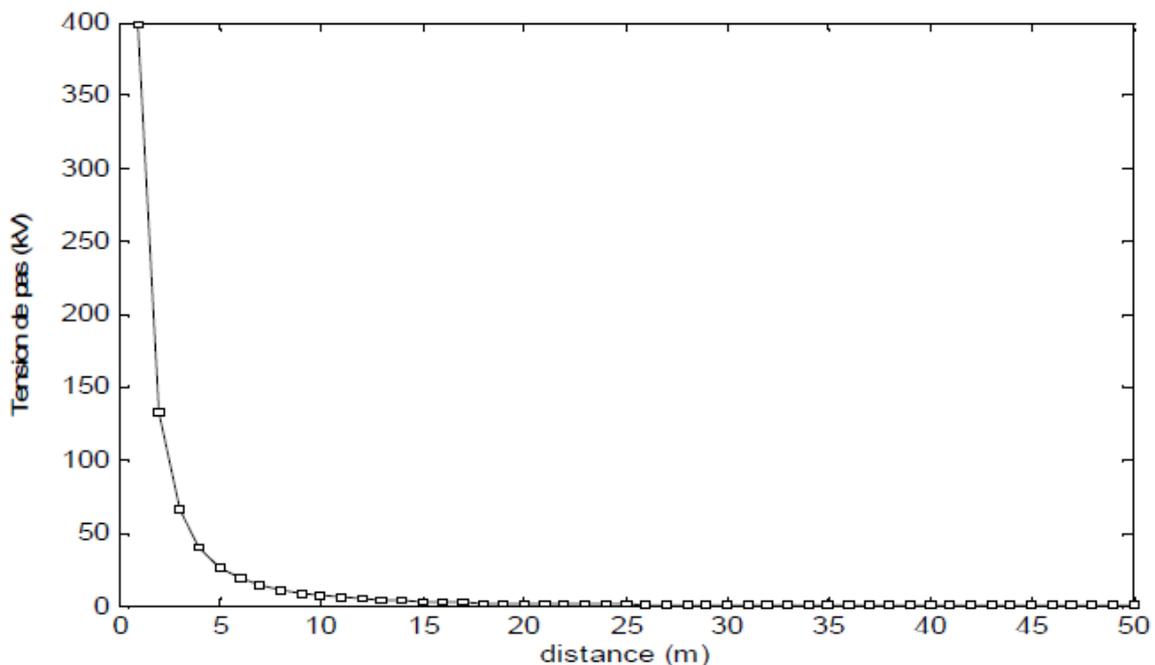


Fig II.6 de diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point.

La figure ci-dessus qualifie bien la diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point d'écoulement du courant à la terre. Dans notre cas, la tension de pas qui valait 398 kV à 1 m du point d'impact, tombe à 856 V à une distance de 30 m et à 312 V à 50 m. En rapport avec la norme CEI 60479-1 de la Commission Électrotechnique Internationale [Commission Électrotechnique Internationale (CEI), 2005], cette tension cessera d'être dangereuse pour un être humain à 126 m du point d'impact. Tandis que pour une résistivité de 3000 $\Omega.m$, cette distance sera de 690 m, dans un sol sec. [8]

II.8 Conclusion :

Le concept de mise à la terre implique plusieurs champs de recherche. Le fonctionnement des installations électriques dépend étroitement de la manière dont certains dispositifs sont mis à la terre et des valeurs des paramètres des mises à la terre (résistance, inductance, capacité,...).

Le paramètre le plus important dans l'analyse des mises à la terre en fréquence industrielle est la résistance qui doit être la plus faible possible, pour assurer la sécurité des personnes et du matériel.

Les normes présentées de ce chapitre imposent ces valeurs. La valeur de la résistance de mise à la terre dépend de la nature du sol (résistivité) et de la forme (géométrie) des électrodes de terre.

Chapitre III :

Les régimes de neutre

III. Introduction

Dans tout système triphasé haut ou basse tension existent trois tensions simples, mesurées entre chacune des phases et un point commun appelé "point neutre". En régime équilibré ces trois tensions sont déphasées de 120° et ont pour valeur :

$$U\sqrt{3}$$

U étant la tension composée mesurée entre phases (voir fig. III-1).

Physiquement, le neutre est le point commun de trois enroulements montés en étoile. Il peut être sorti ou non, distribué ou non. En moyenne tension, la distribution du neutre est exceptionnelle en Algérie (1) ; par contre, elle est très fréquente aux U.S.A. En basse tension, la distribution du neutre est utilisée dans tous les pays.

Dans une installation haute ou basse tension, le neutre peut ou non être relié à la terre. On parle alors de **régime du neutre**.

La connexion du neutre à la terre peut être réalisée directement, ou par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une réactance. Dans le premier cas, on dit que l'on a un neutre direct à la terre et dans le second cas, que le neutre est impédant.

Lorsqu'il n'existe aucune liaison intentionnelle entre le point neutre et la terre, on dit que le neutre est isolé.

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Lors d'un défaut d'isolement, ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre, les valeurs prises par les courants de défaut, les tensions de contact et les surtensions sont étroitement liées au mode de raccordement du neutre à la terre.

Un neutre direct à la terre contribue à limiter les surtensions ; par contre, il engendre des courants de défaut très importants. Au contraire, un neutre isolé limite les courants de défaut à des valeurs très faibles, mais favorise l'apparition de surtensions élevées.

Dans toute installation, la continuité de service en présence d'un défaut d'isolement est également liée au régime du neutre. Un neutre isolé permet la continuité de service en basse tension et même en haute tension, sous réserve de respecter le décret sur la protection des travailleurs. Un neutre direct à la terre, ou faiblement impédant, impose au contraire un déclenchement dès l'apparition du premier défaut d'isolement.

L'importance des dommages que subissent certains équipements tels que les moteurs et les alternateurs présentant un défaut d'isolement interne, est également liée au régime du neutre.

Dans un réseau à neutre direct à la terre, une machine affectée d'un défaut d'isolement est fortement endommagée en raison de la valeur élevée des courants de défaut.

Dans un réseau à neutre isolé ou fortement impédant, les dommages sont au contraire réduits, mais il est nécessaire que les équipements aient un niveau d'isolement compatible avec le niveau des surtensions pouvant se développer dans ce type de réseau.

Le régime du neutre a également une influence importante sur la nature et le niveau des perturbations électromagnétiques générées dans une installation électrique. Les schémas

favorisant des courants de défaut élevés et leur circulation dans les structures métalliques des bâtiments sont très perturbateurs. Au contraire, les schémas qui tendent à réduire ces courants et qui garantissent une bonne équipotentialité des masses sont peu perturbateurs. Le choix du régime du neutre, tant en basse tension qu'en haute tension, dépend à la fois de la nature de l'installation et de celle du réseau. Il est également influencé par la nature des récepteurs, la recherche de la continuité de service et la limitation du niveau de perturbation imposé aux équipements sensibles. [12]

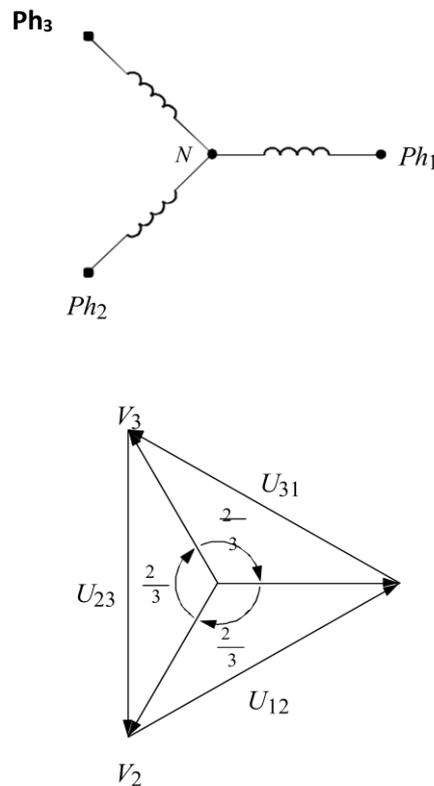


Figure III-1 : schéma triphasé

V_i : tension phase-neutre

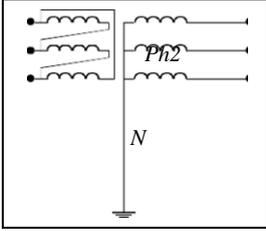
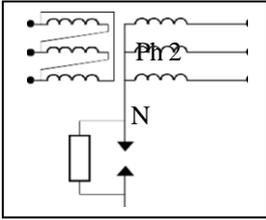
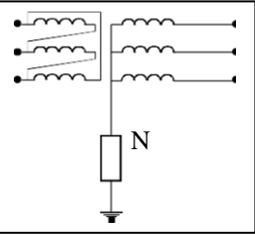
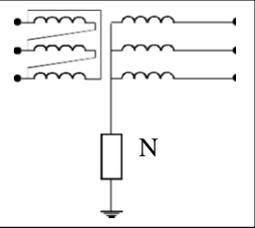
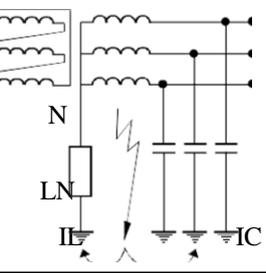
U_{ij} : tension entre phase

III.1 Les différents régimes de neutre

Les différents modes de raccordement du point neutre à la terre sont indiqués sur le tableau II-1.

