

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ 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:

**Etude et protection d'une installation électrique contre les
surtensions**

Présenté par :

SADIOU Loubna

ZOGLAMI Sara

Encadrant : NAIDJI Mourad

MCB

BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

LABAR Hocine	PROF	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Président
NAIDJI Mourad	MCB	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Encadrant
HAMED Mostafa	MCB	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous remercions Avant tout, louange à « ALLAH » qui nous donnée la force, le courage et la patience de mettre ce modeste travail

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Notre Encadreur

Naidji Mourad

Ce mémoire n'est autre que l'aboutissement de nos efforts guidés Par vos conseils et votre rigueur.

Permettez-nous de remercier les membres du jury, sans oublier tous nos professeurs qui nous prodigué un enseignement complet qui nous serons à présent comme outil De Travail.

Dédicace

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont
chers,*

A Ma Chère Mère

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel
et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour
mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez
depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne
toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant
formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très
Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie*

A mon très cher père

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que
ce travail traduise ma gratitude et mon affection.*

*A monsieur le directeur de notre travail Mr Naïdji .M pour votre
aide*

A toute les personnes que J'ai connues et que je n'ai pas citées,

SADIOU Ioubna

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années
d'études.*

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

à ma grande mère « dieu prolonge sa vie »

A mes chers parents

A ma sœur Tasnim

A mes cousines Doussa , Radia , Sabah , Samira , Fatiha

*A mes petits LouLou , Zizou , Mohamed , Aya , Abdou , Taki , Bisou ,
Nawfel , Meriem*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite
plus de succès.*

A tous ceux que j'aime.

Zoghlami sara

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

I.1. Introduction :	2
I.2. Description des systèmes de protection contre les surtensions :	2
I.3. Principales caractéristiques de la décharge de foudre :	2
I.4. Niveau Kéraunique NK:	3
I.5. Déroulement du coup de foudre:	3
I.5.1. Le traceur:	3
I.6. Classification des coups de foudre :	4
I.6.1. Le coup négatif:	5
I.6.2. Le coup positif:	5
I.6.3. Le coup descendant :	5
I.6.4. Le coup ascendant:	5
I.7. Contraintes appliquées à une ligne touchée par un coup de foudre :	6
I.7.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase :	6
I.7.2. Coup de foudre sur un câble de garde :	7
I.8. Caractérisation de l'onde de foudre :	8
I.9. Conception du système de protection contre la foudre :	12
I.9.1. LP EXTERNES:	12
I.9.2. LP INTERNES:	12
I.10. Systèmes de raccordement à la terre :	14
I.11. Tension de pas et Tension de toucher.....	15
I.12. Régime de neutre :	17
I.13. Les conséquences des surtensions :	20
I.13.1. Claquage :	20
I.13.2. Perturbation de fonctionnement :	20
I.13.3. Vieillesse prématuré :	21

I.13.4. Danger pour les personnes :	21
I.14. Conclusion	21
Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre	
II.1. Introduction	22
II.2. Description de la structure protégée :	22
II.3. Analyse du risque foudre :	24
II.4. Niveau kéraunique (NK) :	26
II.5. Définition des risques à évaluer :	26
II.6. Calcul de la fréquence des événements dangereux :	27
II.7. Choix du facteur d'Emplacement Cd:	27
II.8. Risque d'un impact sur une structure :	28
II.9. Conclusion	33
Chapitre III: Conception d'un système de Mise à la terre	
III.1. Introduction :	34
III.2. Principe de conception d'un système de mise à la terre selon la norme IEEE 80-200	34
III.3. Logiciel de simulation CYMGrd	40
III.3.1. Présentation de CYMGrd :	40
III.3.2. Fonctions analytiques :	41
III.3.3. Modules d'analyse de CYMGrd :	42
III.3.4. Analyse de sécurité :	42
III.4. Application :	43
III.5. Conclusion :	55
Conclusion générale :	56
Bibliographie	
Annexe	

Liste des figures

Chapitre 01 : Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Figure I. 1: L'éclaire de la foudre.....	3
Figure I. 2: Traceur de coup de foudre.....	4
Figure I. 3: Catégories de coups de foudre.....	6
Figure I. 4: Coup de foudre tombant sur un conducteur de phase.....	7
Figure I. 5: Coup de foudre sur un câble de garde.....	7
Figure I. 6: Définition des composants de courant à course courte.....	8
Figure I. 7: Définition des composants de courant à course longue, où T_{long} – temps du composant durée.....	8
Figure I. 8: Répartition du potentiel en cas d'éclairs sur une couche de sol homogène.....	9
Figure I. 9: Élévation potentielle du système de mise à la terre du bâtiment par rapport à la terre à l'extérieur du Système de protection causé par la valeur maximale du courant de foudre.....	10
Figure I. 10: Disposition du système de raccordement à la terre de type A et de type B.....	15
Figure I. 11: Démonstration de la tension de contact et de pas apparaissant.....	16
Figure I. 12: Schémas de liaison à la terre en basse tension.....	20

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Figure II. 1: Schéma simplifié du poste électrique.....	22
Figure II. 2: Photo du poste de l'extérieur, situé à l'université sidi Ammar, Annaba.....	23
Figure II. 3: Photo du poste à l'intérieur.....	24
Figure II. 4: Organigramme de la gestion de risque.	25
Figure II. 5: Courbes isokérauniques mondiales.....	26

Chapitre III: Conception d'un système de Mise à la terre

Figure III. 1: Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000 [22].....	40
Figure III. 2: Disposition des fenêtres dans CYMGrd lors de l'ouverture d'un projet.....	43
Figure III. 3: Mesures de résistivités de sol.....	48
Figure III. 4: Grille de mise à la terre rectangulaire dessinée par CYMGRD en 2D.....	49
Figure III. 5: Grille de mise à la terre rectangulaire dessinée par CYMGRD en 3D.....	49
Figure III. 6: Graphe de mesures de résistivités de sol (les ponts douteux sont donnés par CYMGrd).....	50
Figure III. 7 : Diagramme de contour de potentiel en 2D.....	52

Figure III. 8 : <i>diagramme de contour du potentiel de contact en 3D</i>	53
Figure III. 9: <i>Diagramme de profil de potentiel</i>	54

Liste des tableaux

Chapitre I : Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Tableau 1: montre quelques paramètres des décharges de foudre pour les terrains plats..... 12

Tableau 2 : Mode de fonctionnement neutre. 18

Tableau 3: Types de modes de fonctionnement des neutres TN. **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Tableau 4:Valeurs des facteurs d'emplacement cd 28

Tableau 5:Les dimensions maximales de la structure 28

Tableau 6: Zones équivalentes d'exposition AI en fonction des caractéristiques du service .. 28

Tableau 7: Valeurs de P_D en fonction des mesures de protection 29

Tableau 8: valeur de probabilité P_I en fonction des niveaux de protection pour lesquels le parafoudre est conçu 29

Tableau 9: Valeurs de r_f 30

Tableau 10: Valeurs de h_z 30

Tableau 11: Valeurs de L_f pour le risque R_1 31

Tableau 12: Valeurs de L_f pour le risque R_2 31

Chapitre III: Conception d'un système de Mise à la terre

Tableau 13: Principaux paramètres électriques calculés avec CYMGrd.....52

Tableau 14: Comparaison des résultats calculés avec celles obtenues par CYMGrd.....55

Résumé :

L'objectif de ce travail est de développer un outil pour la protection optimale contre les surtensions pour une installation électrique. Les coups de foudre et les courants de défaut peuvent constituer un risque pour la vie et la santé des personnes. En plus des dommages physiques, ces courants créent un risque de défaillance des systèmes électriques et un risque d'incendie. Concevoir un système de protection, contre les surtensions, fiable et rentable est très important à la fois pour la protection des personnes et les équipements. Ce travail est basé sur la conception et le calcul analytique d'un système de protection. La gestion des risques, qui permet d'évaluer les valeurs des risques et de déterminer si l'optimisation du système de protection contre la foudre est nécessaire. La conception et la modélisation d'un système de mise à la terre sous le logiciel Cymgrd. Afin de valider les performances de la méthodologie proposée, des simulations sont effectuées sur le poste électrique 30/0,4 kV de l'université Sidi Ammar d'Annaba.

Abstract :

The objective of this work is to develop a tool for optimal protection against over voltages for an electrical installation. Lightning strikes and fault currents can pose a risk to human life and health. In addition to physical damage, these currents create the risk of electrical system failure and the risk of fire. Designing a reliable and cost-effective surge protection system is very important for both the protection of people and equipment. This work is based on the design and analytical calculation of a protection system. Risk management, which allows assessing risk values and determining whether optimization of the lightning protection system is necessary. The design and modeling of an earthing system using Cymgrd software. In order to validate the performance of the proposed methodology, simulations are carried out on the 30/0.4 kV electrical substation at Sidi Ammar University in Annaba.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تطوير أداة للحماية المثلى ضد الجهد الزائد للتركيبات الكهربائية. يمكن أن تشكل ضربات البرق والتيارات الصاعدة خطراً على حياة الإنسان وصحته. بالإضافة إلى الأضرار المادية، تخلق هذه التيارات خطر فشل النظام الكهربائي وخطر نشوب حريق. يعد تصميم نظام موثوق به وفعال من حيث التكلفة للحماية من زيادة التيار أمراً مهماً للغاية لحماية الأشخاص والمعدات. يعتمد هذا العمل على التصميم والحساب التحليلي لنظام الحماية لإدارة المخاطر، والذي يسمح بتقييم قيم المخاطر وتحديد ما إذا كان تحسين نظام الحماية من الصواعق ضرورياً. تصميم ونمذجة نظام من أجل التحقق من صحة أداء المنهجية المقترحة، تم إجراء عمليات المحاكاة على Cymgrd. التأريض باستخدام برنامج المحطة الكهربائية الفرعية 0.4/30 كيلو فولت بجامعة سيدي عمار في عنابة.

Introduction générale :

Il existe de nombreux facteurs dans les réseaux électriques capables de mettre en danger un équipement électrique et de perturber l'alimentation électrique. Ces facteurs entraînent également un risque de menace pour la vie et la santé humaine. L'un de ces facteurs est la surtension. Les surtensions sont divisées en deux types : les surtensions naturelles, qui se produisent en raison de la foudre, et les surtensions artificielles, qui se produisent en raison de défauts. Les deux types peuvent être à l'origine d'événements dangereux, entraînant des pertes économiques.

Le fonctionnement fiable des installations électriques pour la production et la distribution d'électricité est obtenu grâce à la mise en œuvre d'un certain nombre de mesures organisationnelles et techniques.

Parmi eux, la protection contre les surtensions occupe une place importante. De nos jours, le problème de la protection contre les surtensions devient progressivement pertinent en raison de l'augmentation du nombre des consommateurs sensibles aux impulsions électromagnétiques dans les réseaux électriques. Création d'un fonctionnement correct la protection contre les surtensions n'est possible qu'avec une conception détaillée de ses systèmes internes et externes. Parfois, même un petit écart dans la coordination du système de protection contre les surtensions peut provoquer une explosion, un incendie ou des blessures à un grand nombre de personnes.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons une description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'analyse et la gestion du risque contre la foudre pour une application réelle.

Le dernier chapitre montre une conception d'un système de la mise à la terre avec le logiciel CYMGrd.

Chapitre I :

**Description du système de la
protection contre la foudre et
de mise à la terre**

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

I.1. Introduction :

L'étude du système de protection contre la foudre nécessite la connaissance statistique de la probabilité de chute de foudre sur une installation déterminée. En conséquence on s'intéresse en premier lieu à connaître la statistique de chute de coups de foudre au sol, puis à estimer l'efficacité des systèmes de protection. Chaque année les statistiques mondiales montrent qu'il y a des millions de coup de foudre qui cause la mort de dizaines des personnes et des milliers d'animaux, des milliers d'incendies, des milliers de coupures sur les réseaux électriques et téléphoniques. Par exemple en France deux millions de coup de foudre causent chaque année la mort de 40 personnes et de 20 000 animaux, 15 000 incendies, 50 000 coupures sur les réseaux électriques et téléphoniques, et la destruction de nombreux transformateurs et de milliers d'appareils électroménagers. Le coût total des effets de la foudre est estimé à près d'un milliard de francs par an malgré l'absence de statistique et des estimations exacts concernant les dégâts causés par la foudre nous supposons qu'ils sont relativement plus désastreux. Pour cette raison il est impératif d'analyser l'efficacité des moyens de protection afin de choisir une protection complète et efficace contre les risques liés à la foudre.

I.2. Description des systèmes de protection contre les surtensions :

Le fonctionnement normal des installations électriques est défini par une combinaison compétente de mesures techniques et organisationnelles. La protection contre les surtensions occupe une place importante parmi Une augmentation élevée de la force du champ électrique peut être dangereuse pour l'état d'isolation d'un l'équipement électrique et pour les personnes qui se trouvent à proximité d'une installation ou d'une ligne pendant cette période Le type le plus dangereux de surtension est la décharge de foudre. LPS est utilisé pour protéger les personnes et les installations contre la foudre. LPS protège également contre la surtension processus de fonctionnement, le fonctionnement sans faille de la protection contre les surtensions est réalisé avec une étude détaillée et mise en œuvre de LPS externes et internes. Léger écart dans la coordination de ces systèmes peut causer une surtension critique et des interférences électromagnétiques entraînant un dysfonctionnement ou une défaillance de l'équipement et des blessures des êtres vivants [1].

I.3. Principales caractéristiques de la décharge de foudre :

La foudre est une décharge électrique dans l'atmosphère, se développant entre les nuages d'orage La foudre est habituellement générée par un orage qui se produit lorsque la température est chaude. Les masses d'air d'humidité sont transportées à une grande altitude. La décharge de

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

foudre commence par le leader aspect – un canal de plasma lumineux avec une conductivité élevée. Selon la direction de mouvement de leader, les éclairs sont divisés en deux types : les éclairs vers le bas (nuage à terre) et vers le haut flashes (de la terre aux nuages) [1].



Figure I. 1: L'éclaire de la foudre.

I.4. Niveau Kéraunique NK:

L'activité orageuse d'une région peut être quantifiée par un niveau Kéraunique. Le niveau Kéraunique est défini comme étant le nombre moyen de jours par an au cours desquels le tonnerre est entendu. En Algérie, ce nombre varie de 5 à 25 selon les régions avec une moyenne se situant autour de 15. [2]

I.5. Déroulement du coup de foudre:

I.5.1. Le traceur:

Le traceur est une décharge préliminaire peu lumineuse qui produit entre la terre et le nuage, réparant le chemin au canal de la foudre.

Les coups de foudre sont classés selon : [3]

- Le sens de progression du traceur.
- Le signe de la charge qui se décharge.

Le traceur de coup de foudre est illustré dans la Figure (I.2):

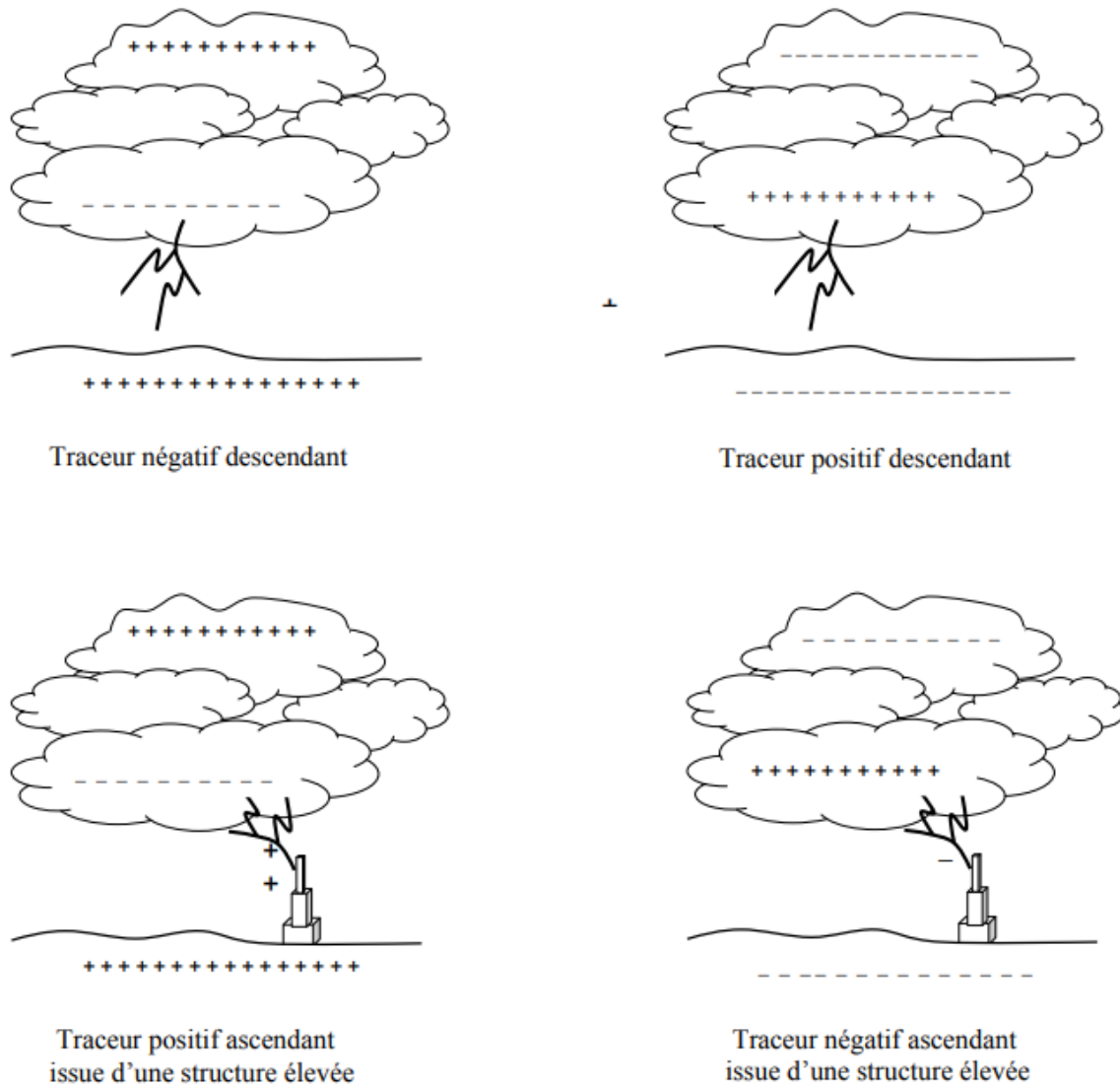


Figure I. 2: Traceur de coup de foudre.

I.6. Classification des coups de foudre :

Les aspérités du sol ou des structures créent un " effet de pointe " qui amplifie de façon très importante le champ électrique local. Cette augmentation du champ électrique au sol se traduit par une ionisation locale de l'air (effet "Corona"). Ce phénomène est observé depuis longtemps et est ainsi connu sous l'appellation « feu de Saint-Elme ». Un canal d'air ionisé reliant le nuage au sol est alors susceptible de se créer et de permettre l'écoulement d'un courant de foudre de forte intensité.

On distingue quatre types caractéristiques de coups de foudre, selon qu'ils sont négatifs ou positifs et descendants ou ascendants. [4]

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

I.6.1. Le coup négatif:

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15 μs succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descentes plus douces.

I.6.2. Le coup positif:

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant de 0,1 s à 0,2 s.

La durée d'attaque varie entre 20 μs et 50 μs et l'amplitude du courant des "coups positifs" est généralement supérieure à celle des "coups négatifs".

I.6.3. Le coup descendant :

Caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, c'est le plus fréquent. Il comporte une phase initiale où une pré-décharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur).

A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement le champ au sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité.

I.6.4. Le coup ascendant:

Il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas de pylônes de grande hauteur ou de tours, l'effet couronne peut créer une décharge (partant donc du sol) qui va se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges accumulées dans le nuage vont s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent en zone de montagne comme à daggar Pakistan, Caceres Colombie et Canada.

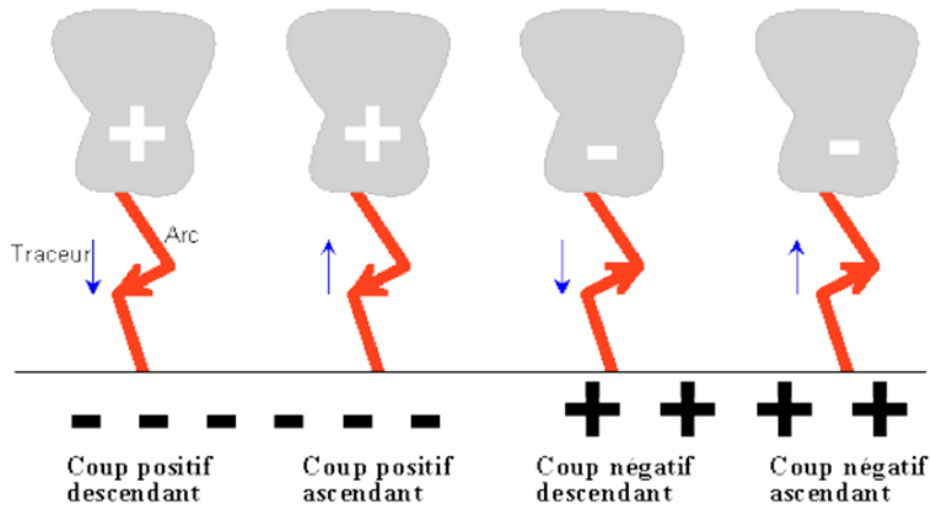


Figure I. 3: Catégories de coups de foudre.

I.7. Contraintes appliquées à une ligne touchée par un coup de foudre :

I.7.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase :

Pour déterminer les conséquences d'un coup de foudre touchant un conducteur de phase, on considère généralement une injection de courant $i(t)$ due à la et se propage vers les extrémités de la ligne. Les surtensions qui se propagent immédiatement après l'impact s'expriment à partir de l'impédance caractéristique (ou impédance d'onde) Z_c de la ligne, d'après la formulation simplifiée suivante (en valeurs instantanées) :

$$V(t) = Z_c / 2 \cdot i(t) \quad (2)$$

L'impulsion de tension va se propager le long de la ligne vers les pylônes en subissant des déformations dues aux éventuels amorçages des chaînes d'isolateurs. En effet, lorsque la surtension arrive au niveau d'un pylône où le conducteur est suspendu par une chaîne d'isolateurs, selon les valeurs respectives de la tension de tenue de cette chaîne et de l'amplitude de la surtension, il y a ou non amorçage. En cas d'amorçage, il y a défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs. Sachant que l'ordre de grandeur de Z_c est de $300 \, \Omega$ à $400 \, \Omega$ et que les courants de foudre les plus faibles sont de l'ordre de 3 à 4 kA, on voit que l'amorçage sur le premier pylône rencontré est pratiquement systématique sur les lignes de tension inférieure à 400 kV dont l'isolement en choc de foudre est inférieur ou de l'ordre de 1 000 kilo.

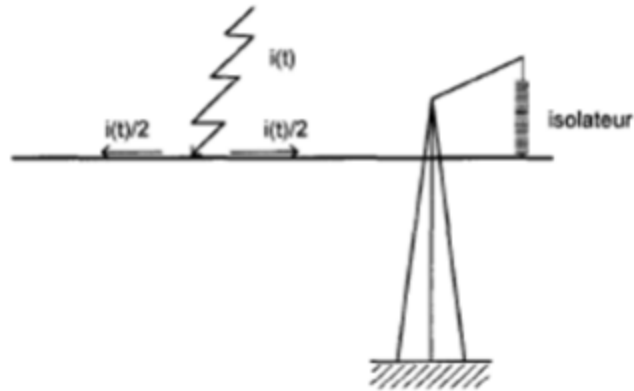


Figure I. 4: Coup de foudre tombant sur un conducteur de phase

I.7.2. Coup de foudre sur un câble de garde :

Pour protéger une ligne des impacts directs de la foudre, on utilise un câble de garde placé au-dessus des conducteurs et relié à la terre au niveau de chaque pylône. Si le coup de foudre tombe sur un pylône ou un câble de garde qui lui est relié, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel de la tête du pylône. Ce potentiel dépendant de son inductance propre L et la résistance de terre R au choc.

$$U = i * \frac{R}{2} + \frac{L}{2} * \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Avec R et L : résistance et inductance du pylône (ou de mise à la terre)

Lorsque la différence de potentiel aux bornes des chaînes d'isolateurs supportant les conducteurs de phase atteint ou dépasse leur tenue diélectrique, il y a amorçage d'au moins une d'entre elles. On parle alors d'amorçage en retour [5].

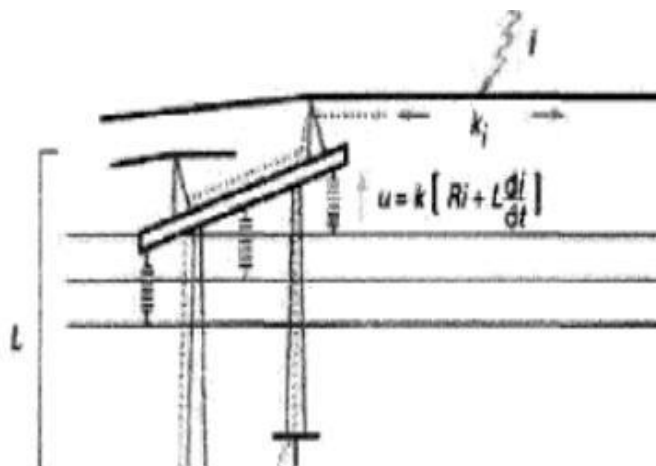


Figure I. 5: Coup de foudre sur un câble de garde

I.8. Caractérisation de l'onde de foudre :

Le courant de foudre se compose de coups longs (avec une durée supérieure à 2 ms) et courts (avec durée inférieure à 2 ms) composants. Il pourrait s'agir de différentes combinaisons de ces composants selon le type d'éclair et la polarité de l'éclair. La définition de la forme d'onde Les longs courants de foudre sont montrés dans la fig. I.6, I.7.

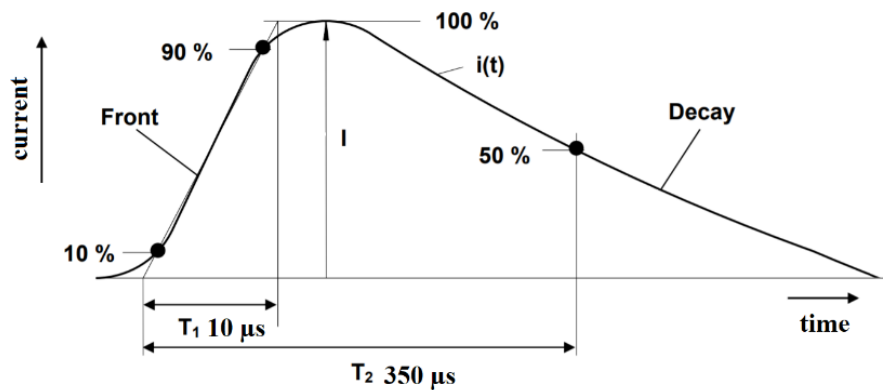


Figure I. 6: Définition des composants de courant à course courte

Où

T_1 – temps de montée du courant.

T_2 – temps de décroissance du courant à la moitié de la valeur de crête [6]

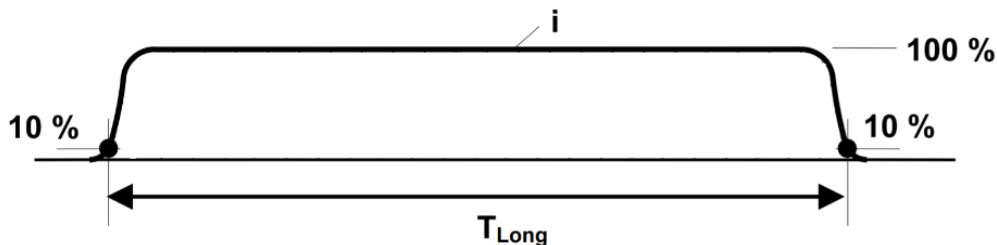


Figure I. 7: Définition des composants de courant à course longue, où T_{long} – temps du composant durée

Certains paramètres du courant de foudre sont importants pour la protection contre la foudre le calcul peut être noté :

- La valeur maximale d'un courant de foudre – I
- La pente de la montée du courant de foudre – $\frac{di}{dt}$
- La charge du courant de foudre – Q
- Énergie potentielle spécifique du courant de foudre – W

La principale caractéristique quantitative d'une décharge de foudre est la valeur maximale de la foudre Les courants de foudre varient considérablement d'unités à des centaines de kA. La

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

foudre moyenne évaluée Le courant est de 15 kA. Lorsque la foudre est déchargée, en plus du paratonnerre et de la puissance les lignes, sous-stations, centrales électriques, bâtiments résidentiels, etc. peuvent être affectés. Le flux de foudre Le courant à travers les pièces conductrices provoque l'apparition d'une chute de tension, qui peut détruire l'isolation des appareils électriques [5]. Dans le cas le plus simple, la relation entre le courant de foudre et la tension peut être décrite en utilisant la loi d'Ohm [7]:

$$U = I \cdot R \quad (1)$$

où I – valeur maximale d'un courant de foudre,

R – résistance de la pièce conductrice.

Si le courant de foudre apparaît au point de la structure conductrice homogène, la zone de

Cet effet se produit également lorsque la foudre frappe le sol homogène. Surface, fig. 1.8

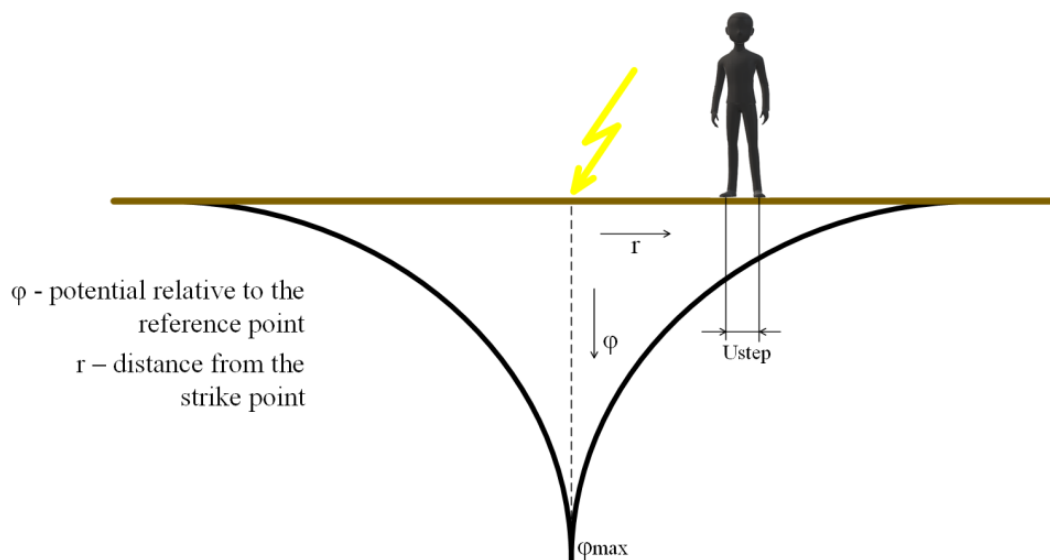


Figure I. 8: Répartition du potentiel en cas d'éclairs sur une couche de sol homogène.

Si des humains ou des animaux se trouvent dans la zone de gradient potentiel, une tension de pas se forme. Tension de pas peut causer un choc électrique et causer de graves dommages à la santé. Plus la conductivité du sol est élevée le plus net est la zone de gradient potentiel et le risque causé par l'augmentation de la tension de pas. Tension de pas défini plus en détail au paragraphe I.11 En cas de foudre dans le bâtiment équipé de protection contre la foudre, le courant circule à travers le système de mise à la terre du bâtiment et chute de tension via la résistance du système de mise à la terre R_E , fig. I. 9 Création de la fig. I. 9 a été [7]

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Dans la mesure où toutes les parties conductrices du bâtiment sont élevées au même potentiel valeur, il n'y a aucun risque de choc électrique [7]. Ainsi, la mise en œuvre de la terre conçue Le système de terminaison est très important.

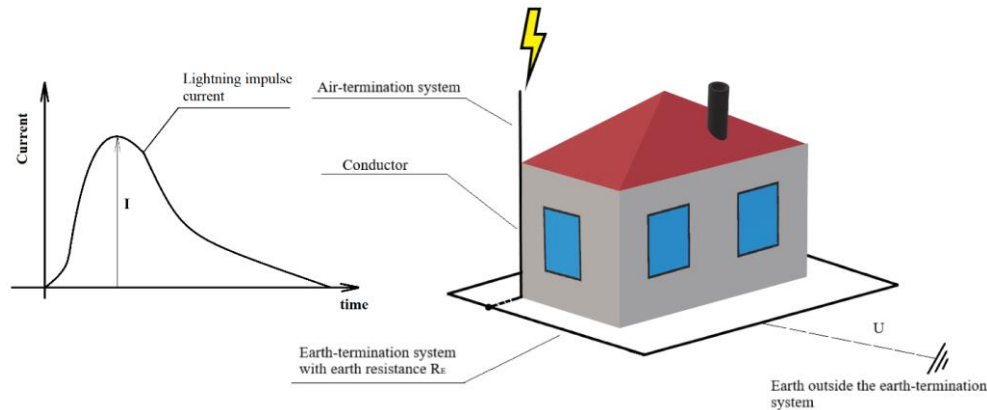


Figure I. 9: Élévation potentielle du système de mise à la terre du bâtiment par rapport à la terre à l'extérieur du Système de protection causé par la valeur maximale du courant de foudre.

Les installations électriques et les bâtiments ont de nombreux conducteurs dans leur structure utilisés pour alimentation électrique, liaisons de données ou comme éléments de construction. Ces conducteurs peuvent former différentes boucles : ouvert et fermé. La pente de la montée du courant de foudre définit la valeur de tension induite dans ces boucles [6].

La tension induite peut être déterminée par la formule suivante :

$$U = M \frac{di}{dt} \quad (2)$$

M – inductance mutuelle de la boucle,

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ – la raideur du courant de foudre augmente.

La charge transmise du courant de foudre responsable de l'effet de fusion au point de coup de foudre. Il peut être défini par la formule [7] :

$$Q = \int i dt = Q_{short} + Q_{long} \quad (3)$$

Q short – charge des composants à course courte,

Q long – charge des composants à course longue.