On distingue :

- le neutre directement mis à la terre
- le neutre isolé, ou fortement impédant
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance
- le neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une réactance accordée (bobine de Petersen). [14]

<p>Neutre mis directement à la terre</p> <p>Une liaison électrique est réalisée intentionnellement entre le point neutre et la terre.</p>	 <p>Ph1 Ph2 Ph3 N</p>
<p>Neutre isolé</p> <p>Il n'existe aucune liaison électrique entre le point neutre et la terre, à l'exception des appareils de mesure ou de protection.</p> <p>Neutre fortement impédant</p> <p>Une impédance de valeur élevée est intercalée entre le point neutre et la terre.</p>	 <p>Ph 1 Ph 2 Ph 3 N ZN</p>
<p>Neutre mis à la terre par résistance</p> <p>Une résistance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p>	 <p>Ph 1 Ph 2 Ph 3 N RN</p>
<p>Neutre mis à la terre par réactance</p> <p>Une réactance est intercalée volontairement entre le point neutre et la terre</p> <p>LN</p>	 <p>Ph 1 Ph 2 Ph 3 N LN</p>
<p>Neutre mis à la terre par bobine d'extinction de Petersen</p> <p>$I_f = I_L + I_C = 0$</p> <p>Une réactance accordée sur les capacités du réseau est volontairement intercalée entre le</p> <p>point neutre et la terre de sorte qu'en présence d'un défaut à la terre, le courant dans le défaut est nul.</p> <p>$I_f = I_L + I_C = 0$</p> <p>I_f : courant de défaut</p>	 <p>Ph 1 Ph 2 Ph 3 N LN IC I_f</p>

IL : courant dans la réactance de mise à la terre du neutre
 IC : courant dans les capacités phase-terre

Tableau III-1 : modes de raccordement du point neutre [14]

III.2 Influence du régime du neutre

III.2.1 Résistances d'isolement et capacités par rapport à la terre

En basse tension, comme en haute tension, un réseau présente toujours une résistance de fuite entre chacune de ses phases et la terre. En basse tension, pour une tension inférieure à 500 volts, on admet qu'un réseau est correctement isolé quand les résistances de fuite des phases par rapport à la terre (R_1 , R_2 , R_3) sont au moins égales à 500 kW (norme C15-100 -§ 6.12.3 - tableau 61A).

Sur un réseau correctement isolé, on admet toujours que :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

En plus des résistances de fuite, il convient de tenir compte de la capacité que présente chaque phase par rapport à la terre. Soient C_1 , C_2 , C_3 , ces capacités ; on admet toujours

$C_1 = C_2 = C_3 = C$. La valeur de C est proportionnelle à la longueur des câbles constituant le réseau.

En basse tension, C est de l'ordre de 0,25 μF par kilomètre de câble.

Lorsque le réseau alimente des récepteurs équipés de filtres d'entrée branchés entre phase et terre, il y a lieu de prendre en compte la capacité de ces filtres qui contribuent largement à la génération des courants capacitifs, c'est notamment le cas des équipements informatiques.

En haute tension, la valeur de ces capacités dépend de la nature des câbles employés et de celle des isolants entrant dans leur composition.

Dans les câbles à champ radial, chaque conducteur est entouré d'un écran (voir fig. III-2-a). Les capacités à prendre en compte sont celles mesurées entre chaque conducteur et son écran mis à la terre.[13]

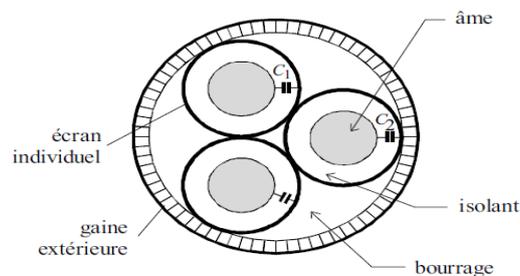


Figure III-2-a : câble à champ radial [13]

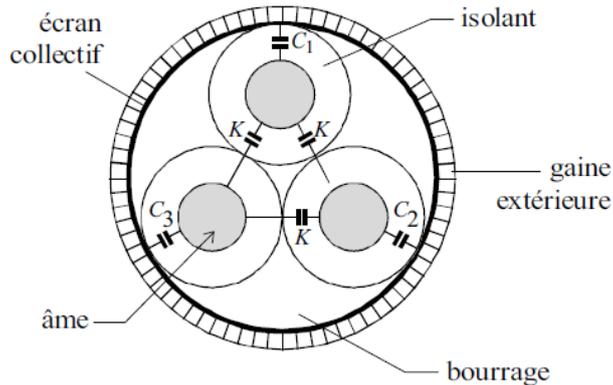


Figure III-2-b: câble à champ [13]

Pour les câbles à ceinture, un écran unique entoure les trois conducteurs (voir fig. III-2-b) ; il existe une capacité K entre les conducteurs pris deux à deux et une capacité C entre chaque conducteur et l'écran mis à la terre. Ce sont les capacités C , mesurées entre chaque conducteur et l'écran, qu'il y a lieu de prendre en considération. Pour ce type de câble, les constructeurs disposent généralement de la capacité C_0 mesurée entre l'écran et les trois âmes conductrices réunies entre elles. La valeur de la capacité existant entre chaque conducteur et l'écran est égale à $\frac{C_0}{3}$.

A titre indicatif, on pourra retenir les valeurs suivantes des capacités phase-terre des câbles.

o tension 5,5 kV			o tension 10 kV			o tension 20 kV		
câble	35 mm ²	0,29 µF/km	câble	35 mm ²	0,21 µF/km	câble	70 mm ²	0,17 µF/km
câble	70 mm ²	0,35 µF/km	câble	70 mm ²	0,26 µF/km	câble	120 mm ²	0,20 µF/km
Câble	120 mm ²	0,44 µF/km	câble	120 mm ²	0,44 µF/km	câble	240 mm ²	0,26 µF/km
Câble	240 mm ²	0,58 µF/km	Câble	240 mm ²	0,58 µF/km			

Tab III1câble à champ radial HT isolé à l'EPR [13]

o tension 5,5 Kv			o tension 10 kV			o tension 20 kV		
câble	35 mm ²	0,27 µF/km	câble	35 mm ²	0,17 µF/km	câble	70 mm ²	0,14 µF/km
câble	70 mm ²	0,34 µF/km	câble	70 mm ²	0,21 µF/km	câble	120 mm ²	0,17 µF/km
câble	120 mm ²	0,42 µF/km	câble	120 mm ²	0,26 µF/km	câble	240 mm ²	0,21 µF/km
câble	240 mm ²	0,54 µF/km	câble	240 mm ²	0,34 µF/km			

tab III2 câble à champ radial HT isolé au PE [13]

o tension 3,2 kV			o tension 6 kV		
câble	10 mm ²	0,16 µF/km	câble	16 mm ²	0,14 µF/km
câble	25 mm ²	0,18 µF/km	câble	50 mm ²	0,21 µF/km
câble	35 mm ²	0,17 µF/km	câble	95 mm ²	0,30 µF/km

tab III3 câbles à ceinture HT isolés au PVC [13]

câbles basse tension isolés au PVC

cable 16 mm ²	0,2 μF/km
cable 35 mm ²	0,16 μF/km

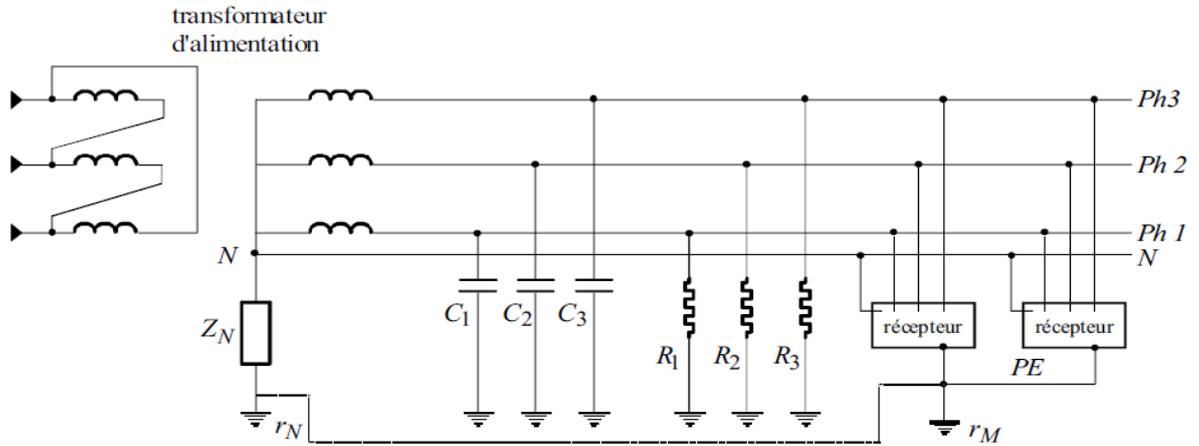


Figure III-3 : schéma équivalent d'un réseau [20]

PE : conducteur de protection

C_1, C_2, C_3 : capacités des conducteurs de phase par rapport à la terre

R_1, R_2, R_3 : résistances d'isolement, leur influence est toujours négligeable

Z_N : impédance de mise à la terre du neutre

r_N : résistance de la prise de terre du neutre

r_M : résistance de la prise de terre des masses

N : neutre

III.2.2 Prise de terre et résistance de terre

Lorsque le neutre d'un réseau est mis à la terre, que ce soit directement ou par l'intermédiaire d'une impédance, il est relié à une prise de terre, appelée prise de terre du neutre, présentant une résistance r_N non nulle.

Dans toute installation électrique, basse ou haute tension, les masses métalliques des récepteurs sont généralement interconnectées. L'interconnexion peut être totale ou réalisée par groupes de récepteurs. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre de valeur r_M . Il est également possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées individuellement à la terre. Les prises de terre des masses et du neutre peuvent ou non être interconnectées et sont parfois communes. Le conducteur d'interconnexion des masses est appelé conducteur de protection et est noté PE ou PEN .

Un réseau basse ou haute tension est donc toujours caractérisé par :

- une résistance d'isolement R
- une capacité C entre chaque phase et la terre
- une prise de terre du neutre de valeur r_N
- une ou plusieurs prises de terre des masses de valeur r_M .