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

La quantité d'énergie absorbée au point de base de l'arc est définie par la valeur de charge et la chute de tension anode/cathode sur l'espace isolant peut-être calculée par la formule suivante [7]

$$w = Q * U_{a,c}$$

Q – Charge du courant de foudre,

$U_{a,c}$ – Tension anode/cathode.

L'énergie spécifique pertinente pour les forces mécaniques entre les conducteurs transportant le courant de foudre ainsi que pour l'effet thermique est exprimée par la formule suivante [6]:

$$\frac{W}{R} \int i^2 dt$$

$\frac{W}{R}$ – l'énergie spécifique,

R – résistance du conducteur.

Le tableau 1 : montre quelques paramètres des décharges de foudre pour les terrains plats. [8]

Paramètre	Valeur la plus fréquente	Valeur enregistrée	
		Le meilleur	Le plus petit
Polarité	jusqu'à 80% négatif	–	–
Valeur maximale du courant, kA	jusqu'à 20	200–300	0.5
Charge de foudre, C	jusqu'à 20	100	0.5
Durée d'impulsion actuelle, mcs	10–30	100	Moins de 10
Durée du front d'impulsion, mcs	1,5-10	80–90	Moins de 1
Raideur de l'augmentation du courant de foudre, A/mcs	5000	50000	–
Nombre d'impulsions dans la décharge	2–3	20	1

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Durée de décharge, s	0,2–0,6	1.33	–
----------------------	---------	------	---

Tableau 1: montre quelques paramètres des décharges de foudre pour les terrains plats.

Dans les zones montagneuses, en raison de la réduction de la distance entre les nuages et la surface de la terre, les valeurs d'amplitude du courant de foudre sont réduites d'environ deux fois. Foudre se produit avec une plus petite charge de nuages [9].

Les systèmes de protection contre la foudre visent à protéger les bâtiments et les centrales électriques des effets dangereux de tous les coups de foudre possibles. En fonction de l'objet à protéger, un système de protection spécialement conçu est utilisé. Une condition préalable au fonctionnement efficace du système de protection contre la foudre est développement d'un bon système de terminaison de terre. Il existe des structures où une protection contre la foudre doit être installée, telles qu'une centrale électrique, une sous-station, des hôpitaux, etc. selon les termes de la loi. La liste complète des structures nécessitant la mise en œuvre d'une protection contre la foudre est donnée en. [10].

I.9. Conception du système de protection contre la foudre :

LPS est divisé en externe et interne. Selon [11] LPS comprend les éléments suivants composants :

I.9.1. LP EXTERNES:

Système de terminaison d'air d'ano,

Système de terminaison de terre d'enrico,

Système de conducteur descendant.

I.9.2. LP INTERNES:

Délimitation de séparation,

Délimitation équipotentielle de la foudre.

Le but des LPS externes est d'intercepter les coups de foudre directs avec la terminaison aérienne système, conduisez le courant de foudre via le système de conducteur descendant, puis distribuez-le à travers le système de terminaison de terre. La fonction du LPS interne est d'empêcher les étincelles dangereuses et surtension à l'intérieur de la structure protégée. Ceci est réalisé par l'installation de dispositifs de surtension ou réglage de l'équipotentielle et de la délimitation de séparation entre les LPS et les parties de la structure protégée [7].

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Les LP externes sont divisés en quatre niveaux de sécurité (I, II, III, IV) pour protéger l'objet contre coups de foudre directs; le premier niveau a les exigences les plus élevées en matière de fiabilité de la protection, le quatrième l'un impose les exigences de fiabilité les plus faibles pour les mesures de protection [12]:

- I.** Le premier niveau de protection contre la foudre est utilisé pour les bâtiments et structures industriels qui appartiennent à des zones dangereuses (installations où l'extraction ou le traitement d'explosifs substances se produit). Le dimensionnement et le positionnement du système de terminaison d'air sont déterminés par des documents de réglementation de l'industrie.
- II.** Le deuxième niveau de protection contre la foudre est appliqué aux objets avec une sécurité incendie renforcée contenant des substances inflammables ou explosives. Aussi, les objets du deuxième niveau de la protection comprend les équipements électroniques sensibles aux phénomènes atmosphériques.
- III.** Le troisième niveau de protection contre la foudre est appliqué aux bâtiments et structures pour éviter incendies, destructions, ainsi que blessures et décès de personnes, dus aux effets destructeurs de la foudre frappe. Les exemples d'objets avec le troisième niveau de LP sont les jardins d'enfants, écoles, chalets, chaufferies, canalisations d'entreprises, châteaux d'eau, hôtels, gares, bâtiments résidentiels et administratifs publics d'une hauteur de 25 mètres ou plus, qui dépassent la hauteur moyenne des bâtiments environnants dans un rayon de 400 mètres.
- IV.** Le quatrième niveau de protection contre la foudre est utilisé pour les petites installations non résidentielles situées dans les zones rurales. En raison d'exigences réglementaires mineures, le quatrième niveau n'est pratiquement pas appliqué.

Les sous-stations intérieures fabriquées avec des revêtements métalliques et des matériaux conducteurs doivent être protégées par la mise à la terre de ces pièces constructives. Pour les sous-stations intérieures sans pièces conductrices, la protection doit être assurée par l'installation de paratonnerres détachés et de conducteurs maillés sur le toit de la sous-station [13]. La protection contre la foudre est connectée via les conducteurs descendants au système de mise à la terre. Typiquement, un poste de transformation se compose de trois pièces: un appareillage de tension plus élevée, un appareillage de tension plus faible et une chambre de transformateur.

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

Parfois, les appareillages sont combinés dans une salle commune. Toutes les parties conductrices de l'électricité des installations dans les salles de sous-stations, non alimentées en mode de fonctionnement normal, sont mises à la terre par MEB, qui longe les murs. Le bus de mise à la terre principal est également connecté au système de mise à la terre.

Les parafoudres sont utilisés pour protéger l'isolation des équipements des sous-stations.

I.10. Systèmes de raccordement à la terre :

Le système de terminaison de terre fait partie des LPS externes utilisés pour disperser le courant de foudre dans la terre. Il est constitué d'une ou plusieurs parties conductrices en contact avec le sol. Au total, ces conducteurs forment un dispositif de mise à la terre. L'installation d'un dispositif de mise à la terre est obligatoire dans le cas des centrales électriques et des sous-stations [14]. L'objet de recherche de ce travail est la sous-station de transformation intérieure, par conséquent, d'autres termes de système de terminaison de terre et de dispositif de mise à la terre auront la même signification.

Une bonne mise à la terre doit avoir les caractéristiques suivantes : [15]

- Faible résistance à la terre. Plus la résistance de la terre est faible, plus il est probable que le courant de foudre descendra de cette façon, ce qui permettra au courant d'être conduit en toute sécurité vers la terre puis de se dissiper. Il n'y a pas de valeur spécifiée de résistance à la terre pour chaque système de protection, mais en général, la résistance mesurée à basse fréquence ne doit pas dépasser 10 Ohms.
- Bonne résistance à la corrosion. Le choix du matériau des électrodes et de leurs connexions revêt une importance significative. Il sera enterré dans la terre pendant de nombreuses années, donc le système doit être fiable.

Il est acceptable de distinguer deux types d'agencement de système de mise à la terre: le type A et le type B : [11]

- La conception de type A se compose de tiges de mise à la terre disposées individuellement et / ou d'électrodes de terre de surface connectées à un conducteur descendant et installées à l'extérieur de la zone protégée structure, figure I.10. L'agencement de type A nécessite au moins deux électrodes. Une électrode de masse suffit uniquement en cas de tige de terminaison d'air positionnée séparément.
- L'agencement du système de terminaison de terre de type B est une électrode annulaire entourant la structure protégée, fig. I.10. Il est également possible d'inclure

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

les parties conductrices de l'objet à l'intérieur de l'anneau, par exemple des canalisations, des fondations en béton armé. L'électrode annulaire doit être en contact direct avec le sol sur au moins 80% de sa longueur totale et doit être installée à environ 1 m des murs de la structure protégée.

Le type B est recommandé en cas d'objets situés dans des endroits à faible conductivité du sol, tels que des zones rocheuses ou arides, ou des structures à haut risque d'incendie. Cette approche est également préférable, car elle assure la liaison équipotentielle entre les conducteurs descendants. Le système de type B est fortement recommandé pour les structures avec des murs non conducteurs, tels que le bois ou les briques, et sans connexion à une fondation de renforcement. [11].

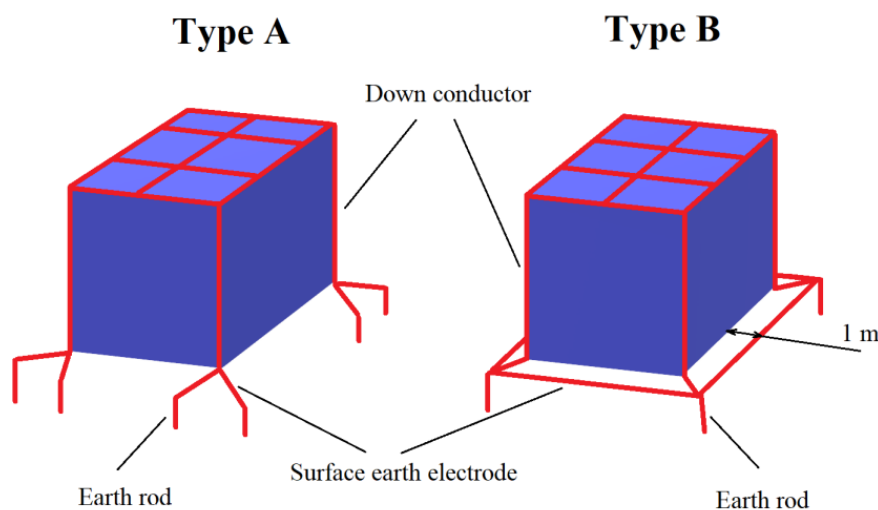


Figure I. 10: Disposition du système de raccordement à la terre de type A et de type B

Il existe de nombreuses variantes possibles de construction de systèmes de terminaison d'air pour les deux types. Le choix d'une conception particulière consiste en la satisfaction des exigences techniques et économiques.

Les exigences techniques comprennent la fourniture d'une faible résistance du réseau, des performances du système à long terme et la minimisation des risques potentiels de pas et de contact. L'exigence économique est le choix de l'option la moins coûteuse, sous réserve des exigences techniques.

I.11. Tension de pas et Tension de toucher

La tension tactile se produit entre deux points du circuit de circulation du courant, qui est fermé par un toucher simultané de la personne. L'un de ces points est généralement le conducteur

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

descendant sous le coup de foudre ou un boîtier d'installation électrique sous la tension due à un défaut de conducteur de phase sur celui-ci. Le deuxième point est la surface conductrice à potentiel nul. La tension de pas résulte du courant traversant la terre et signifie une différence de potentiel entre deux points de la terre situés à la distance d'un pas considérée comme égale à un mètre. La tension de pas et de contact dépend du gradient de potentiel de la terre, comme illustré à la figure I.11. Plus la distance par rapport au point de potentiel maximal est grande, moins il y a de risque de choc électrique. [13].

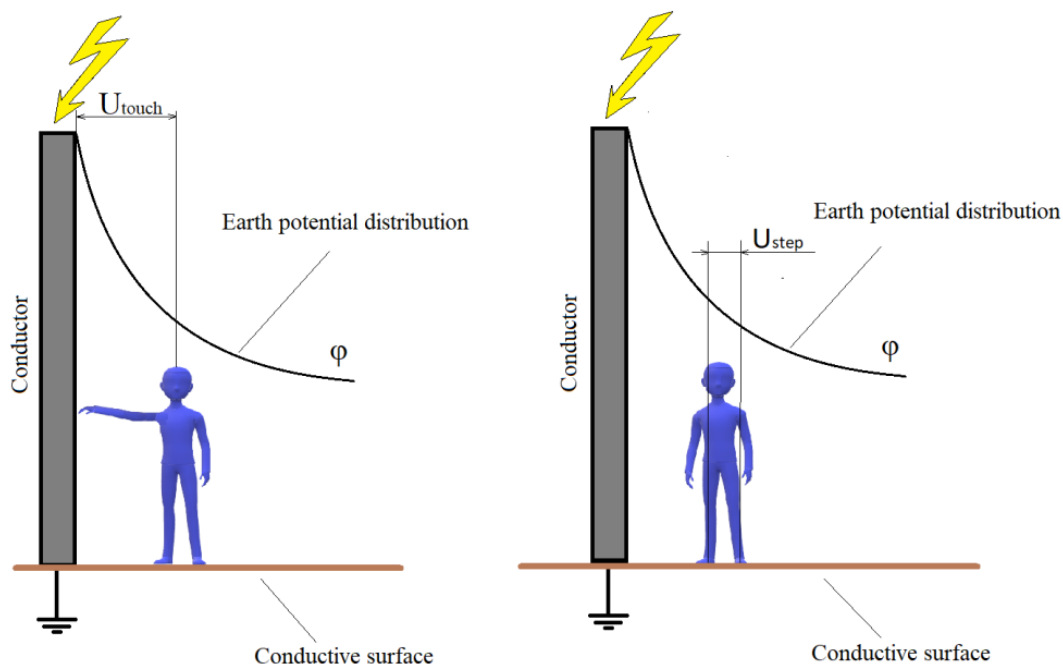


Figure I. 11 : Démonstration de la tension de contact et de pas apparaissant

En cas de défaut ou de foudre, de nombreuses surfaces équipotentielles apparaissent sur le territoire de la structure protégée. En fonction de la classe de tension de la structure protégée et du mode de fonctionnement neutre, la tension tactile a différentes valeurs maximales admissibles et durées d'exposition. Par exemple en cas de mode d'urgence d'installations électriques industrielles avec une tension jusqu'à 1 kV avec un neutre isolé ou à faible masse et au-dessus de 1 kV avec un neutre isolé, une tension tactile de 20 V est une valeur acceptable avec une durée d'exposition illimitée. [16].

La protection de l'homme contre les risques de choc électrique, en cas de contact ou de tension de pas, est la tâche de la conception et du dimensionnement appropriés du système de mise à la terre. Système de mise à la terre et relais fonctionnant correctement la protection doit défendre

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

les humains, les équipements électriques et les biens matériels en cas de défauts ou de surtensions.

I.12. Régime de neutre :

Les caractéristiques techniques des installations électriques et les réseaux électriques qui les alimentent déterminent l'utilisation de différents types de systèmes de mise à la terre. Type de système de mise à la terre est compris comme un indicateur caractérisant la relation à la terre des parties conductrices neutres ouvertes du récepteur d'énergie électrique et neutre dans les installations électriques jusqu'à 1 kV. [9]

Le mode de mise à la terre du neutre est généralement indiqué par deux lettres : la première lettre indique l'état de mise à la terre de la source d'alimentation par rapport à la terre (transformateur de puissance 10/0,4 kV), la deuxième lettre définit l'état des parties conductrices ouvertes par rapport à la terre.

Les notes utilisent les premières lettres des mots français :

- T – mise à la terre (terre – terre);
- I – isolé (isole – isolé);
- N – neutre (neutre – neutre) – connecté au neutre de la source d'alimentation.

Pour les installations électriques avec une tension allant jusqu'à 1 kV, la Commission électrotechnique internationale fournit trois modes de mise à la terre neutre. Les modes spécifiés sont résumés dans le tableau. [9].

Mode de mise à la terre	Description
TN	Système dans lequel la source d'alimentation neutre est solidement mise à la terre, les boîtiers d'installation électrique sont connectés au fil neutre.
TT	Système dans lequel les boîtiers d'installation neutre et électrique de la source d'alimentation sont solidement mis à la terre. Les neutres peuvent être connectés à différents dispositifs de mise à la terre.

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

IT	Système dans lequel le neutre d'équipement d'approvisionnement est isolé ou mis à la terre par des dispositifs à haute résistance, les cas d'installation électriques sont solidement mis à la terre.
-----------	---

Tableau 2 : Mode de fonctionnement neutre. [17]

À son tour, le mode de mise à la terre du neutre – TN peut être de trois types, tableau 3. [17]

Mode de mise à la terre	Description
TN-C	Système TN dans lequel les conducteurs de protection – PE et neutre – N sont combinés en un seul conducteur sur toute la longueur du système. Le conducteur combiné est appelé PEN.
TN-S	Système TN dans lequel les conducteurs protecteurs et neutres sont isolés les uns des autres.
TN-C-S	Système TN dans lequel les conducteurs protecteurs et neutres sont regroupés en un seul conducteur à la section avancée, mais ils sont également séparés.

Tableau 3: Types de modes de fonctionnement des neutres TN.

Les noms de mode de mise à la terre neutre sont souvent attribués aux réseaux, donc pour plus de commodité, le réseau et le mode de mise à la terre neutre auront la même signification.

Il convient de noter que les modes de fonctionnement neutres sont largement déterminés : [9]

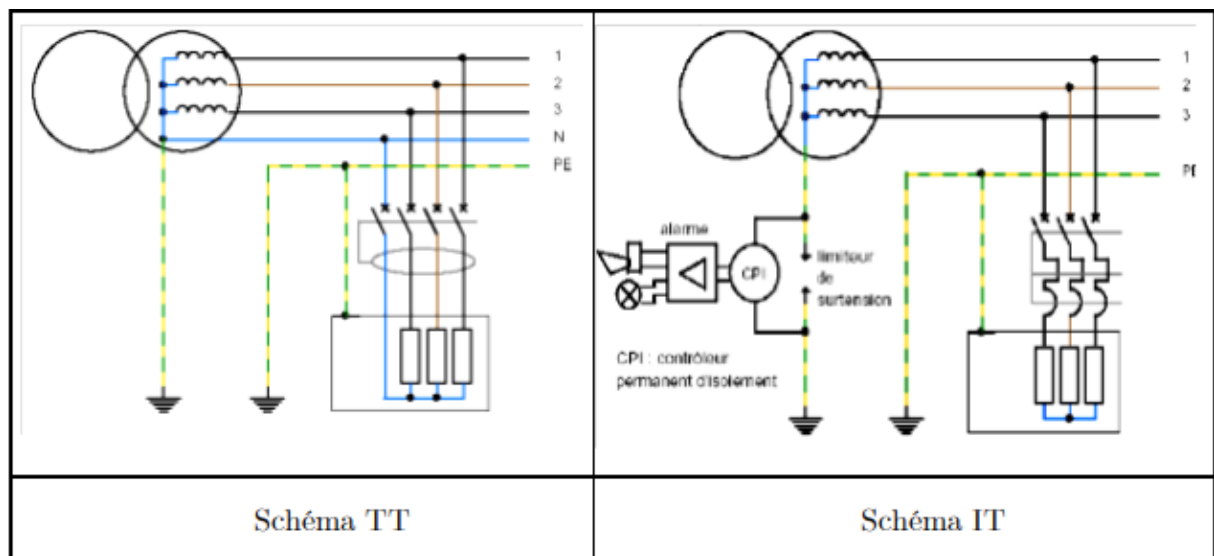
- conditions de sécurité du travail dans les réseaux électriques, protection contre la menace de choc électrique;
- les valeurs de surtension et les moyens de les limiter;
- compatibilité électromagnétique en mode normal et en mode d'urgence;
- Sécurité-incendie (probabilité d'incendie en raison de défauts);

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

- Courants aux court-circuit monophasés, endommagement et sélection de l'équipement électrique;
- Alimentation sans interruption;
- Processus de conception et d'exploitation du réseau.

On notera les avantages et les inconvénients des modes de fonctionnement neutres existants dans les réseaux 0,4 kV, les caractéristiques énumérées ci-dessus sont choisies comme critères de comparaison.

La connexion du neutre à la terre peut être réalisée directement, ou par l'intermédiaire d'une résistance ou d'une réactance. Les 4 types de liaisons sont donnés sur la figure I.12. Dans le premier cas, on dit que le neutre est mis directement à la terre et dans le second cas, que le neutre est mis à la terre par une impédance. Lorsqu'il n'existe aucune liaison entre le point neutre et la terre, on dit que le neutre est isolé.



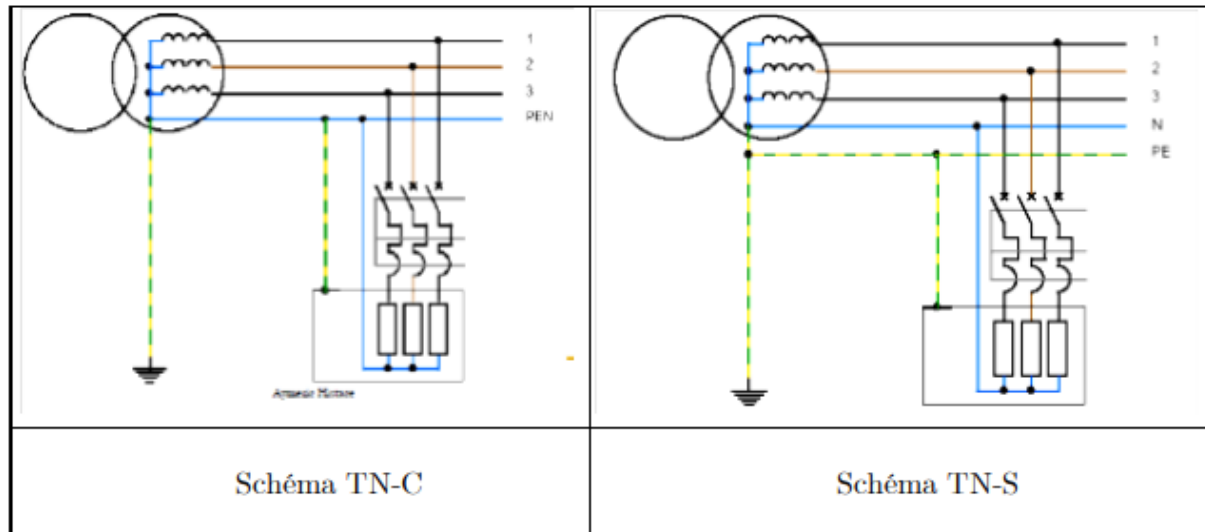


Figure I. 12: Schémas de liaison à la terre en basse tension

I.13. Les 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 :

I.13.1. Claquage :

- Le claquage est un phénomène se produit lorsque la tension dépasse la tension d'isolement.
- Il est souvent produit entre un conducteur actif et des masses métalliques reliées à la terre.
- Le claquage dans l'air se manifeste par l'amorçage d'un arc et crée un dépassement de la tension d'isolant d'air, c'est le cas pour deux circuit imprimés voisins.

I.13.2. Perturbation de fonctionnement :

- Fonctionnement aléatoire des bascules, thyristors ou triacs.
- Effacement de mémoire.
- Erreur ou blocage de programme informatique.

Chapitre I: Description du système de la protection contre la foudre et de mise à la terre

- Erreur de données ou de transmission.

I.13.3. Vieillesse prématurée :

- Les composants exposés aux surtensions ont une durée de vie réduite.

I.13.4. Danger pour les personnes :

- Les pics des surtensions de très courtes durées sont assimilables à une décharge d'électricité désagréable mais inoffensive.
- L'écoulement des charges de foudre à la terre peuvent introduire un certain danger pour les personnes (la tension de pas, élévation de potentiel de certaines masses métalliques). [5]

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la phénoménologie de la foudre, qui démontre que ce phénomène est trop dangereux surtout pour les lignes de transport d'énergie électrique.

Les foudres peuvent causer des dégâts très importants au niveau des installations électriques ce qui exige obligatoirement une protection efficace qu'est l'objet du deuxième chapitre dans ce mémoire.

Chapitre II:

Analyse et gestion de risque de foudre

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

II.1. Introduction

L'objectif principal de l'évaluation des risques est de déterminer si une protection supplémentaire est nécessaire ou non. S'il est nécessaire que de définir des mesures de protection, Des mesures de protection peuvent être mises en œuvre même lorsque la gestion des risques montre que ce n'est pas nécessaire. Dans ce chapitre, la modélisation mathématique et le calcul de risque est effectué sous Excel. [18]

II.2. Description de la structure protégée :

Il s'agit d'un poste électrique 30/0,4 kV situé à l'intérieur de l'université de Sidi Ammar, Annaba. Avec un transformateur abaisseur à l'intérieur.

Pour la représentation visuelle, un fragment de ce réseau est illustré dans la fig **II.1**.

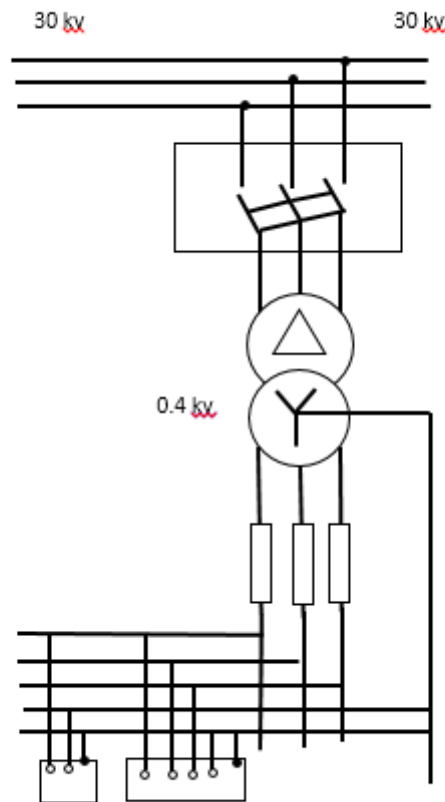


Figure II. 1: Schéma simplifié du poste électrique.

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre



Figure II. 2: Photo du poste de l'extérieur, situé à l'université sidi Ammar, Annaba.

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre



Figure II. 3: Photo du poste à l'intérieur

Dans cette figure, le poste 30/0,4 kV alimentant les consommateurs fonctionnent sur un seul système de jeu de barre.

Le poste considéré se compose des principaux composants suivants :

- Un transformateur à huile 30/0,4 kV d'une puissance de 400 kVA. (Fiche technique en Annexe 1).
- Appareillage moyenne et basse tension 30 kV et 0,4 kV, respectivement.

II.3. Analyse du risque foudre :

- Soit de s'assurer que les mesures de protection de la structure et des services sont suffisantes pour que le risque reste acceptable à une valeur tolérée ;
- Soit de déterminer le besoin de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection.

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Le processus d'évaluation des risques peut être présenté sous la forme d'un organigramme

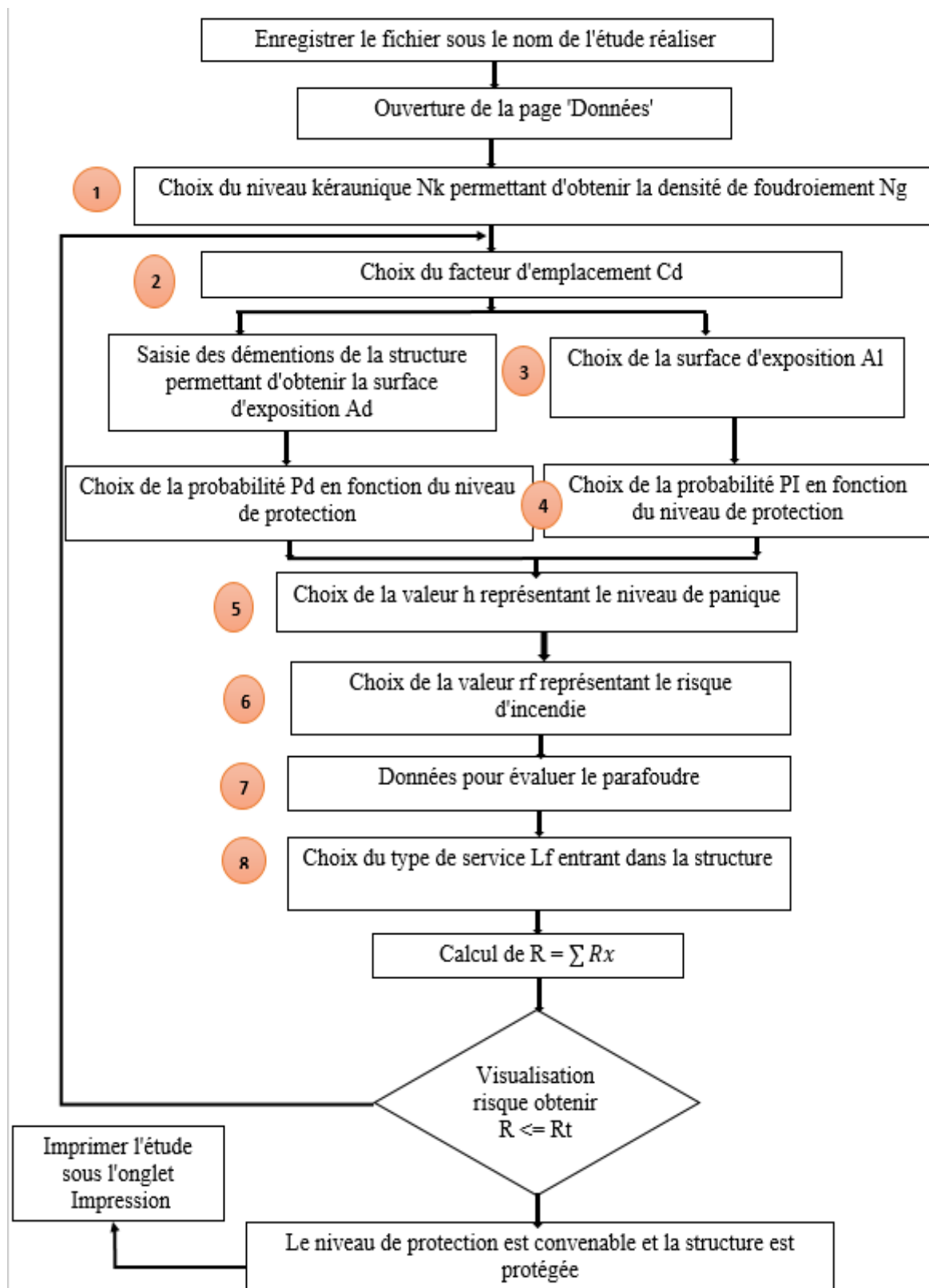


Figure II. 4: Organigramme de la gestion de risque.

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

II.4. Niveau kéraunique (NK) :

D'après (Fig II.5) des courbes isokérauniques mondiales on a remarqué que, le nombre de jours orageux par année, où on entend le tonnerre au Nord d'ALGÉRIE est égal à 20. Alors pour la région de ANNABA $NK = 20$ (jours orageux/année). [19]

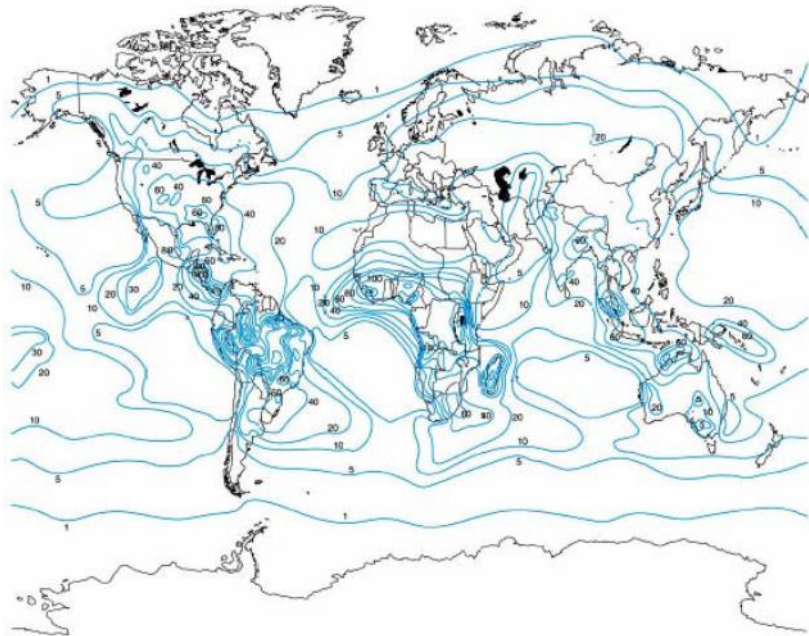


Figure II. 5: Courbes isokérauniques mondiales.[20]

II.5. Définition des risques à évaluer :

Le risque R est la valeur d'une perte moyenne annuelle probable. Pour chaque type de perte qui peut apparaître dans une structure ou un service, le risque correspondant doit être évalué.

Les risques à évaluer dans une structure peuvent être les suivants : [18].

- R1 : Risque de perte de vie humaine ;
- R2 : Risque de perte de service public ;
- R3 : Risque de perte d'héritage culturel ;
- R4 : Risque de perte de valeurs économiques.

Pour évaluer les risques R, les composantes appropriées du risque (risques partiels dépendant de la source et du type de dommage) doivent être définies et calculées.

Dans notre cas, seul le risque R1 fera l'objet d'une évaluation.

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

II.6. Calcul de la fréquence des événements dangereux :

La fréquence des incidents dangereux provoqués par des coups de foudre directs sur la structure peut être Calculé par la formule suivante : [7]

$$Nd = Ng \times Ad \times Cd \times 10^{-6}$$

$$Nd = 2 \times 599 \times 0.5 \times 10^{-6}$$

$$Nd = 0.000599$$

Avec :

AD : la surface de collecte équivalente de la structure.

CD = 0,5 – facteur de localisation (tenir compte de l'influence des objets environnants).

NG – nombre de coups de foudre par an pour 1 km².

NG $\approx$ 2.

La zone de collecte peut être calculée par la formule suivante [11] :

$$Ad = L \times W + 6H(L + W) + 9\pi(H^2)$$

$$Ad = 5.43 \times 4.76 + 3.55(5.43 + 4.76) + 9\pi(3.55^2)$$

$$Ad = 599 \text{ m}^2$$

Où L, W, H – respectivement longueur, largeur et hauteur de la structure.

L, W et H exprimés en mètres, étant les dimensions de la structure considérée.