III-3 Régime du neutre et courant de défaut

Considérons un réseau triphasé basse ou haute tension (voir fig. 1-5). Le neutre peut être ou non mis à la terre. Le régime du neutre dépend de la valeur et de la nature de l'impédance Z_N .

Si Z_N est nulle, le neutre est directement mis à la terre.

Si Z_N est de valeur très élevée, le neutre est isolé ou fortement impédant.

Si Z_N est différent de zéro, mais de faible valeur (de quelques dizaines à quelques centaines d'ohms en haute tension, suivant le niveau de tension et la nature du réseau), le réseau est dit à neutre impédant. L'impédance Z_N peut être une résistance ou une réactance.

En l'absence de défaut, des courants circulent dans les résistances et les capacités de fuite du réseau. Ces courants étant équilibrés, aucun ne circule dans l'impédance Z_N et le point neutre est au potentiel de la terre :

$$V_N = -Z_N I_N = 0$$

Lorsqu'une phase est mise en contact avec la terre, un courant I_f s'établit entre la phase en défaut et la terre, et se referme par l'impédance Z_N ainsi que par les capacités et résistances de fuite des phases saines

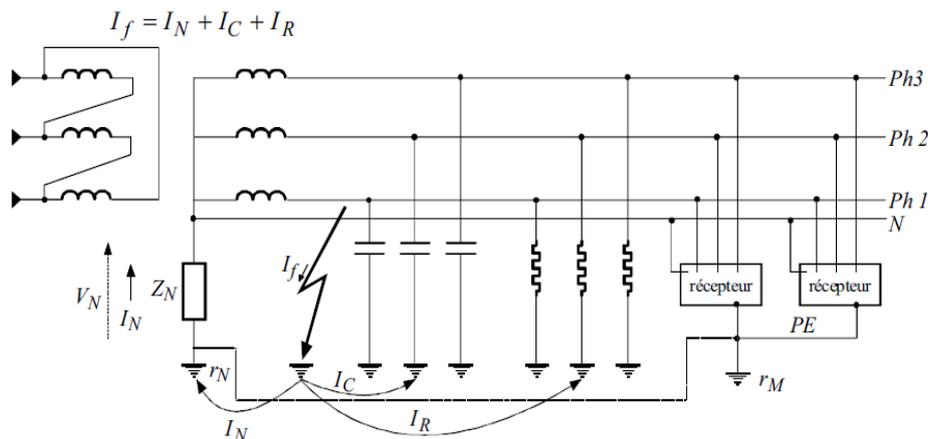


Figure III-4 : montée en potentiel du point neutre [20]

I_f : courant de défaut

I_N : courant se refermant par l'impédance de mise à la terre du neutre

I_C : courant se refermant par les capacités phase-terre du réseau

I_R : courant se refermant par les résistances d'isolement du réseau, ce courant est toujours négligeable

V_N : montée en potentiel du point neutre

Z_N : impédance de mise à la terre du neutre

$$V_N = -Z_N I_N$$

Le courant de fuite I_R , toujours très faible, peut être négligé.

Si le neutre est mis directement à la terre, le courant I_N est très important et le courant I_C peut également être négligé :

- si le neutre est isolé, on a :

$$I_f = I_C$$

- si le neutre est impédant, on a :

$$I_f = I_N + I_C$$

La figure 1-5 donne les répartitions des courants dans le cas général.

Le tableau 1-2 donne les valeurs des courants dans le cas d'un défaut franc (résistance du défaut = 0).

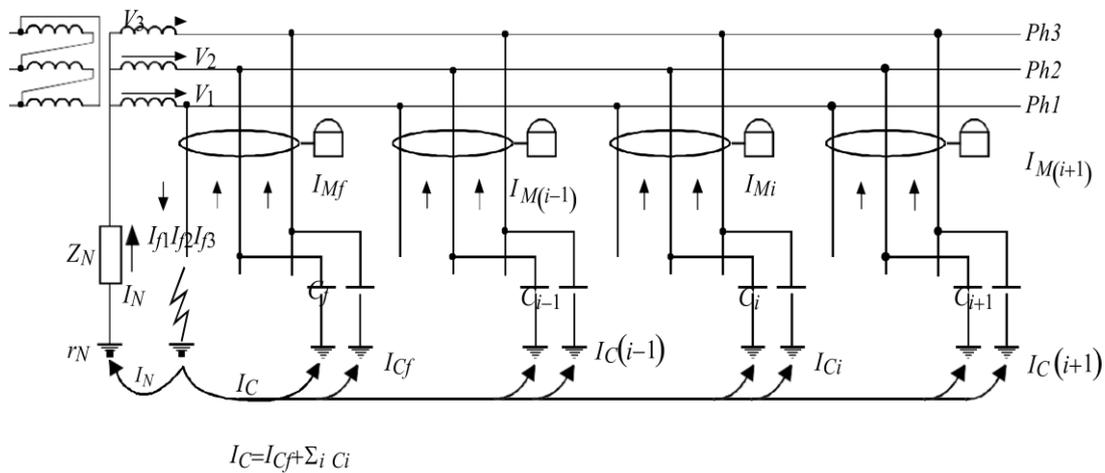
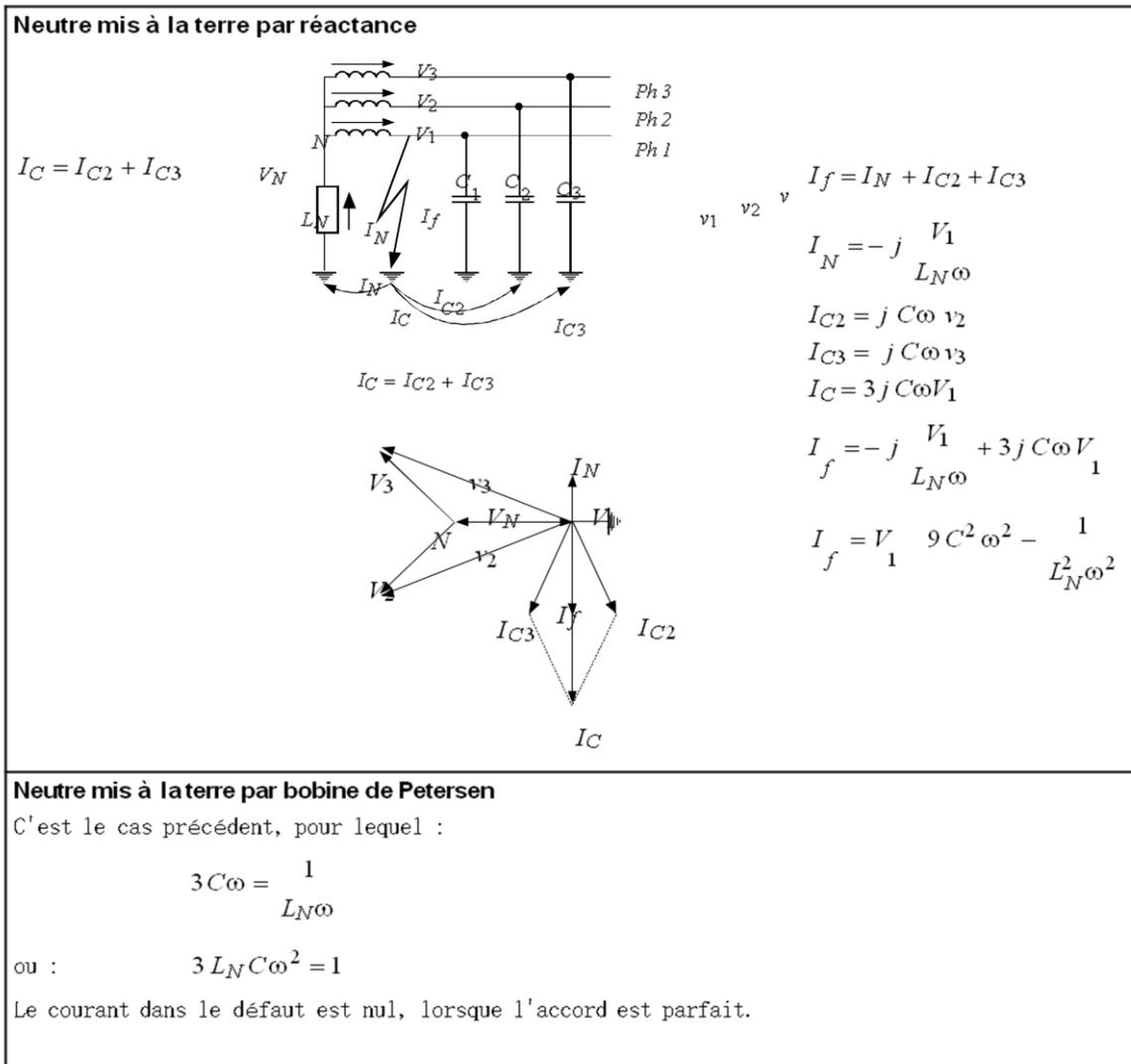


Figure III-5 : répartition des courants lors d'un défaut phase-terre [20]

$$I_C = I_{Cf} + \sum i C_i$$

- I_f : courant circulant dans le défaut
- I_N : courant circulant dans l'impédance de mise à la terre du neutre
- I_C : courant capacitif se refermant par les capacités phase-terre du réseau
- I_{Cf} : courant capacitif se refermant par les phases saines du départ en défaut
- I_{Ci} : courant capacitif se refermant par les phases saines des départs sains
- I_{Mf} : courant résiduel mesuré sur le départ en défaut
- I_{Mi} : courants résiduels mesurés sur les départs sains
- V_1, V_2, V_3 : tensions simples du réseau



Tab III-4 : Diagrammes vectoriels dans le cas d'un défaut franc à la terre [22]