II.7. Choix du facteur d'Emplacement Cd:

Facteur d'Emplacement Cd :

L'emplacement relatif de la structure dépendant des objets environnants ou d'exposition de la structure :

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Emplacement relatif de la structure	Structure entourée par des objets plus hauts	Structure entourée par des objets où des arbres de la même hauteur ou plus petits	Structure isolée pas d'autres objets à proximité (dans un rayon égal à $3 \cdot H$ où $3H_p$ selon le cas)	Structure isolée au sommet d'une colline ou sur un monticule
Cd	0.25	0.5	1	2

Tableau 4: Valeurs des facteurs d'emplacement cd [7]

II.8. Risque d'un impact sur une structure :

Surface d'exposition d'une structure isolée (Ad) :

Les dimensions maximales de la structure sont :

Hauteur de la tour (H_p)	0	m
Longueur (L)	5.43	m
Largeur (W)	4.76	m
Hauteur (H)	3.55	m
Surface (Ad)	599	m ²

Tableau 5: Les dimensions maximales de la structure

Nombre annuel moyen d'impact sur une structure (Nd):

$$N_d = 5.99 \times 10^{-4}$$

Évaluation du nombre annuel moyen d'impact sur une structure NI :

Choix de la Surface d'exposition d'une structure isolée (AI) :

	Service Aérien	Service Enterré	Pas de ligne connectée
AI=	40000 m ²	20000 m ²	0

Tableau 6: Zones équivalentes d'exposition AI en fonction des caractéristiques du service

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Nombre annuel moyen d'impacts sur un service (NI) :

$$N_I = A_I \times Cd \times 10^{-6}$$

$$N_I = 20000 \times 0.5 \times 10^{-6} = 0.02$$

Valeurs de PD en fonction des mesures de protection:

Caractéristiques de la structure	NPF	Pd
Structure non protégée par SPF	—	1
Structure protégée par un SPF	IV	0.2
	III	0.1
	II	0.05
	I	0.02

Tableau 7: Valeurs de P_D en fonction des mesures de protection

Choix de probabilité :

$$P_d = 0,2$$

Valeur de probabilité P_I en fonction des niveaux de protection pour lesquels le parafoudre est conçu :

N_p	P_I	$I_{imp\ mini}$
Pas de parafoudre à l'entrée du service dans la structure	1	
III-IV	0.05	12.5
II	0.02	20
I	0.01	25

Tableau 8: valeur de probabilité P_I en fonction des niveaux de protection pour lesquels le parafoudre est conçu

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Choix de probabilité:

$$PI = 0,05$$

Le parafoudre choisi est de type $I_{imp} = 12,5 \text{ kA}$

Valeurs de r_f :

Le risque d'incendie dans une structure est un facteur important pour déterminer les mesures de protection nécessaires

Risque d'incendie	r_f
Elevée	0.10
Ordinaire	0.01
Faible	0

Tableau 9: Valeurs de r_f

$$r_f = 0,01$$

Valeurs de h_z :

Type de danger pour les personnes	h_z
Pas de danger particulier	1
Faible niveau de panique (par exemple structure limitée à deux étages et nombre de personnes inférieur à 100)	2
Niveau de panique moyen (par exemple structures destinées à des événements culturels ou sportifs avec un nombre de personnes compris entre 100 et 1 000)	5
Difficulté d'évacuation (par exemple structures avec personnes immobilisées, hôpitaux)	5
Niveau de panique élevé (par exemple structures destinées à des événements culturels ou sportifs avec un nombre de personnes supérieur à 1 000)	10

Tableau 10: Valeurs de h_z

Choix du type de danger :

$$H_z = 2$$

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Valeurs de L_f pour le risque R1 :

Occupation de la structure	L_f
Structure normalement occupée	0.1
Structure in occupée	0.01

Tableau 11: Valeurs de L_f pour le risque R_1

$$L_f(R1) = 0,01$$

Valeurs de L_f pour le risque R2 :

Type de service	L_f
Gaz, eau	0.1
TV, Communication, Electricité, Radio	0.01

Tableau 12: Valeurs de L_f pour le risque R_2

$$L_f(R2) = 0,01$$

Valeurs de L_f pour le risque R3 :

$$L_f(R3) = 0,001$$

Calcule risque de perte de vie humaine:

R_{D1}	N_D	P_D	h	rf	L_f
2,40E-08	5,99E-04	0,2	2	0,01	0,01

$$R_{D1} = N_D * P_D * h * rf * L_f$$

R_{I1}	N_I	P_I	h_z	L_f	rf
2,00E-07	2,00E-02	0,05	2	0,01	1,00E-02

$$R_{I1} = N_I * P_I * h_z * rf * L_f$$

R1
2,24E-07

$$R_1 = R_{D1} + R_{I1}$$

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

Calcule risque de perte de service public:

R_{D2}	N_D	P_D	R_f	L_f
1,20E-08	5,99E-04	0,2	0,01	0,01

$$R_{D2} = N_D * P_D * r_f * L_f$$

R_{I2}	N_I	P_I	r_f	L_f
1,00E-07	2,00E-02	0,05	1,00E-02	0,01

$$R_{I2} = N_I * P_I * r_f * L_f$$

R_2
1,12E-07

$$R_2 = R_{D2} + R_{I2}$$

Calcule risque de perte d'héritage culturel:

R_{D3}	N_D	P_D	r_f	L_f
1,20E-09	5,99E-04	0,2	1,00E-02	0,001

$$R_{D3} = N_D \times P_D \times r_f \times L_f$$

R_{I3}	N_I	P_I	r_f	L_f
1,00E-08	2,00E-02	0,05	1,00E-02	0,001

$$R_{I3} = N_I \times P_I \times r_f \times L_f$$

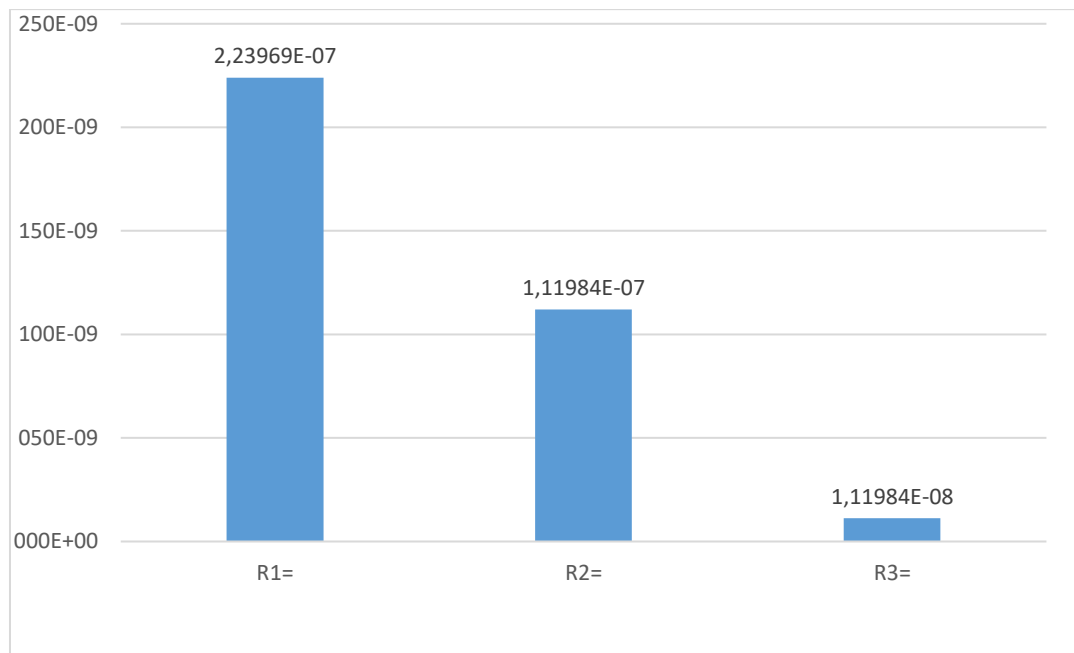
R_3
1,12E-08

$$R_3 = R_{D3} + R_{I3}$$

- R_t vaut 10^{-5} pour le risque R_1
- R_t vaut 10^{-3} pour le risque R_2
- R_t vaut 10^{-4} pour le risque R_3

Chapitre II: Analyse et gestion de risque de foudre

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS :



- Dans ces conditions le risque de perte de vie humaine R1 **acceptable** ($R1 < RT$) :

$$2,24E-07 < 10^{-5}$$

- Dans ces conditions le risque de perte de service public R2 **acceptable** ($R1 < RT$) :

$$1,12E-07 < 10^{-3}$$

- Dans ces conditions le risque de perte d'héritage culturel R 3 **acceptable** ($R1 < RT$) :

$$1,12E-08E-07 < 10^{-4}$$

II.9. Conclusion :

L'objectif principal de l'évaluation des risques est de déterminer si une protection est requise ou non. Principalement les étapes de gestion des risques pour les recherches l'objet a été défini, puis le modèle de calcul basé sur ces étapes a été créé. Les résultats de l'évaluation des risques pour le poste considéré ont montré que ce dernier ne nécessite pas une protection spécifique contre la foudre selon les données introduites du site.

Chapitre III:
Conception d'un système
de Mise à la terre

III.1. Introduction :

Un des problèmes les plus importants qui doit être considéré dans la construction d'une sous-station (une centrale, un poste électrique, ...), est de concevoir un système de mise à la terre efficace et sécurisé même dans les périodes les plus défavorables.

Un bon système de mise à la terre a une faible résistance pour réduire au minimum l'élévation de potentielle de terre (EPT). Afin que le réseau de terre soit sûr, il doit permettre l'écoulement des courants électriques dans le sol dans des conditions normales et pendant le défaut. En outre, il doit assurer qu'une personne à proximité ne serait pas mise en danger. Puisqu'il n'y a aucune relation simple entre la résistance du système de terre et le courant maximum de choc qu'une personne peut éprouver, une analyse complète doit être faite pour considérer tous les différents aspects tels que l'endroit des électrodes, les caractéristiques de sol, la surface, etc ... [21].

La démarche à suivre peut se faire selon les étapes de la norme [IEEE 80-2000]. Nous détaillons, par la suite, les calculs relatifs à une telle conception dans le cas d'une grille rectangulaire sous le logiciel Cymgrd.

III.2. Principe de conception d'un système de mise à la terre selon la norme IEEE 80-2000

Etape 1 : Détermination de la résistivité du sol (ρ) et dimension de la grille (Surface ainsi sa forme

La conception du réseau de terre commence nécessairement par une étude géologique du sol de l'ouvrage, elle nécessite de connaître la structure générale du circuit de terre (la surface, la forme...). Un essai de résistivité du sol permettra de déterminer le profil de résistivité du sol et son modèle.

Etape 2 : Calcul du courant de défaut $3I_0$, durée du défaut t_c et section du conducteur d

La section de conducteur (S) est déterminée par l'équation (III.1). Le courant de défaut $3I_0$. Donné par l'équation (III.2), devrait être le courant maximum de défaut prévu, qui sera conduit par n'importe quel conducteur dans le système de mise à la terre. Pour estimer la taille de conducteur de terre, le temps t_f devrait refléter le temps maximum d'élimination du défaut.

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

$$s = I_G \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}{TCAP \cdot 10^{-4}} \ln \left[1 + \frac{T_m - T_a}{k_0 + T_a} \right]} \quad \text{III. 1}$$

$$3I_0 = \frac{V}{3R_g + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad \text{III. 2}$$

t_c : la durée normalisée de court-circuit (s).

I_G : le courant maximum de la grille (kA).

I_0 : la composante homopolaire du courant de défaut (A).

T_m : La température maximale admissible par le conducteur en C°.

α_r : le coefficient thermique de résistivité

TCAP: le facteur de chaleur spécifique (J/cm³/°C).

T_a : la température ambiante en °C.

ρ_r : la résistivité du conducteur à 20°C en $\mu\Omega \cdot \text{cm}^3$.

K_0 : le coefficient thermique de conductivité du conducteur à 0°C.

R_g : la résistance de la grille (Ω).

R_0, R_1, R_2 : les résistances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω).

X_0, X_1, X_2 : les réactances homopolaire, direct et inverse lors d'un défaut dissymétrique (Ω).

V: la tension simple phase-neutre (V).

Etape 3 : Calcul des tensions de pas et de contact admissibles

Les tensions maximales tolérables de pas et de contact peuvent être calculées de manière empirique à partir de la norme IEEE 80-2000 :

La tension de contact admissible est donnée par :

$$V_{T \max} = (R_B + \frac{R_f}{2}) I_b$$

La tension de contact admissible pour des personnes pesant 50 ou 70 kg; respectivement, est défini comme suit :

$$E_{touch \max 50kg} = [(1000 + 1,5 \times C_S \times \rho_S) \times \frac{0,116}{\sqrt{t_c}}]$$

$$E_{touch \max 70kg} = [(1000 + 1,5 \times C_S \times \rho_S) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_c}}]$$

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

De même, la tension équivalente permise (tolérable) de pas est donnée par :

$$V_{S\max} = (R_B + 2R_f)I_b$$

La tension de pas admissible pour des personnes pesant 50 ou 70 kg; respectivement, est défini comme suit :

$$E_{pas\max\ 50kg} = [(1000 + 6C_s\rho_s)] \frac{0,116}{\sqrt{t_c}}$$

$$E_{pas\max\ 70kg} = [(1000 + 6C_s\rho_s)] \frac{0,157}{\sqrt{t_c}}$$

Tels que :

I_b : courant tolérable par le corps humain (A).

R_B : résistance du corps humain (Ω) ($R_B=1000\ \Omega$).

R_f : résistance de terre d'un pied (Ω).

ρ_s : résistivité de la couche superficielle ($\Omega.m$).

C_s : facteur de réduction en présence de la couche superficielle:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09}$$

h_s : L'épaisseur du matériau de la couche de surface de haute résistivité en m.

Etape 4 : Conception initiale

L'analyse conceptuelle d'un réseau de terre commence habituellement par l'inspection du plan de disposition de sous-station, et dessiner la forme de mise à la terre, Les évaluations initiales d'espacement entre le conducteur et l'emplacement des piquets, devraient être basées sur le courant maximal de la grille I_G et la surface de la sous-station.

$$D = \frac{2 \cdot L_X \cdot L_Y}{L_C - L_X - L_Y}$$

Où :

L_C : longueur totale des conducteurs de terre

L_x : longueur du poste

L_y : largeur du poste.

$$L_C = N_X L_X + N_Y L_Y$$

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

Etape 5 : Détermination de la résistance de la grille

Les évaluations préliminaires de la résistance du système de mise à la terre R_g peuvent être déterminées.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

ρ : Résistivité du sol

L_T : longueur totale des conducteurs de réseau de terre (m)

h : profondeur d'enfouissement (m)

A : Surface de la grille (m^2)

Etape 6 : Calcul du courant I_G de la grille

Le courant maximum de grille est le courant qui traverse la grille à la terre est calculé par Equation :

$$I_g = D_f \times S_f (3I_0)$$

Où :

D_f : Facteur de décroissance pour la durée du défaut t_c .

S_f : Facteur de division du courant de défaut.

Etape 7 : Elévation du potentiel de terre (EPT)

$$EPT = I_G \cdot R_g$$

Etape 8 : Calcul de la tension de maille E_m et de la tension de pas E_s actuel.

Les calculs de la tension de maille et celle de pas, relatives à la grille, peuvent être faits en utilisant les équations:

La tension de maille est donnée par :

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M}$$

I_G : Courant maximum de la grille

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

K_i : Facteur d'irrégularité

L_m : Longueur totale des conducteurs et piquets enterrés $L_M = L_C + L_R$

La tension de pas actuel est donnée par :

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

L_c : Longueur totale des conducteurs (m) ;

L_R : Longueur totale des piquets de terre (m) ;

L_s : Longueur efficace enfouie dans la terre pour une grille (avec piquets) :

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R$$

K_m : Facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de maille, donné par l'équation suivante :

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \times \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D + 2 \times h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times n - 1)} \right] \right]$$

et :

avec piquets $K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$

h : profondeur d'enfouissement (m) ;

$h_0=1m$: profondeur de référence (m) ;

D : espacement entre les conducteurs parallèles de la grille (m);

d : diamètre des conducteurs de la grille (m) ;

n : facteur géométrique ($n=11$ pour une grille carrée)

K_i : Coefficient d'irrégularité de la grille exprimé par la relation suivante :

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

K_m : Facteur de correction géométrique du circuit pour déterminer la tension de maille

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

K_s : Facteur de correction géométrique du circuit permettant de déterminer la tension de pas

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Etape 9 :

Si, la tension calculée de maille est au-dessous de la tension tolérable de contact, la conception peut être complétée pour relier les équipements au système de mise à la terre. Sinon, la conception préliminaire devrait être modifiée (modification de la taille des mailles, de la profondeur du circuit ou de l'adjonction des piquets).

Etape 10 :

Si, les deux tensions de contact et de pas, sont au-dessous des celles maximales, la conception a besoin seulement des améliorations exigées pour relier les équipements au système. Sinon, une modification de l'espacement de conducteur (la taille des mailles, l'adjonction de piquets, la profondeur du circuit de terre, etc.) devrait être faite.

Etape 11 :

Si, la vérification des tensions exige des modifications, la révision de la conception de grille est nécessaire. Ces révisions peuvent se faire sur l'espacement de conducteur, pour satisfaire les limites de tensions de pas et de contact.

Etape 12 :

En respectant les limites des tensions de pas et de contact, la conception finale peut être réalisée.