III.4 Tension de contact - tension limite non dangereuse

Toute personne entrant en contact avec une pièce sous tension est soumise à une différence de potentiel : il y a donc pour elle un risque d'électrisation (on entend par électrisation, le fait de recevoir un choc électrique n'entraînant pas la mort). On distingue deux sortes de contacts : le contact direct et le contact indirect.[27]

III.4.1 Contact direct

C'est le contact d'une personne avec une partie active d'un matériel sous tension. Le contact peut avoir lieu avec une phase ou avec le neutre (voir fig. III-6-a). [20,27]

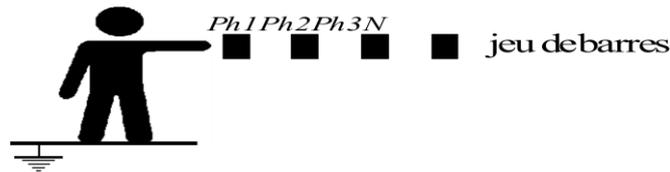


Fig III.6.a contact direct [27]

III.4.2 Contact indirect

C'est le contact d'une personne avec une masse d'un récepteur mise accidentellement sous tension à la suite d'un défaut d'isolement (voir fig. III-6-b). [20,27]

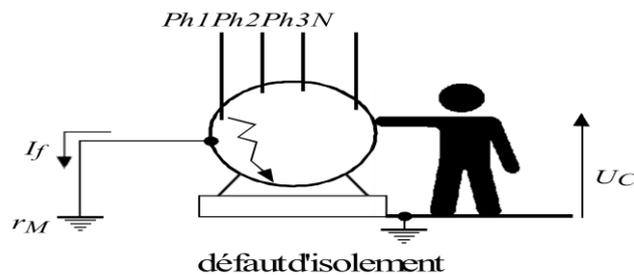


Fig III.6.b contact indirect [27]

On a $U_C = r_M I_f$ car l'impédance de corps humain est très élevée devant r_M .

U_C : tension de contact

I_f : courant de défaut

r_M : résistance de la prise de terre

Contrairement à une idée très répandue, le risque pour les personnes n'est pas lié uniquement à la valeur de la tension appliquée au corps humain, mais aussi à celle du courant susceptible de le traverser et à la durée du contact. Le courant et la tension sont liés par la loi d'Ohm $I = U / R$ où R est l'impédance du corps humain.

Cette impédance varie en fonction de la tension de contact, de l'état et de l'humidité de la peau, ainsi que du trajet du courant à l'intérieur du corps humain.

La publication CEI 479 indique les valeurs de l'impédance du corps humain en fonction de la tension de contact à laquelle il est soumis (voir fig. III-7-a).

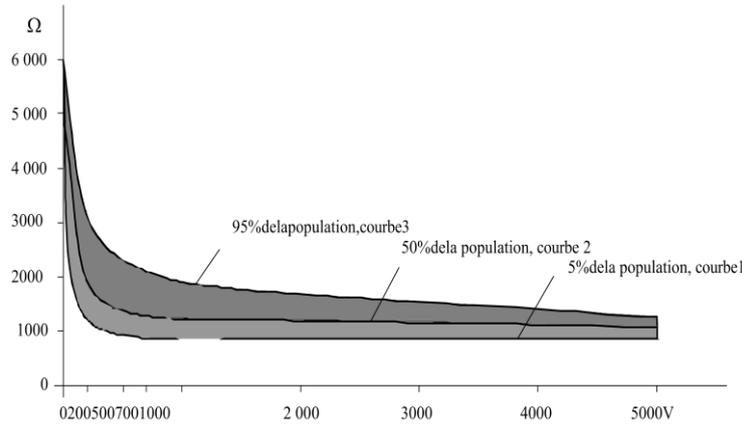


Figure III-7-a : Valeurs statistiques des impédances totales du corps humain valables pour un trajet courant main à main ou main à pied [16]

Tension de contact UT

5 % de la population signifie que 5 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 1. 50 % de la population signifie que 50 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 2. 95 % de la population signifie que 95 % des personnes ont une impédance inférieure à la courbe 3.

Cette même publication indique également les effets du courant électrique sur les personnes en fonction de sa valeur et de sa durée. Ces effets sont matérialisés sur la figure -7-b pour le courant alternatif à 50 ou 60 Hz.

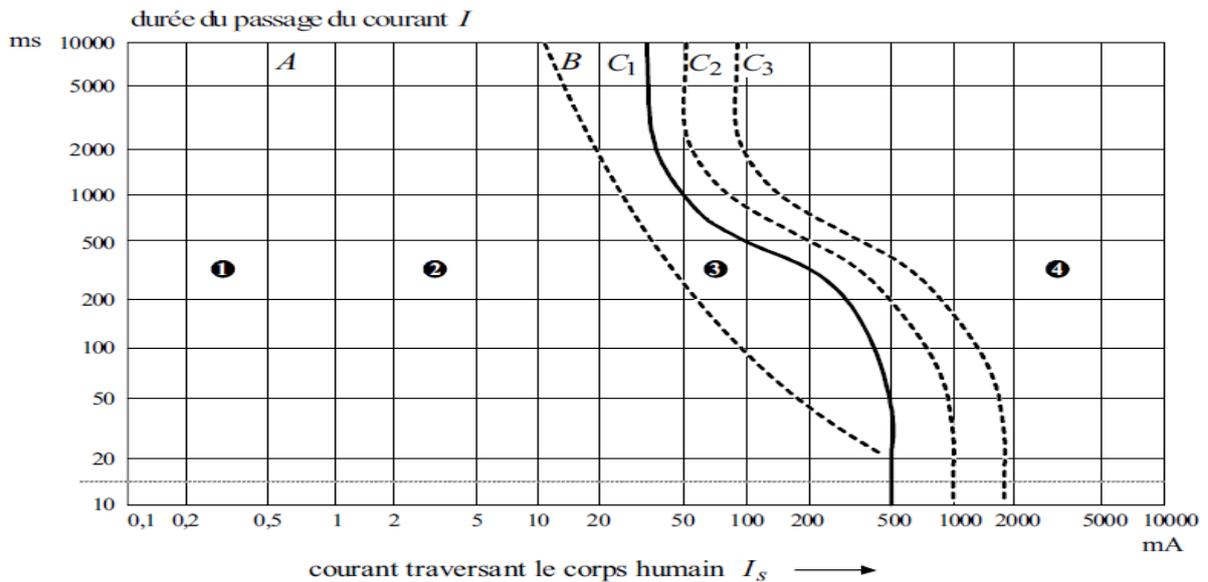


Figure III7-b : Effets du courant électrique 50/60 Hz

1. non perception
2. perception
3. effets réversibles - crispation musculaire
4. possibilité d'effets irréversibles, danger de mort

La courbe C1 définit la limite d'exposition temps-courant à un choc électrique, à ne pas franchir.

C'est sur ces données que l'on a établi les tableaux 2-3-a et 2-3-b fixant les temps théoriques maximum de coupure de l'alimentation en fonction de la tension de contact présumée, à laquelle est soumise une personne. Ils ont été construits à partir des graphiques III7-a et III7-b et en tenant compte d'une résistance additionnelle matérialisant le port de chaussures et le contact avec le sol. Ils permettent de définir, suivant la nature des locaux, les tensions limites conventionnelles U_L qui peuvent être maintenues sans danger pour les personnes : autrement dit, une tension de contact inférieure à U_L ne nécessite pas de coupure, par contre, toute tension de contact supérieure à U_L nécessite l'élimination du défaut dans un Temps au plus égal à celui fixé par les tableaux Les tensions limites conventionnelles ont été fixées à 50 V pour les locaux secs et à 25 V pour les locaux humides.

Les temps de coupure à utiliser dans la pratique et les protections à mettre en œuvre pour la coupure de l'alimentation dépendent des schémas des liaisons à la terre (TT , TN , IT).

La tension de contact présumée dans les locaux secs ($U_L = 50$ V)

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 III5-a : durée maximale de maintien Temps théoriques de coupure en fonction de la tension de contact présumée

Tension de contact présumée (V)	Temps de coupure maximal du dispositif de protection (s)	
	courant alternatif	courant continu
25	5	5
50	0,48	5
75	0,30	2
90	0,25	0,80
110	0,18	0,50
150	0,12	0,25
230	0,05	0,06
280	0,02	0,02

Tableau III5-b : durée maximale de maintien de la tension de contact présumée dans les locaux humides à ($U_L = 25$ V)

III.5 Régimes de neutre et schémas des liaisons à la terre utilisés en basse tension

En basse tension, les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre sont régis par les normes CEI 364 et NFC 15-100. Trois schémas sont pris en considération. Chaque schéma est défini par deux lettres.

La première lettre définit la situation du point neutre par rapport à la terre.

T : liaison directe du point neutre à la terre

I : point neutre, soit isolé de la terre, soit relié à la terre par une impédance de valeur élevée.

La deuxième lettre définit le mode de raccordement des masses de l'installation électrique :

T : les masses sont interconnectées et reliées directement à la terre, indépendamment de la mise à la terre éventuelle du point neutre

N : les masses sont reliées directement au conducteur neutre.

III.5.1 Neutre isolé ou impédant (Schéma IT)

Le neutre est isolé ou relié à la terre par une impédance de valeur élevée (première lettre I). Une impédance de 1 700 Ω est fréquemment employée.

Les masses des récepteurs sont interconnectées soit totalement, soit par groupes. Chaque groupe interconnecté est relié à une prise de terre (deuxième lettre T). Il est possible qu'une ou plusieurs masses soient reliées séparément à la terre.

Dans la mesure du possible, il est recommandé d'interconnecter toutes les masses d'une même installation et de les relier à la même prise de terre. Il est toutefois admis que des masses très éloignées les unes des autres, ou situées dans des bâtiments différents, ne le soient pas. Dans ce cas, chaque groupe de masses reliées à la même prise de terre, et chaque masse reliée individuellement à la terre doivent être protégés par un dispositif différentiel à courant résiduel.

Les prises de terre des masses et du neutre peuvent être ou non interconnectées ou confondues.

Il n'est pas avantageux de distribuer le neutre qui entraîne une limitation des longueurs maximales des canalisations

L'installation d'un limiteur de surtensions entre le point neutre du transformateur HT/BT et la terre est obligatoire. Si le neutre n'est pas accessible, le limiteur de surtension est installé entre une phase et la terre. Il protège le réseau basse tension contre les élévations de tension résultant d'un amorçage entre les enroulements haute tension et basse tension du transformateur. [20]

Le terme schémas des liaisons à la terre tend à se généraliser

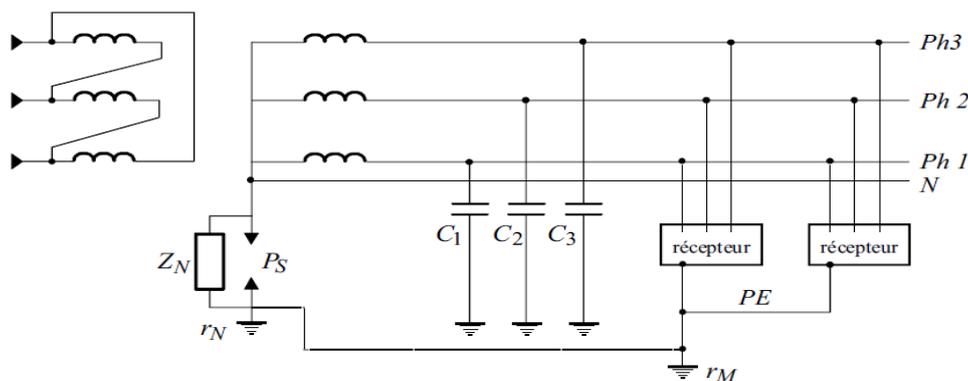


Figure III-8 : Neutre isolé ou impédant (schéma IT) en basse tension

III.5.2 Neutre mis directement à la terre (Schéma TT)

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre T).

Les masses des récepteurs sont interconnectées, soit toutes ensemble, soit par groupes, soit individuellement et sont reliées à la terre (deuxième lettre T). La protection est assurée au moyen de dispositifs différentiels résiduels. Toutes les masses protégées par le même dispositif de protection doivent être reliées à la mise prise de terre.

La prise de terre du neutre et celle des masses peuvent ou non être interconnectées ou confondues. Le neutre peut être distribué ou non. [20]

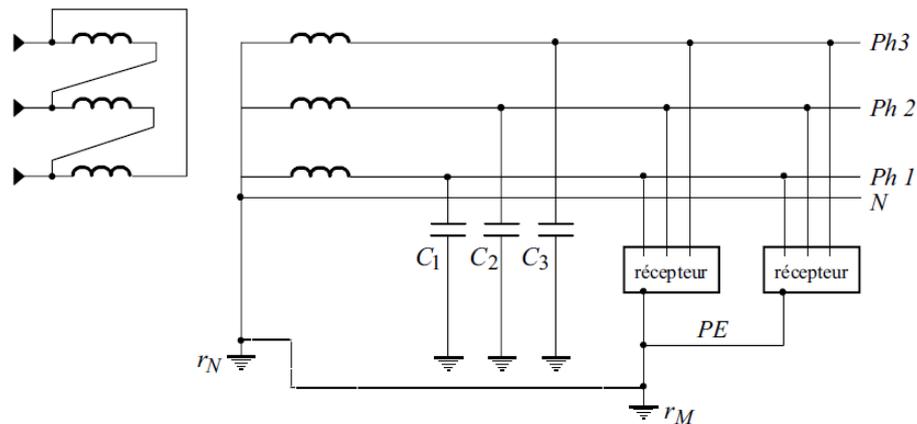


Figure III -9 : Neutre mis directement à la terre (schéma TT) en basse tension

III.5.3 Mise au neutre (Schéma TN)

Le point neutre est relié directement à la terre (première lettre *T*).

Les masses des récepteurs sont reliées au conducteur neutre (deuxième lettre *N*).

On distingue deux schémas possibles suivant que le conducteur neutre (*N*) et le conducteur de protection (*PE*) sont confondus ou non.

III.5.3.1 Premier cas

Les conducteurs de neutre et de protection sont confondus en un seul conducteur appelé *PEN*.

Le schéma est identifié par une troisième lettre *C* et est noté *TNC* (voir fig. III-10) :

- il est recommandé de relier le *PEN* régulièrement à la terre afin de limiter son niveau de potentiel par rapport au sol (voir § 2.3.2.6.)

ce schéma est interdit pour les sections inférieures à 10 mm² cuivre et 16 mm² aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est également interdit en aval d'un schéma *TNS* (norme C 15-100, § 4.6.2.). [20]

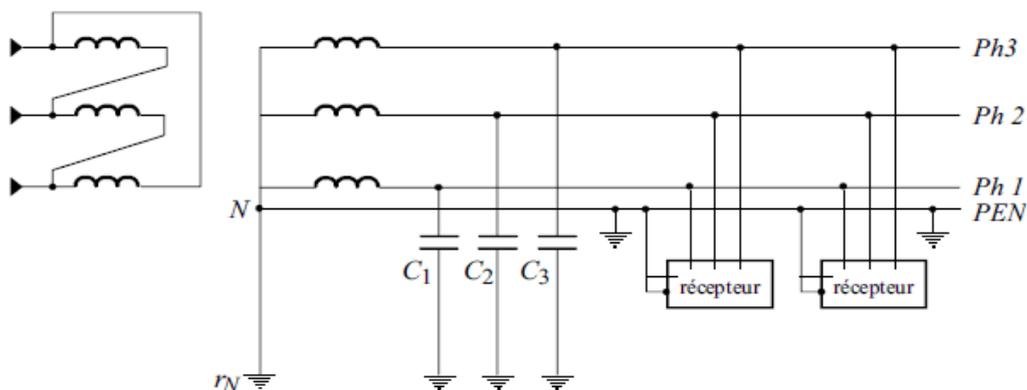


Figure III-10 : schéma TNC

III.5.3.2 Deuxième cas

Le conducteur de neutre et le conducteur de protection sont séparés. Le schéma est alors identifié par la troisième lettre S et est noté *TNS* (voir fig. III-11).

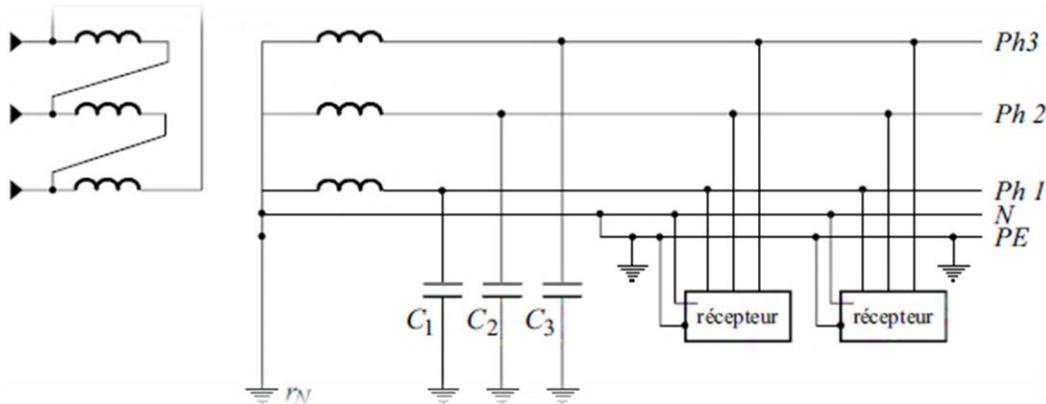


Figure III-11 : schéma TNS

Des prises de terre doivent être réparties uniformément le long du conducteur de protection.

En *TN*, ce schéma est obligatoire pour des sections inférieures à 10 mm² cuivre ou 16 mm² aluminium, ainsi que pour les canalisations mobiles. Il est interdit en amont d'un schéma *TNC*. [20]

Nota :

les deux schémas *TNC* et *TNS* peuvent être utilisés dans une même installation. Mais le schéma *TNC* (4 fils) ne doit jamais être en aval du schéma *TNS* (5 fils) (voir fig. III-12).

Comme précisé précédemment, la mise au neutre nécessite la création d'un système équipotentiel pour éviter la montée en potentiel des masses et des éléments conducteurs lors des défauts phase-terre. Il est, par conséquent, nécessaire de relier le conducteur PEN à de nombreuses prise de terre réparties dans l'installation.