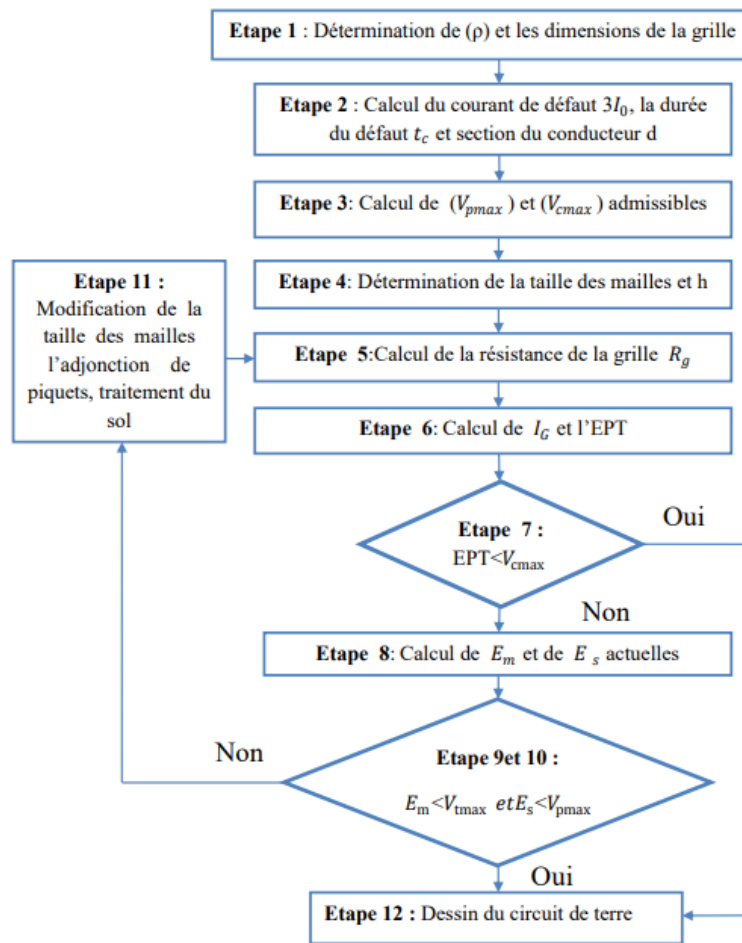


Figure III. 1: Organigramme de la conception d'un SMT selon IEEE 80-2000 [22].

III.3. Logiciel de simulation CYMGrd

III.3.1. Présentation de CYMGrd :

CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations de mise à la terre de postes électriques de base du logiciel CYME.

Il existe d'autres modules du CYME, à savoir, Cymdist, progiciel d'analyse de réseaux de distribution [23] [24] [25] [26].

Le logiciel CYMGrd est un programme d'analyse et de conception d'installations efficaces de mise à la terre développé pour aider les ingénieurs à optimiser la conception de leurs nouvelles grilles et à renforcer les grilles de toute géométrie déjà existantes grâce à des outils intégrés de repérage de zones à risque ou dangereuses et à sa facilité d'utilisation. Le logiciel CYMGrd permet l'analyse rapide de différentes alternatives de conception et de choisir la solution la plus économique pour n'importe quelle installation donnée. Le programme répond aux normes IEEE 80-2000, IEEE 81-1983 et IEEE 837-2002 [27].

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

III.3.2. Fonctions analytiques :

- Analyse d'éléments finis pour la grille de mise à la terre, pour l'agencement des piquets de terre et pour l'assemblage des électrodes de mise à la terre.
- Calcul de la résistance du poste électrique (R_g) et de l'élévation du potentiel à la surface du sol (EPT).
- Calcul des potentiels de pas et de contact maximum admissibles, à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre de la grille, et représentation en 2D ou 3D et affichage en couleurs.
- Analyse de la tension de pas.
- Modélisation de sols uniformes ou stratifiés en deux couches de résistivités différentes à partir des mesures prises sur le terrain ou des valeurs définies par l'utilisateur.
- Calcul du facteur de réduction (C_s).
- Bibliothèque comportant les matériaux les plus courants à la surface du sol et bibliothèque de valeurs typiques de résistivité du sol dans un poste.
- Module d'analyse de la sécurité calculant les potentiels de pas et de contact maximum admissibles, selon la norme IEEE 80-2000.
- Facteur de division du courant (S_f) estimé à partir des données de configuration du poste, selon la norme IEEE 80-2000.
- Calcul du facteur de décrémentation (D_f) à partir du rapport (X/R) de la barre et des données sur la durée du choc, conformément à la norme IEEE 80-2000.
- La prise en compte, lors du calcul, de la composante du courant de défaut asymétrique.
- Analyse des électrodes pour le dimensionnement optimal des conducteurs et des piquets basés sur les matériaux utilisés pour les électrodes les plus utilisés, tel que stipulé dans les normes IEEE 80-2000 et IEEE 837-2002.
- Support des grilles de conducteurs symétriques ou asymétriques de toute forme.
- Piquets de terre placés de façon arbitraire.
- Modélisation d'électrodes absorbant les courants de retour à la terre (électrodes de retour) et différents types d'électrodes.
- Possibilité de modéliser des électrodes enrobées de béton.
- Calcul du courant de défaut monophasé à terre admissible pour une grille déterminée.

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

III.3.3. Modules d'analyse de CYMGrd :

CYMGrd fait les analyses en se basant sur les modules suivants :

Module d'analyse du sol (inclut l'évaluation de sûreté) :

Pour un sol à deux-couche, une couche uniforme, ou un modèle de sol défini par l'utilisateur. CYMGrd trace la résistivité mesurée et calculée sur le même graphique pour permettre la vérification facile de la qualité du modèle de sol. Les tensions maximales permises de pas et de contact sont calculées selon la norme IEEE 80-2000.

Les résultats sont automatiquement communiqués aux autres modules.

Module de classement par taille d'électrode

Ce module détermine la taille minimale requise d'électrode (conducteur et/ou tige) selon la norme IEEE 80-2000. Pour déterminer la taille d'électrode, CYMGrd emploie les paramètres du matériel d'électrode et de la température ambiante. Les utilisateurs peuvent choisir un ou plusieurs des matériaux à partir de la bibliothèque de CYMGrd.

III.3.4. Analyse de sécurité :

Cette option permet à l'utilisateur d'estimer les tensions permises maximum de contact et de pas dans des états spécifiques de surface et d'exposition. Les calculs d'évaluation de sûreté sont conformes à la pratique nord-américaine standard comme décrit dans le guide IEEE pour la sûreté dans les sous-stations à courant alternative', Edition 2000. Cette norme exige les données suivantes :

- Poids corporel de la victime de choc (par défaut égal à 70 kilogrammes, avec une alternative de 50 kilogrammes).
- L'épaisseur et la résistivité du matériel (c.-à-d. pierres concassées) sur la surface du sol d'indigène de station.
- La résistivité des couches supérieures et inférieures, et l'épaisseur de la couche supérieure du sol indigène (matériel extérieur additionnel exclu).
- La durée de choc (0,1 seconde par défaut).

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

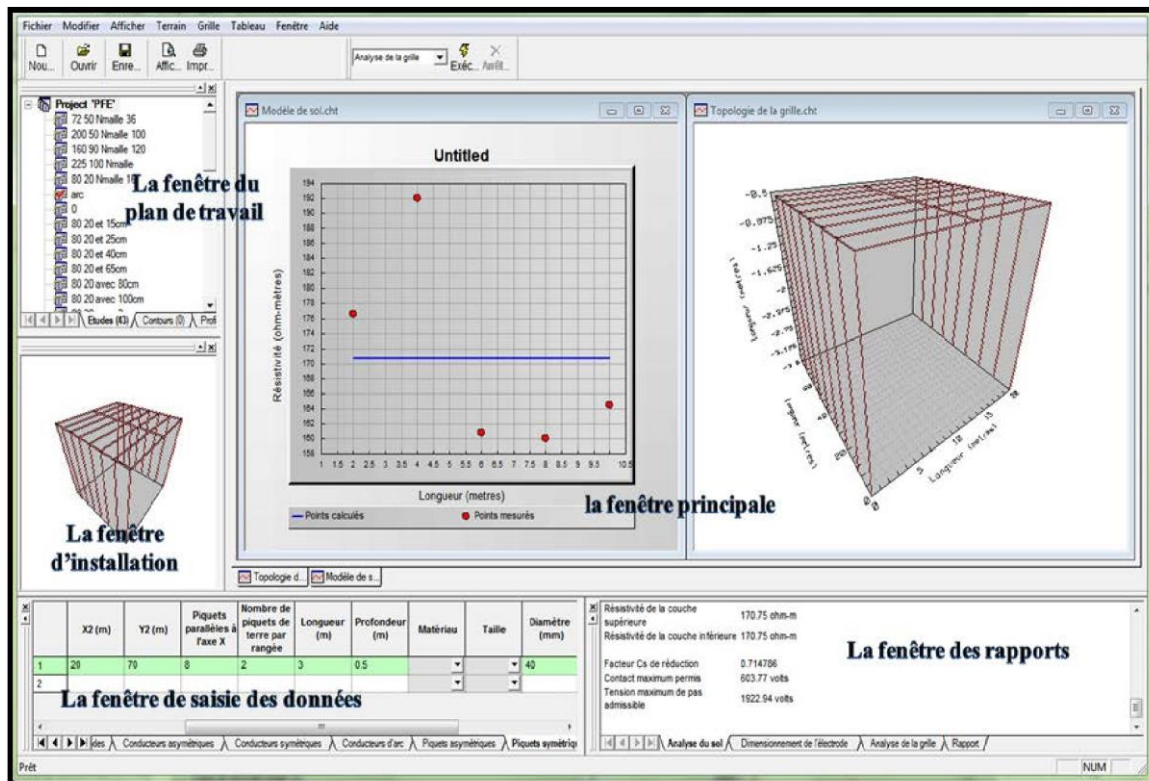


Figure III. 2: Disposition des fenêtres dans CYMGRD lors de l'ouverture d'un projet

III.4. Application :

- Dans cette application, la grille de mise à la terre est carrée et symétrique (mailles de même surface).
- Il mesure 76,2 mètres de long et 76,2 mètres de large.
- Tous les conducteurs sont enterrés à une profondeur de 0,5 mètre.
- Neuf conducteurs sont parallèles à l'axe X et neuf parallèles à l'axe Y.
- Le diamètre de tous les conducteurs est de 19,1 millimètres.
- 25 piquets de mise à la terre sont connectés à la grille de mise à la terre au niveau du périmètre.
- Les tiges mesurent 10,9 mètres de long et ont un diamètre de 2,858 centimètres (1-1/8 pouces).
- La résistivité de la couche superficielle $\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

- Modèle de sol à deux couches, la résistivité du sol $\rho = 100\Omega \cdot m$
- Le courant de défaut total est de 4 000 ampères, mais comme l'impédance équivalente des câbles aériens n'est pas infinie (9 999 ohms), la totalité de ce courant ne contribuera pas à l'augmentation du potentiel de la station.

Il n'y a pas de terrain auxiliaire à proximité et la clôture de la gare est à négliger, car maintenant L'installation de mise à la terre est en parallèle avec une résistance de 25 ohms, simulant la présence d'un câble aérien et d'une résistance de contrepoids. Cet exemple montre comment construire la station à partir de zéro avec toutes les mesures de résistivité effectuées dans la même direction, en utilisant la technique Wenner, afin de déterminer les caractéristiques du sol.

Données de terrain :

Dans cette démonstration, nous supposons une disposition préliminaire d'une grille rectangulaire de 76.2m x 76.2m, La surface occupée est :

$$A = 76.2 \times 76.2 = 5806.44 m^2$$

Tensions de contact et de pas maximales admissible

Calcule facteur de réduction en présence de la couche superficielle:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{100}{2500}\right)}{2 \times 0.2 + 0,09} = 0.824$$

Pour calculer les tensions de pas et de contact tolérables telle que le poids de la personne devrait être 70 kg, respectivement comme suit :

$$E_{touch \max 70kg} = [(1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_c}}$$

$$= [(1000 + 1,5 \times 0.824 \times 2500) \times \frac{0,157}{\sqrt{0.5}}$$

$$= 908.109 V$$

$$E_{pas \max 70kg} = [(1000 + 6C_s\rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_c}}$$

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

$$= [(1000 + 6 \times 0.824 \times 2500)] \times \frac{0,157}{\sqrt{0.5}}$$
$$= 2966.341 \text{ V}$$

Conception initiale

Espacement calculé avec l'équation :

$$D = \frac{2 \cdot L_X \cdot L_Y}{L_C - L_X - L_Y}$$
$$D = \frac{2 \times 76.2 \times 76.2}{762 - 76.2 - 76.2} = 10.05 \text{ m}$$

Le quadrillage du fil est de 5 x 5 et la longueur totale des conducteurs de la grille est :

$$L_C = N_X L_X + N_Y L_Y$$
$$L_C = 5 \times 76.2 + 5 \times 76.2 = 762 \text{ m}$$

Il ya 25 piquets de terre de 10.9 m de long sont utilisés comme illustré à la figure ci-dessous :

$$L_R = 25 \times 10.9 = 272.5 \text{ m}$$

La longueur totale des conducteurs enfouis, LT est :

$$L_T = L_C + L_R = 1034.5 \text{ m}$$

Détermination de la résistance de la grille :

En utilisant la longueur totale des conducteurs enfouis calculé à l'étape précédente LT = 1034.5 m et la surface de la grille A = 5806.44 m², la résistance est :

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$
$$R_g = 100 \left[\frac{1}{1034.5} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5806.44}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \times \sqrt{\frac{20}{5806.44}}} \right) \right]$$
$$= 0.675 \Omega$$

Elévation du potentiel de terre (EPT) :

L'EPT est calculée afin de la comparer à la tension de contact tolérable :

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

$$EPI = I_G \cdot R_g$$

$$= 4000 \times 0.675$$

$$= 2700 \text{ V}$$

Cela dépasse la valeur 907.83707 V (la tension de contact maximale admissible calculée préalablement). Ainsi, une amélioration est nécessaire.

Tensions de maille et de pas :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[\ln \left[\frac{D^2}{16h \cdot d} + \frac{(D + 2h)^2}{8D \cdot d} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left[\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[\ln \left[\frac{10.9^2}{16 \times 0.5 \times 0.0191} + \frac{(10.9 + 2 \times 0.5)^2}{8 \times 10.9 \times 0.0191} - \frac{0.5}{4 \times 0.0191} \right] + \frac{1}{1.225} \right. \\ \left. \times \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times 11 - 1)} \right] \right] = 0.785$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times n$$

$$= 0.644 + 0.148 \times 11 = 2.272$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M}$$

$$E_m = \frac{100 \times 4000 \times 0.785 \times 2.272}{1034.5} = 689.616 \text{ V}$$

La tension de pas :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{10.9 + 0.5} + \frac{1}{10.9} (1 - 0.5^{11-2}) \right] \\ = 0.375$$

La longueur efficace :

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R$$

$$= 0.75 \times 762 + 0.85 \times 272.5$$

$$= 803.125$$

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

$$E_s = \frac{100 \times 0.375 \times 2.272 \times 4000}{803.125} = 424.342 \text{ V}$$

Comparaison entre les tensions actuelles et admissibles de contact et de pas

Une fois les tensions de la maille et de pas sont calculées, les résultats sont comparés afin de voir si les deux tensions de contact et de pas sont inférieures aux celles maximales tolérables, donc la conception a besoin seulement des améliorations exigées pour relier les équipements au système. Sinon, une modification de l'espacement de conducteurs (la taille des mailles, l'adjonction de piquets, la profondeur du circuit de terre, etc.) devrait être faite.

$$E_{touch\ 70kg} = 908.109 \text{ V}$$

$$E_m = 689.616 \text{ V}$$

La tension de maille est plus petite que la tension de contact tolérable.

De même la tension de pas est comparée à la tension tolérable.

$$E_{pas\ 70kg} = 2965.341 \text{ V}$$

$$E_s = 424.342 \text{ V}$$

En comparant les résultats, la tension de pas actuel est beaucoup plus faible que la tension de pas tolérable.

Amélioration de la configuration initiale La modification de la conception n'est pas nécessaire car les tensions de la maille et de pas sont aussi bien au-dessous des tensions admissibles.

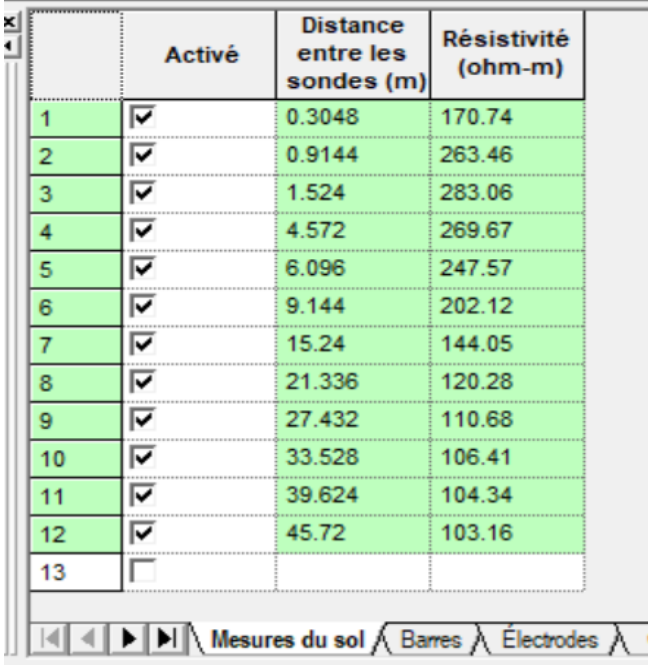
Configuration finale

En respectant les limites des tensions de pas et de contact, la conception finale peut être réalisée.