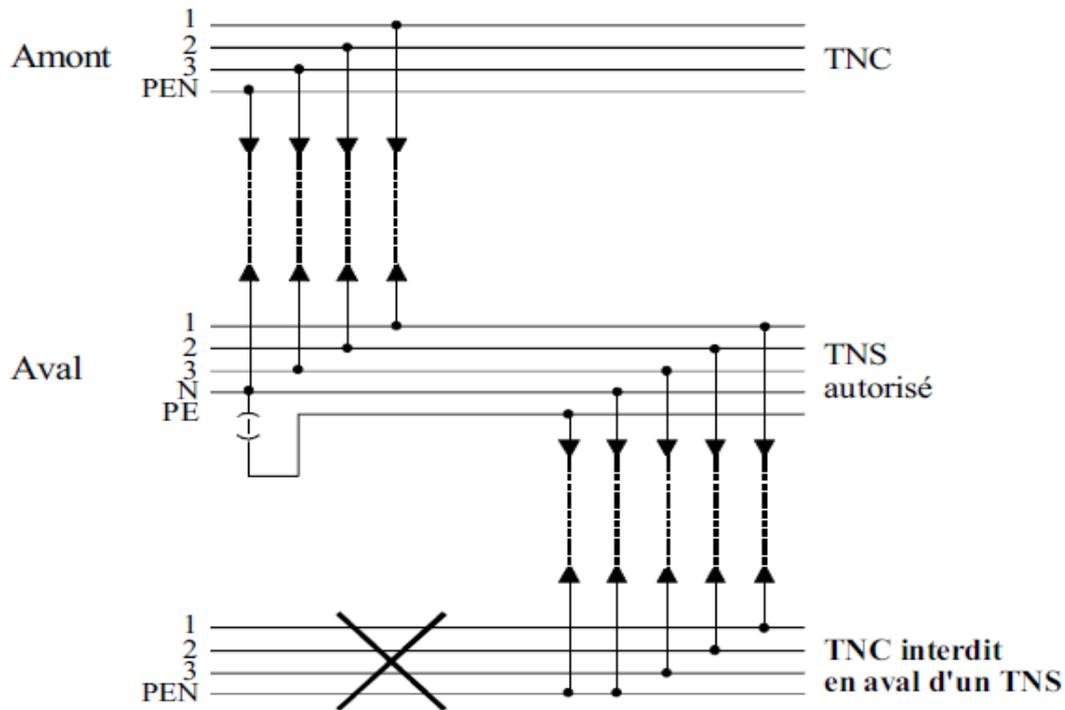


Figure III-12 : combinaison des schémas TNC et TNS

III.6 Conclusion

En conclusion, il apparaît :

- que la mise à la terre directe du neutre conduit au développement de tensions de contact très élevées qui ne peuvent pas être éliminées dans les temps compatibles avec la sécurité des personnes
- que la limitation des courants de défaut au moyen d'une impédance intercalée entre le point neutre et la terre réduit les tensions de contact à des valeurs comparables à celles que l'on rencontre dans les réseaux basse tension
- que la création d'une zone équipotentielle suivant les principes décrits permet encore de réduire les valeurs des tensions de contact. Sur la base de ces remarques, la norme C13-200 impose la règle suivante : articles 413-12 et 413-1-3 :

"En cas de défaut d'isolement entre une partie active et une masse, la tension de contact en tout point de l'installation ne doit pas pouvoir être supérieure à la tension limite conventionnelle U_L égale à :

- 50 V en courant alternatif dans les installations intérieures et abritées
- 25 V en courant alternatif dans les installations extérieures ".En pratique, la protection contre les contacts indirects est assurée en réalisant des liaisons

équipotentielle entre toutes les masses et tous les éléments conducteurs, y compris le sol. Ces liaisons doivent être telles que la résistance R entre deux éléments conducteurs simultanément accessibles, ne soit pas supérieure à :

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

I_f étant le courant maximal de défaut à la terre de l'installation.

L'application de ces règles conduit à la réalisation des mises à la terre conformément aux Principes exposés. En complément, on ne retiendra que les deux seuls principes recommandés pour les installations Industrielles ou tertiaire haute tension sont :

- la mise à la terre du neutre par résistance de limitation, simple à mettre en œuvre
- le neutre isolé qui autorise la poursuite de l'exploitation en présence d'un premier défaut d'isolement.

CHAPITRE IV :

Simulation des prises de terre des installations électriques

IV .Introduction

Afin d'étudier ces phénomènes électromagnétiques, de nombreuses études théoriques et campagnes expérimentales ont été toujours menées. Cependant, devant le coût de certaines expérimentations et la complexité de certains cas, les simulations numériques ont pris une place de plus en plus importante lors des dernières décennies. Ceci est également dû en grande partie à l'amélioration constante des calculateurs informatiques, des modèles utilisés et des méthodes de résolution des équations de Maxwell qui permettent aux simulations numériques de s'approcher toujours plus près de la réalité. Ainsi, la modélisation et l'étude de problèmes complexes sont désormais possible via la simulation numérique.

De nombreux simulateurs en électromagnétisme basés sur des méthodes numériques qui résolvent les équations de Maxwell sous leurs formes dérivées (Flux3D, Flux, Vector Field, ...) ou sous formes intégrales (NEC, FEKO,) sont commercialisés pour certains depuis plus de deux décennies. Ces méthodes sont appliquées sur des formulations différentes, généralement fréquentiel, et possèdent toutes leurs avantages et leurs inconvénients.

Cependant, il est bien connu que la résolution numérique des équations de Maxwell est peu adaptée au traitement de dispositifs électromagnétiques d'importantes dimensions et particulièrement à frontières ouvertes. Les temps de calcul trop excessif et l'instabilité numérique sont les deux inconvénients rencontrés lors de la modélisation de ce genre de dispositifs.

Dans ce travail de thèse de doctorat, notre intérêt est porté sur la réponse transitoire d'une grille de mise à la terre excitée par une décharge orageuse (foudre). Ce sujet déjà fait l'objet de plusieurs travaux publiés consacrés majoritairement à l'analyse de l'augmentation du potentiel de la terre ainsi qu'à la variation de l'impédance transitoire de la mise à la terre (la résolution numérique d'une équation intégrale est souvent utilisée).

Les méthodes numériques sont devenues incontournables pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes des prises de terre et la résolution des équations de Maxwell.

Dans de nombreuses applications (calcul du courant, champ électromagnétique et impédance transitoire) les quantités électromagnétiques doivent être déterminées sur une large bande de fréquences et le système linéaire doit être résolu pour chaque fréquence d'intérêt. Ceci entraîne un coût de calcul important.

Dans le but de réduire les temps de calcul tout en réalisant une modélisation permettant d'accéder à l'ensemble des grandeurs (champ électromagnétique rayonné, répartition des potentiels et des courants transitoires) nécessaires à l'analyse CEM (écoulement rapide des courants de défauts et émission électromagnétique dans le poste) du comportement transitoire d'une grille de mise à la terre, nous proposons une approche réaliste utilisant la technique des ondelettes et la méthode basée sur les paramètres d'estimations (MBPE). Cette approche à deux étapes dans le domaine fréquentiel. Elle sert à accélérer l'analyse du comportement transitoire d'un système de mise à la terre par la méthode du moment (MoM).

Dans un premier temps, en basant sur un processus de réduction des coefficients différentiels d'ordre élevés des éléments de la matrice d'impédance. La matrice

Transformée en ondelettes (WMT) est utilisée pour obtenir une équation de matrice d'impédance creuse dans le domaine des ondelettes, qui est résolu sur une large bande de

fréquence. Dans la deuxième étape, en basant sur une technique qui cherche à réduire le nombre de points de calcul dans le domaine fréquentiel nécessaires pour l'évaluation de la distribution spatio-temporelle du courant.

Il s'agit d'une électrode rectiligne de rayon $a = 7$ m et de longueur $l = 6$ m (Fig.VI.1), enterrée à une profondeur $d = 0.5$ m dans un sol de résistivité $\rho_g = 100 \Omega \cdot \text{m}$, de permittivité $\epsilon_{rg} = 10$, linéaire, homogène et isotrope.

IV.1 Cas d'une simple électrode

IV 1.1 Electrode enterrée verticalement :

Il s'agit d'une électrode rectiligne de rayon $a = 7$ mm et de longueur $l = 6$ m (Fig. VI.1), enterrée à une profondeur $d = 0.5$ m dans un sol de résistivité $\rho_g = 100 \Omega \cdot \text{m}$, de permittivité $\epsilon_{rg} = 10$, linéaire, homogène et isotrope.

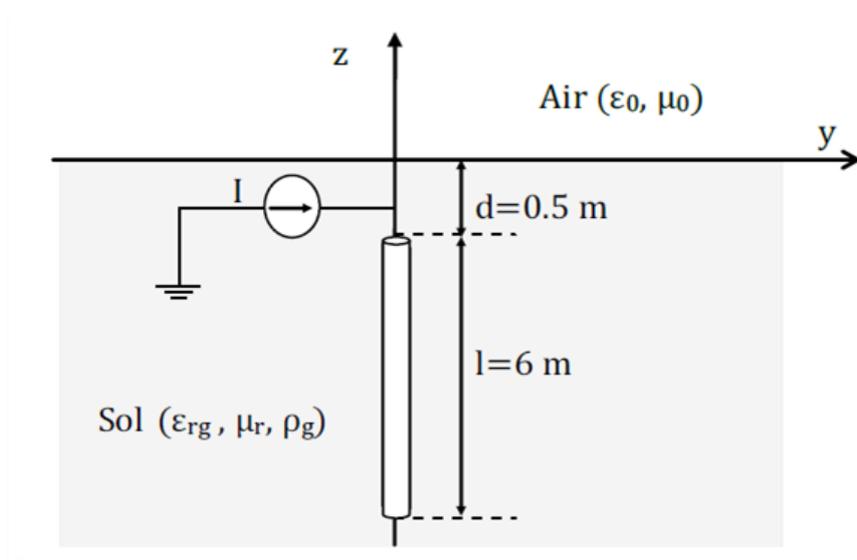


Fig. IV.1 Electrode enterrée verticalement

L'électrode est alimentée par une source de courant bi-exponentielle à l'une de ses Extrémités.

$$I(t) = I_n (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), I_n = 1.635 \text{ kA}; \alpha = 0.0146 \mu\text{s}^{-1}; \beta = 1.073 \mu\text{s}^{-1}$$

Pour valider les résultats en courant, nous utilisons le logiciel NEC-4. Le fichier des données que nous utilisons sur NEC-4 pour traiter cette application est présenté dans la simulation suivante :

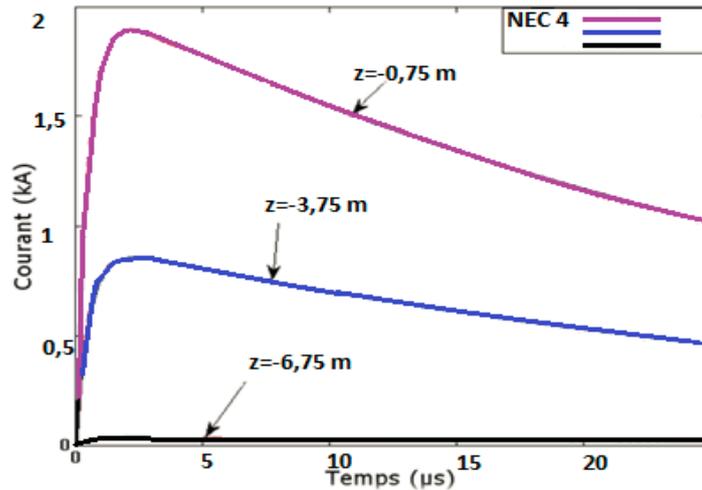


Fig. IV.2 Variation temporelle du courant en différents points de l'électrode.