Simulation et conception d'un réseau de terre selon CYMGrd

Afin de tester le module Analyse du sol dans CYMGRD, les mesures suivantes ont été obtenu à partir de l'un des échantillons IEEE. (IEEE 80-2000, pages 168 et 169. Type de sol 2)

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre



	Activé	Distance entre les sondes (m)	Résistivité (ohm-m)
1	☒	0.3048	170.74
2	☒	0.9144	263.46
3	☒	1.524	283.06
4	☒	4.572	269.67
5	☒	6.096	247.57
6	☒	9.144	202.12
7	☒	15.24	144.05
8	☒	21.336	120.28
9	☒	27.432	110.68
10	☒	33.528	106.41
11	☒	39.624	104.34
12	☒	45.72	103.16
13	☐		

Navigation: < << >> > Mesures du sol / Barres / Électrodes

Figure III. 3: Mesures de résistivités de sol.

Dans cette application, tous les conducteurs sont enterrés à une profondeur de 0,5 mètre. Neuf conducteurs sont parallèles à l'axe X et neuf sont parallèles à l'axe Y. A des fins d'analyse, les conducteurs parallèles à l'axe X sont subdivisés en 16 éléments et les conducteurs parallèles à l'axe Y en 24 éléments.

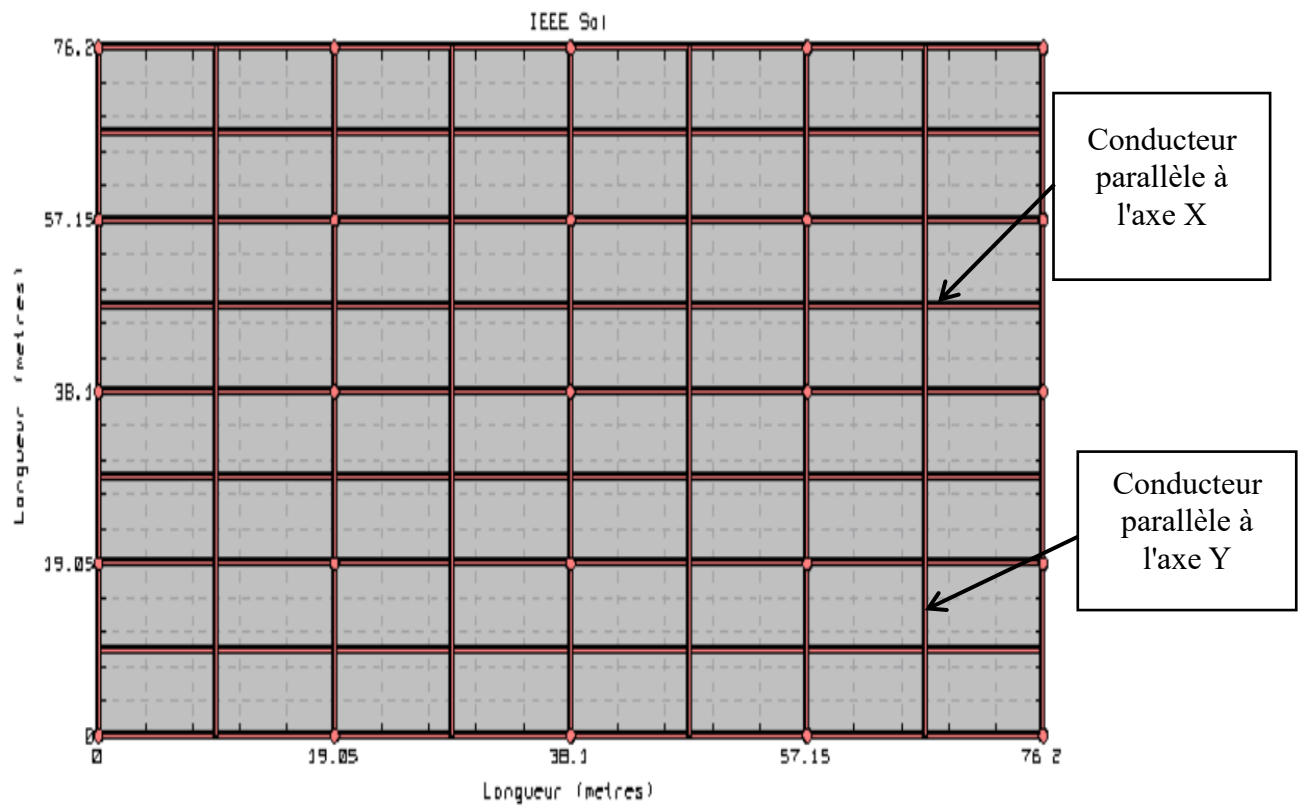


Figure III. 4: Grille de mise à la terre rectangulaire dessinée par CYMGrd en 2D

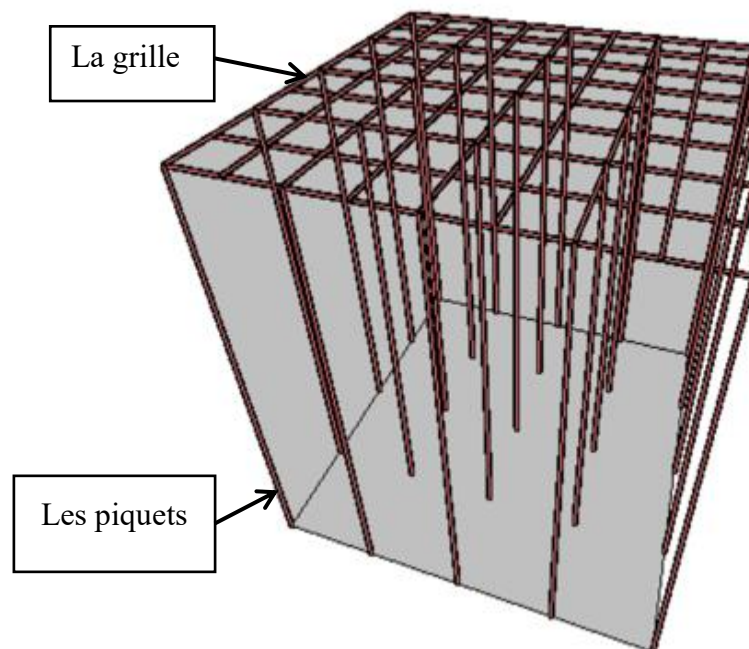


Figure III. 5: Grille de mise à la terre rectangulaire dessinée par CYMGrd en 3D

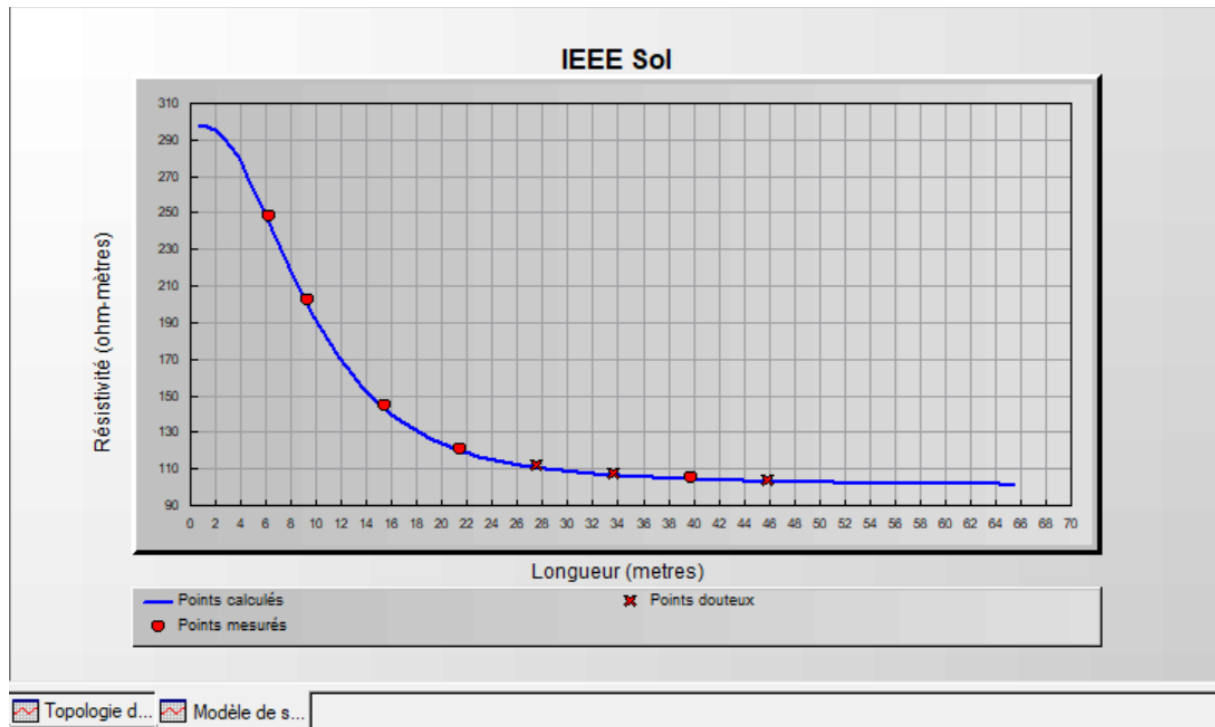
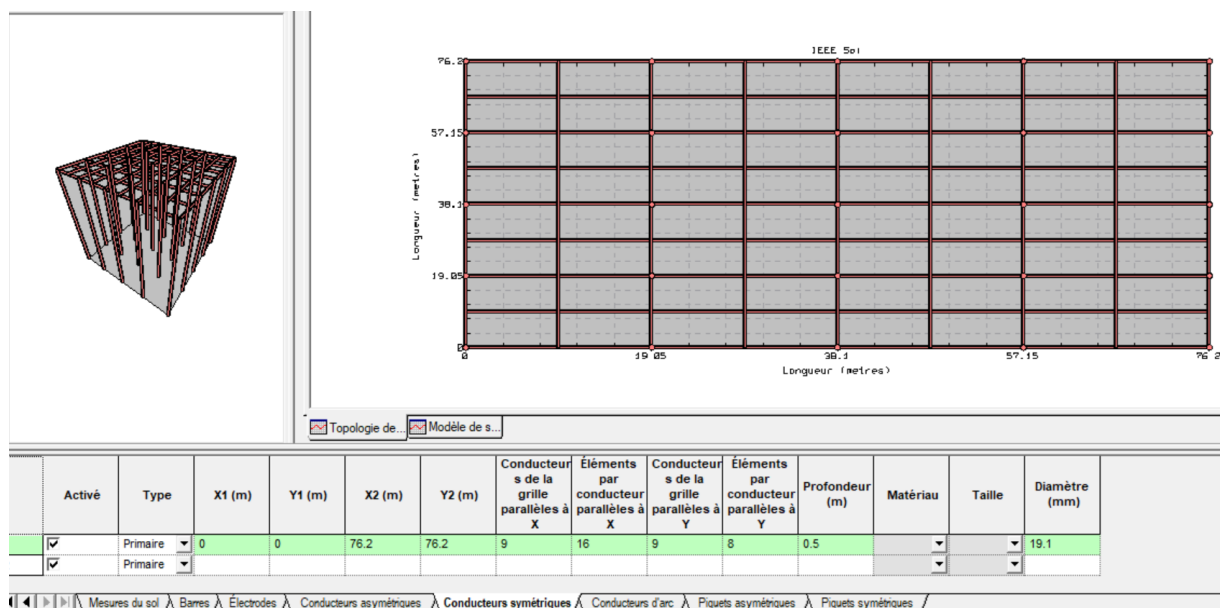


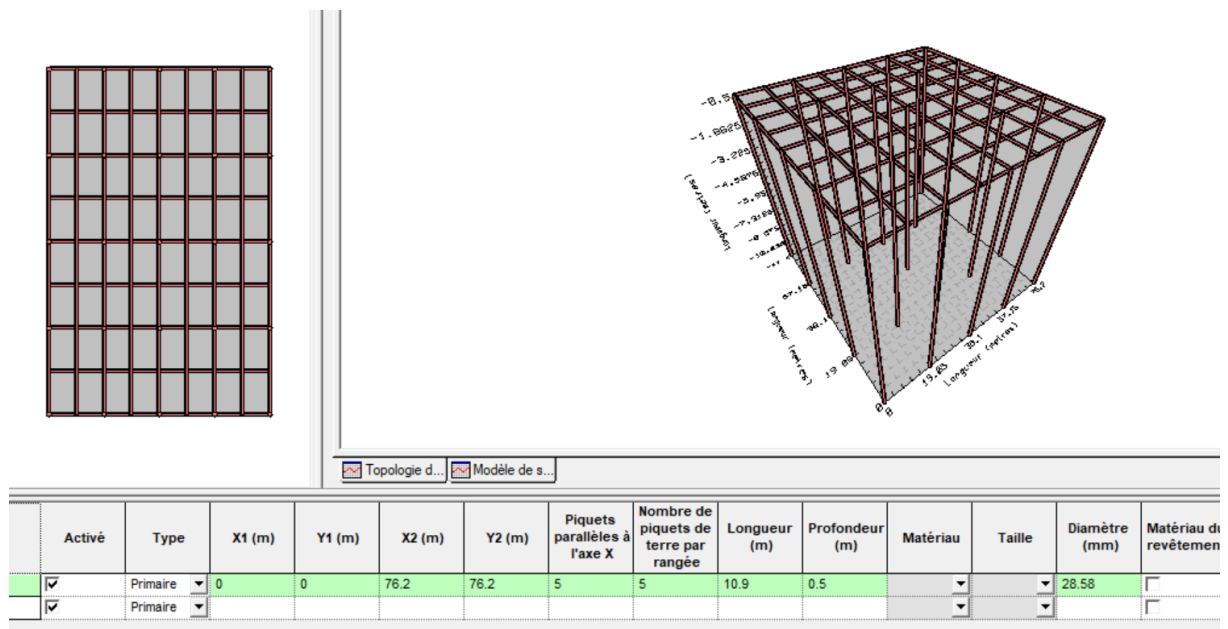
Figure III. 6: Graphe de mesures de résistivités de sol (les ponts douteux sont donnés par CYMGrd).

Les données géométriques peuvent maintenant être saisies. Étant donné que l'ensemble de conducteurs est un agencement symétrique (c'est-à-dire qu'il peut être défini comme étant équidistant et équidistant dans les directions X et Y), lorsque les données sont saisies, la disposition de la station s'affiche à l'écran. Utilisera l'onglet b des conducteurs symétriques dans la vue « Saisie de données » pour fournir les données.



Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

Nous allons maintenant ajouter les piquets de terre aux assemblages de conducteurs. Nous pouvons saisir la grille et les piquets dans n'importe quel ordre, mais il est préférable de saisir d'abord la disposition de la grille, puis les piquets de terre. De même, la disposition symétrique des piquets de terre nous permet d'utiliser l'onglet « Tige symétrique » pour saisir les données. Les tiges sont maintenant représentées superposées aux conducteurs de la grille. La profondeur des tiges est définie comme la distance entre la surface de la terre et le sommet des tiges et est toujours saisie sous forme de valeur positive.



Résistivité de la couche inférieure 99.98 ohm-m			
Résultats de sortie			
Facteur de décroissance	1.02618	Élévation du potentiel de terre	2886.88 volts
		Résistance de terre calculée	0.723664 ohms
		Impédance équivalente	0.703305 ohms
⏪ ⏴ ⏵ ⏩ Analyse du sol Dimensionnement de l'électrode Analyse de la grille Rapport			

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

L'injection des grandeurs relatives à la topologie de la figure III.9, permet au code de calcul CYMGRD d'évaluer les principaux paramètres électriques. Ces derniers sont inscrits dans le tableau

Facteur de réduction C_s	0.838238
Tension de contact admissible $E_{\text{touch}70}$ (V)	919.96
Tension de pas admissible $E_{\text{step}70}$ (V)	3013.76
Résistance de la terre R_g (Ω)	0.723664
Élévation du potentiel de terre EPT (V)	2886.88

Tableau 13: Principaux paramètres électriques calculés avec CYMGrd

Des contours de tensions de contact seront générés pour toute la zone de la grille. Ils peuvent être montrés en 3D et en 2D dans les images qui suivent.