IV.1.2 Électrode de terre Horizontale

Dans ce premier exemple, une électrode de terre horizontale ayant une longueur $l = 20$ m et de rayon $a = 0.007$ m (Fig. VI.3), enterré à une profondeur $d = 0.6$ m dans un sol de résistivité $\rho_s = 100 \Omega \cdot m$, permittivité relative $\epsilon_r = 10$ [$F \cdot m^{-1}$], supposé linéaire, homogène et isotrope, et alimentée à l'une de ses extrémités par la génératrice onde de foudre.

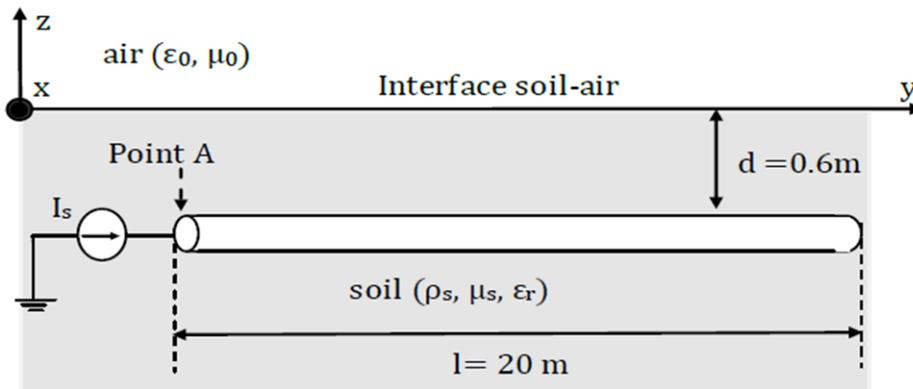


Fig. IV.3 Électrode de terre Horizontale

L'électrode de terre horizontale est discrétisée par la fonction de base en 64 coefficients inconnus du courant. Pour calculer la distribution de courant transitoire le long de l'électrode de terre horizontale entre 0 et 2.5 MHz avec un pas de fréquence de 0.0048 MHz. Le CPU prend un temps estimé à 220 s par la solution exacte. En revanche, notre approche (ondelettes basée MBPE) ne prend que 63 s avec 10 points d'interpolation et 9 fonction rationnelle ($L = 5$, $M = 4$). [28]

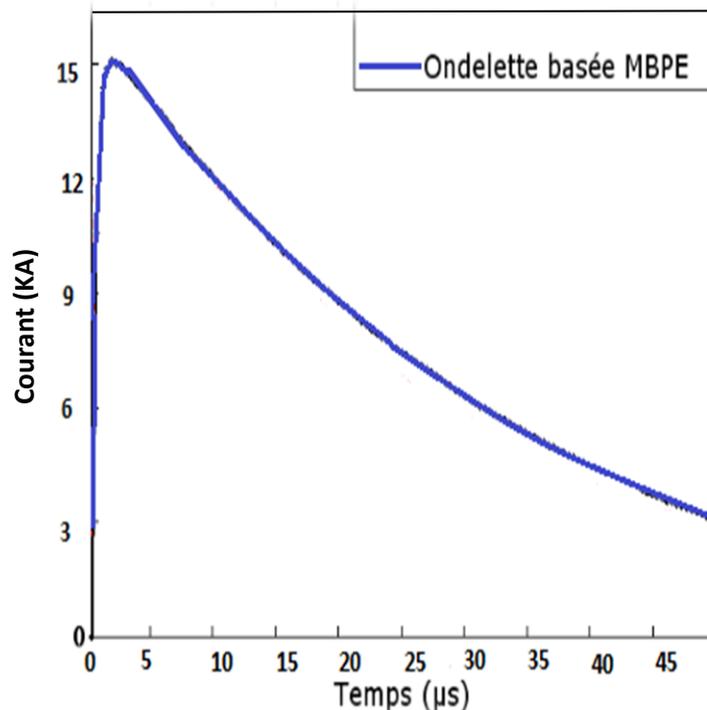


Fig. IV.4 Notre solution exacte du courant au point A du conducteur de mise à la terre dans le domaine temporelle.

MBPE : Méthode Basée sur les Paramètres d'Estimation

Les fig. VI.3 et VI.4 montrent les réponses transitoires du courant dans le domaine fréquentiel et temporel respectivement. Comme on peut le voir, un bon accord dans l'amplitude du courant le long du fil a été atteint pour notre approche par rapport à la solution exacte. De plus, le temps de montée prédite par les deux méthodes de calcul est identique.

Les fig. IV.5 (a, b, c et d) présentent la distribution temporelle du courant de l'arc en retour pour les modèles MTL, TL. D'après ces résultats il y a une décroissance de l'intensité du courant avec la hauteur ; la forme et l'origine de cette décroissance diffèrent d'un modèle à l'autre. [28]

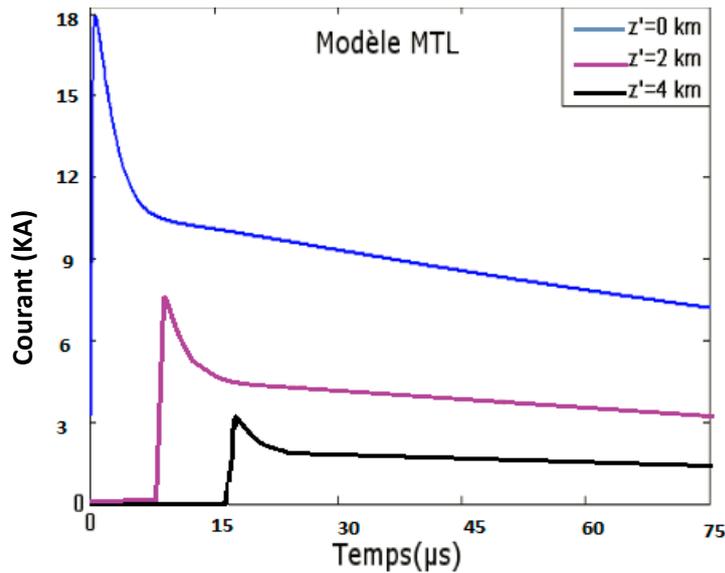


Fig. IV.5 Distribution temporelle du courant de l’arc en retour le long du canal pour les différents modèles

Ces ensembles des remarques, conduisent généralement vers le choix de l’utilisation du modèle MTL ; car il donne des résultats, assez proche de la mesure. En effet Nucci et al ont montré que le modèle MTL reproduit d’une manière satisfaisante les principales caractéristiques des grandeurs trouvées par les mesures.

MTL : Ligne de transmission modifiée

IV.2 Grille de mise à la terre

Dans le deuxième exemple, nous considérons le cas d’une grille de mise à la terre de forme carrée, régulière de dimension de 20 m × 20 m dont les dimensions d’une maille sont de 10 m × 10 m, comme illustré dans la Fig. IV.5. Il est composé de conducteurs en cuivre de rayon $a = 5$ m.

La grille est enterrée à une profondeur $d = 0.6$ m dans un sol de résistivité $\rho_g = 100 \Omega \cdot m$, permittivité relative $\epsilon_{rg} = 10$, supposé linéaire, homogène et isotrope. Le courant de foudre injecté est similaire à celle appliquée dans le premier exemple. [28]

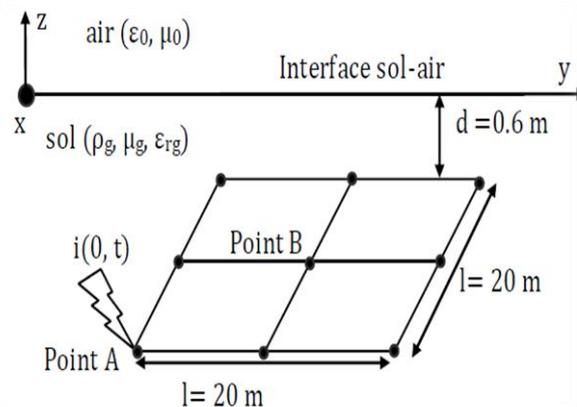


Fig. IV .6 Grille de mise à la terre

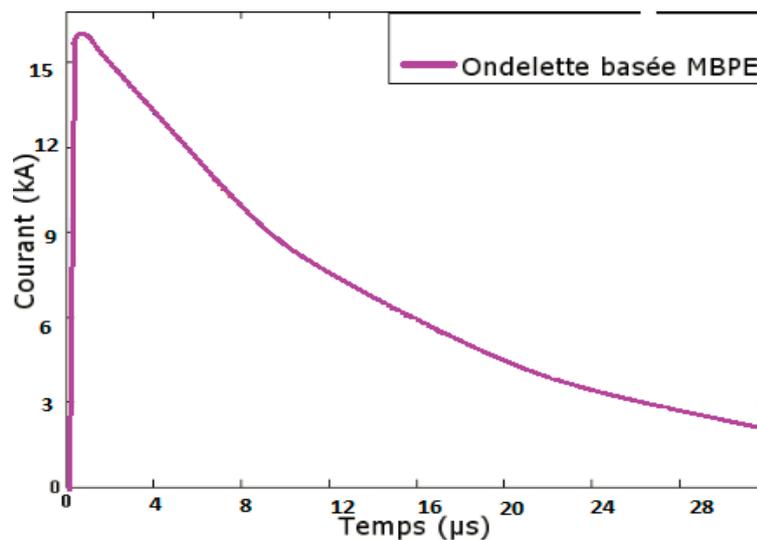


Fig. IV.7 Notre solution exacte du courant au point A de la grille de mise à la terre dans le domaine de temporelle.

La Fig. IV.7 montre les réponses transitoires du courant dans le domaine temporel.

Les calculs en utilisant l'approche proposée et "solution exacte" aux points A et B, à la fois dans le domaine temporelle, ont été prises pour montrer les effets de la méthode décrite. Les résultats obtenus en utilisant l'approche d'ondelettes basée MBPE, ont été comparés sur une plage de fréquence de 0 à 0,3 MHz, ce qui est la gamme de fréquences la plus importante pour analyser les caractéristiques de fréquence et de temps d'un système de mise à la terre. Comme dans le domaine temporel Fig. IV .7, sauf pour la petite différence dans l'amplitude du courant, le temps de montée du résultat prédit par les deux méthodes de calcul est similaire et indiquant une grande précision de la technique proposée.

On peut conclure notre approche (ondelettes basée MBPE) prend 844 s pour calculer le courant transitoire, alors que la solution exacte a pris 3.744 s. [28]

IV. 3 Conclusion :

L'utilisation de la plateforme Simulink nous a permis d'appliquer le modèle choisi se basant sur la méthode du circuit RLC pour l'étude de la réponse transitoire de système de mise à la terre suite à un courant de foudre.

Nous avons présenté les applications des différents modèles et une comparaison a été faite entre les résultats obtenus à l'aide de ce dernier et les résultats obtenus à l'aide du modèle analytique. L'étude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre nous a permis de conclure que la performance impulsionnelle des prises de terre dépend essentiellement de trois facteurs, la géométrie de la mise à la terre, les propriétés électriques du sol et du courant de foudre (forme d'onde), c'est-à-dire l'intensité du courant, le temps de montée d'onde et le point d'excitation.

L'apparition du phénomène d'ionisation dans certaines conditions au tour d'une prise de terre introduit un changement important dans les dimensions de cette dernière (rayon de l'électrode), par conséquent dans les paramètres des systèmes.

Conclusion générale

En conclusion, on peut constater que la CEM est globalement un sujet en forte expansion dans le monde du fait du développement sans précédent des applications radioélectriques et de l'intégration énorme de l'électronique dans la vie quotidienne soumise à des perturbations électromagnétiques nombreuses. La mise en application obligatoire du 1 Janvier 1996, dans la CE, de la directive européenne sur la CEM a été un facteur positif tendant à sensibiliser le plus grand nombre d'acteurs économiques à ces aspects encore confidentiels, il y a quelques années.

Sujets parfois controversés, de nombreuses interrogations subsistent et demandent plus d'efforts de recherche européenne et internationale (effets biologiques), de normalisation (CEM et ingénierie des fréquences). La prise de conscience des différents volets de la CEM et de ces-en- jeux est indispensable à tous les niveaux, afin d'aboutir, dans les meilleures conditions technico- économiques, à la satisfaction des clients à travers une bonne qualité de service et un minimum de nuisances (en terme d'effets électromagnétiques gênants).ici là réside l'intérêt de la compatibilité électromagnétique CEM qui traite ce problème de parasites qui touchent au fonctionnement correcte et assuré par les différents circuits électriques et qui faussent les résultats de ces appareils, et le problème de la CEM peut aller de la perte de temps de la réalisation et la perte de l'argent de la conception au point de causer des catastrophes qui amène à la perte des êtres vivants ,dû à une petite erreur ou négligence d'un point essentiel de la CEM ou même de son ignorance.

Tout ingénieur doit connaître les problèmes que traite la CEM et leurs remèdes et cela ne demande pas une très bonne maîtrise des formules mathématique et physiques ni des longues années d'expérience pour comprendre un problème de CEM, selon Alein Charoy.

Du chercheur à l'exploitant, la CEM doit être considérée comme un facteur visant à l'assurance d'une bonne qualité de service et non comme une contrainte supplémentaire alourdissant les procédures d'intégration sur le marché.

Des méthodes de mesure élargies et des appareils de mesure de conception spéciale, en particulier pour la mesure systématique des répartitions des courants de prise de terre, permettent de contrôler et de caractériser, outre les effets du courant de prise de terre dans le sol aussi le courant de prise de terre lie à des conducteurs. La boucle du courant de défaut à la terre établie expérimentalement permet d'établir à l'aide des méthodes présentées un bilan proprement dit du courant de défaut à la terre, ce qui permet de quantifier toutes les fractions du courant de prise de terre. Cela permet de détecter des défauts et points faibles dans la prise de terre. La répartition du courant donne de plus des renseignements utiles sur les lieux où il faut s'attendre à des tensions de contact et de pas accrues.

Il s'avère nécessaire, lors de toutes les mesures, d'accorder une attention particulière à la suppression des interférences issues de l'exploitation de l'installation. Il faut s'attendre en particulier à des couplages ohmiques et inductifs, dans le cas d'appareils de mesure à haute impédance dans les installations extérieures et aussi à des interférences capacitatives. Selon les expériences de la CEH, l'utilisation de courants d'essai de fréquence différente de celle du

Conclusion générale

réseau a fait ses preuves. Des filtres simples permettent d'atteindre des facteurs de suppression très élevés pour les signaux perturbateurs. Une méthode de filtrage particulièrement performante à cet effet est le redressement en phase synchronisée avec le courant d'essai (Technique Locke-in, amplificateur de capture).

Il ressort que les mesures des prises de terre ne peuvent prétendre posséder une grande précision, étant donné la marge de manœuvre considérable dans l'application des méthodes de mesure et l'interprétation. Ce n'est pas non plus le but d'une mesure de prise de terre, de fournir une notation "Suffisant" ou "Insuffisant" sur la seule base de quelques grandeurs mesurées. Les difficultés tiennent au fait que dans le cadre d'une mesure de prise de terre, il n'est pas possible de simuler de manière suffisamment réaliste un défaut à la terre. La répartition des courants de terre dépend toujours sensiblement du choix de la ligne par laquelle on injecte le courant de défaut à la terre expérimental. Un facteur important dans ce contexte est l'effet pelliculaire du courant toujours existant dans le cas de courant alternatif, ce qui engendre dans le sol une répartition fortement asymétrique des courants et des potentiels.

De ce fait les méthodes de mesure appliquées au contrôle des prises de terre doivent être choisies de sorte telle qu'il en résulte une marge de manœuvre aussi réduite que possible pour les résultats qui en découlent. Pour améliorer la reproductibilité des résultats de contrôle des prises de terre, il est très souhaitable de disposer d'une standardisation des méthodes de mesures, par exemple par la création de recommandations unitaires pour la réalisation de telles mesures.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] - Xavier Legrand, Modélisation des Systèmes de Mise à La Terre des Lignes Electrique Soumis des Transitoires de Foudre, thèse de doctorat, L'école doctorale de Lyon, 2007.
- [2] - Semaan Georges, évaluation de l'effet de la mer et du contrepoids sur le profil de la tension d'un système de mise à la terre d'une ligne de transport d'énergie à haute tension dans un sol résistif, thèse de doctorat, Montréal, le 10 Septembre 2001
- [3] - Vijayaraghavan and al, Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection, Elsevier, Oxford, 2004.
- [4] - Etudes des couplages en compatibilité électromagnétique des systèmes électroniques 2009/2010, ummto
- [5] - Cahier Technique N° 151, D. Fulchiron
- [6] - F. Maciela, "Parafoudres", Technique de l'ingénieur, [D4755], 1998.
- [7] - BS EN 60099-4, "Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems", incorporating amendment N°1 Surge arresters Part 4, 1993.
- [8] - techniques de l'ingénieur : volumes D3 I, D3 II, D3 III
- [9] - réseaux industriels avec centrales de process, Cahier Technique N° 99, P. Bibollet,
- [10] - guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usine, Collection Technique et Documentation, Lavoisier, 198
- [11] - Tahar Rouibah, contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre des installations électriques
- [12] - Cahiers techniques Merlin Gerin
- [13] - Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension,
- [14] - Cahier Technique n° 62, F. Sautriau
- [15] - Les dispositifs différentiels résiduels, Cahier Technique N° 114, R. Calvas
- [16] - Protection des personnes et alimentations statiques sans coupure,
- [17] - Cahier Technique n° 129, J.N. Fiorina
- [18] - Les réseaux MT publics dans le monde, Cahier Technique N° 155, Ch. Puret

- [19] - La conception des réseaux industriels en haute tension, Cahier Technique N° 169,
G. Thomasset
- [20] - Les schémas des liaisons à la terre en BT (régime du neutre), Cahier Technique n°
172, B. Lacroix, R. Calvas
- [21] - Les schémas des liaisons à la terre dans le monde et évolutions,
- [22] - Cahier Technique n° 173, B. Lacroix, R. Calvas
- [23] - Perturbations électriques dans les installations électriques BT et schémas des
liaisons à la terre, Cahier Technique n° 177, R. Calvas
- [24] - Catalogue de la distribution HT / MT (1996)
- [25] - Catalogue de la distribution BT (1996)
- [26] - Guide de la protection moyenne tension (05.1990), réf. : CG0021X
- [27] - Guide de l'installation électrique, Editions France Impressions Conseils (07.1991)
- [28] - H.R. Karami, R. Moini, S.H.H. Sadeghi, Using MBPE technique to accelerate
Solving the thin-wire EFIE used in numerical simulation of lightning, Eng.
Anal.Bound. Elem. Vol. 33, N°. 6, pp. 866–871, 2009.