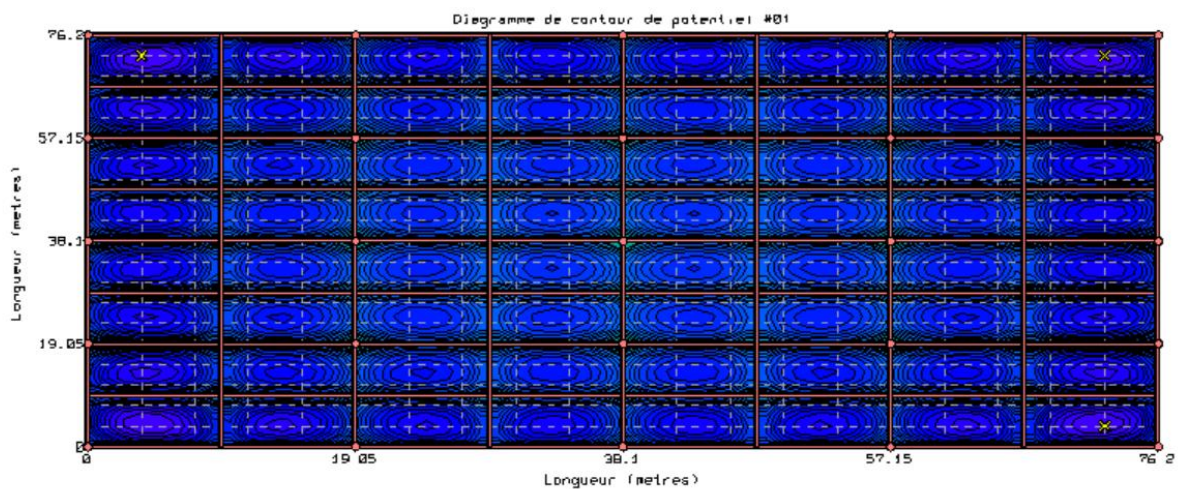


Figure III. 7 : Diagramme de contour de potentiel en 2D

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

Sur la fig III.8, nous illustrons le diagramme de contour de potentiel en 3D représentant la tension de contact obtenue du système proposé

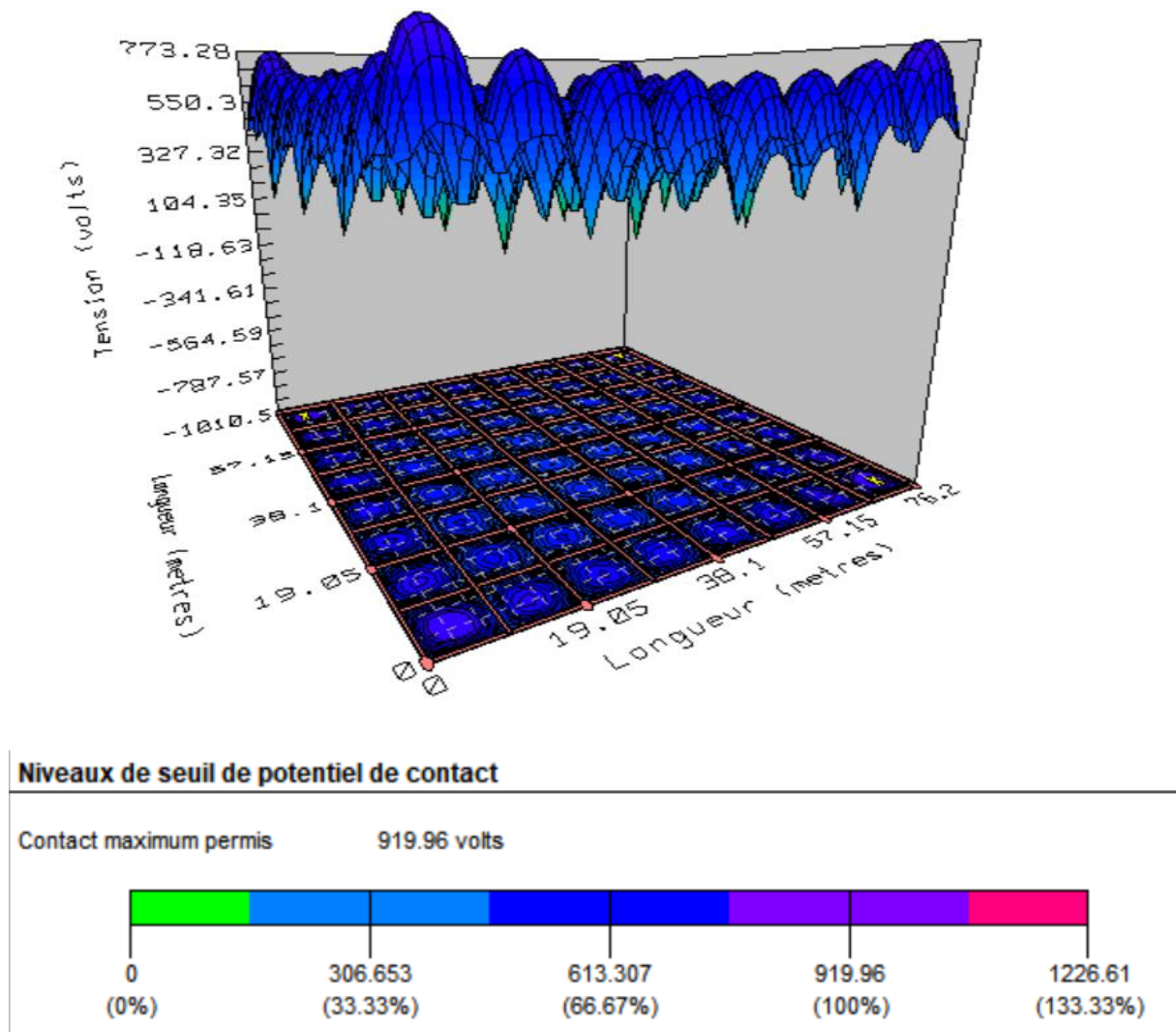


Figure III. 8 : diagramme de contour du potentiel de contact en 3D

Sur la fig III.9, nous illustrons le diagramme de profil de potentiel représentant les différentes tensions obtenues du système proposé.

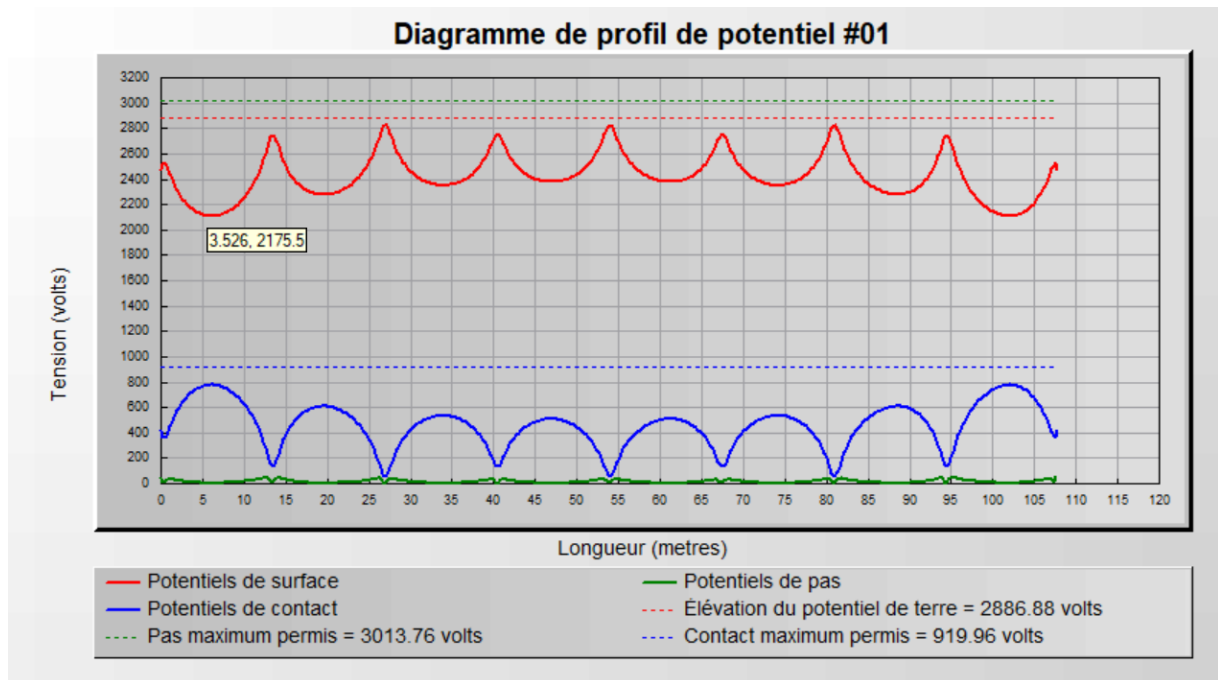


Figure III. 9: Diagramme de profil de potentiel

Les potentiels de toucher de surface et de pas sont affichés une fois l'analyse terminée. Les résultats montrent qu'il n'y a aucune raison de s'inquiéter puisque toutes les valeurs calculées sont bien inférieures à leurs valeurs maximales correspondantes.

Nous observons que les valeurs de la tension maximale de contact autorisée, la tension maximale de pas autorisée, le facteur de réduction du courant C_s , la résistance de la grille, et l'élévation de potentiel de terre (EPT) sont très proches. Ceci est prévisible, puisque le code de calcul CYMGrd se repose sur la norme IEEE 80-2000. Par ailleurs une nette différence a été constatée dans le calcul de la tension de contact et celle de pas.

Les résultats obtenus en utilisant le code CYMGrd sont donnés dans le tableau suivant :

Chapitre III: Conception d'un système de mise à la terre

	Facteur de réduction Cs	Tension de pas admissible E _{step70} (V)	Tension de contact admis- sible E _{touch70}	EPT (V)	Résistance de la grille R _g (Ω)	Tension de maille E _m (V)	Tension de pas actuel E _s (V)
Calcul par le guide IEEE80-2000	0.824	2966.341	908.109	2700	0.675	689.616	424.342
CYMGRD	0.838	3013.76	919.96	2886.88	0.723	773.28	282.71

Tableau 14: Comparaison des résultats calculés avec celles obtenues par CYMGRD

III.5. Conclusion :

La mise à la terre est un élément nécessaire dans la conception d'un poste électrique. Cette conception peut se faire en plusieurs étapes selon des critères bien déterminés en utilisant la norme IEEE 80-2000.

Les calculs mathématiques à la main peuvent être difficiles et très compliqués, pour cela, plusieurs logiciels ont été développés pour aider les ingénieurs à optimiser la conception d'un réseau de terre efficace et sûr.

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le système de mise à la terre du poste sous le logiciel Cymgrd. Ensuite, nous avons comparé nos résultats, qui concernent les principaux paramètres : l'élévation du potentiel de terre, la résistance de la terre, les tensions maximales de contact et de pas, en utilisant la norme IEEE 80-2000 à ceux trouvés par le logiciel CYMGrd. Une très bonne concordance a été obtenue.

Conclusion générale :

Un système de protection contre la foudre et de mise à la terre bien conçu et correctement installé est indispensable pour toute installation électrique, qu'il s'agisse de bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels. Il contribue non seulement à la sécurité des occupants et à la protection des équipements, mais aussi à la fiabilité et à la durabilité des infrastructures électriques. L'adoption des normes et des pratiques exemplaires dans la conception et la maintenance de ces systèmes est essentielle pour garantir leur efficacité et leur performance à long terme.

L'étude et la protection d'une installation électrique contre la foudre visent à assurer une protection globale et intégrée des personnes, des bâtiments, des équipements et des activités économiques. Cette démarche permet de réduire les risques, de minimiser les pertes et d'assurer la conformité aux normes et règlements en vigueur.

La conception d'un système de mise à la terre avec CYMGrd implique une série d'étapes structurées allant de la collecte des données initiales à la génération de rapports détaillés. En suivant les meilleures pratiques et en utilisant les fonctionnalités puissantes du logiciel, nous pouvons concevoir des systèmes de mise à la terre sûrs et efficaces.

Bibliographie

- [1]: E.E. Baryshev, V.S. Mushnikov, I.N. Fetisov “Raschet molniyezashchitnykh zon zdaniy i sooruzheniy”, Yekaterinburg, 2009.
- [2]: M.DIB : « L’impact de la foudre sur les réseaux électriques », Thèse de doctorat, Annaba 2007.
- [3]: J. BERRACHED : « La foudre, Technique de la Haute Tension », polycopie de cours, Avril 2015.
- [4]: INERIS. Institut International de l’Environnement et des Risque : « Le risque de foudre et les Installations classés pour la protection de l’environnement », Septembre 2011.
- [5]: https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=244.
- [6]: F. Heidler, W. Zischank “Parameters of lightning current given in IEC 62305 –back-ground, experience and outlook” 29th International Conference on lightning protection, 2008.
- [7]: DEHN + SÖHNE: Lightning Protection Guide 3rd updated edition, DEHN + SÖHNE GmbH, 2014
- [8]: Belenergo “Molniyezashchita zdaniy, sooruzheniy i inzhenernykh kommunikatsiy”, Minsk, 2011.
- [9]: A.V. Kabyshev “Molniyezashchita elektroustanovok sistem elektrosnabzheniya”, TPU Tomsk, 2006.
- [10]: Federal Agency on Technical Regulation and Metrology “PUE 7 izdaniye”, 2002.
- [11]: ERICO: Lightning Protection Handbook Designing To The IEC 62305 Series Of Lightning Protection Standards, 2009.
- [12]: GOST B V.2.5-38 “Ustroystvo Molniyezashchity Zdaniy i Sooruzheniy”, 2008.
- [13]: PUE-7 p.4.2.133-4.2.142 “Zashchita ot grozovykh perenapryazheniy”, 2003.
- [14]: STO 56947007-29.130.15.114 “Rukovodyashchiye ukazaniya po proyektirovaniyu zazemlyayushchikh ustroystv podstantsiy napryazheniyem 6-750 kv ”, 2012.
- [15]: IEC 62305-3 “Physical damage to structures and life hazard”, 2011
- [16]: GOST 12.1.038-82 “Sistema standartov bezopasnosti truda”, 2001

- [17]: IEC 60364-4-41 “Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock”, 2005.
- [18]: IEC 62305-2 “Risk management”, 2010.
- [19]: « Document SONELGAZ, DTE, DSG », Annaba, 03/08/2003.
- [20]: R-H. GOLDE, E. ARNOLD « Lightning protection » London, 1973.
- [21]: Inna Baleva, «substation grounding», a project for the degree of Master of Science in electrical and electronic engineering, California state university, Sacramento, 2012.
- [22]: IEEE Standard 80-2000, « IEEE guide for safety in AC substation grounding », Revision of IEEE Std 80-1986, New York, USA, 2000
- [23]: N. Mourad and B. Mohamed, "Short circuit current contribution of distributed photovoltaic integration on radial distribution networks," 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Boumerdes, Algeria, 2015, pp. 1-4.
- [24]: M. Naidji and M. Boudour, "Impact of increased distributed photovoltaic generation on radial distribution networks," 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Saint Julian's, Malta, 2016, pp. 292-295.
- [25]: M. Naidji, B. Boussahoua and M. Boudour, "Feasibility study of solar photovoltaic integration on distribution networks: Case study: Djanet's isolated distribution network, Algeria," 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2017, pp. 130-134.
- [26]: M. Naidji, M. Boudour, “Etude d'impact de l'intégration des sources PV dans les réseaux de distribution d'énergie électrique”, Thèse de Magister, USTHB, Alger, 2015.
- [27]: CYMGRD 6.3, « User's Guide And Reference Manual », Manuel d’utilisation, Copyright CYME International T&D Inc., Octobre 2006.

Annexe 1



ELECTRO-INDUSTRIES

Fiche Technique du transformateur 400 kVA 30 kV / 0,4 kV

Respirant



Certifié
ISO 9001/2000

	Caractéristiques Sonelgaz	Caractéristiques Fournisseur
Pays		ALGERIE
Fabricant		ELECTRO-INDUSTRIES
Usine de fabrication		AZAZGA
Référence du fabricant		Tél : 026/34.16.86 – Fax 026/34.14.24 / 34.13.30
Normes de références	CEI 76 1-5 et spécification Sonelgaz	CEI 76 - Spécifications Sonelgaz
Lieu d'installation	Intérieur	Extérieur/intérieur
Type de transformateur	Respirant ou remplissage total	Respirant
Mode de refroidissement	ONAN	ONAN
Nature du diélectrique	Huile minérale	Huile minérale
Type d'enroulement MT	Fil cuivre	Fil cuivre
Type d'enroulement BT	Fil méplat cuivre ou bandes	Fil méplat de cuivre
Fréquence	50 Hz	50 Hz
Prise de réglage	± 2x2,5 %	± 2x2,5 %
Tension secondaire à vide	400 V	400 V
Tension la plus élevée pour le matériel	36 KV	36 KV
Tension d'isolement BT masse	10 KV	10 KV
Tension d'isolement à fréquence industrielle	70 KV	70 KV
Tension d'isolement à l'onde de choc MT	170 KV	170 KV
Tension d'isolement à l'onde de choc BT	30 KV	30 KV
Courant à vide	3,2 %	3,2 %
Pertes à vide	1050 W	1050 W
Tension de court-circuit à 75°C	4,5 %	4,5 %
Pertes en court-circuit à 75°C	6210 W	6210 W
Couplage	Dyn 11	Dyn 11
Température ambiante	40°C	40 °C
Altitude (m)	≤ 1000	≤ 1000
Echauffement moyen des enroulements	65 °C	65 °C
Echauffement maximum de l'huile	60 °C	60 °C
Niveau de bruit	67 dB	67 dB
Type de bornes MT	Porcelaine	Porcelaine
Type de bornes BT	Porcelaine	Porcelaine
Distances entre les traversées MT	320 mm	320 mm
Encombrements et masses maximum		
Longueur	1600 mm	1445mm
Largeur	950 mm	860 mm
Hauteur	1900 mm	1890 mm
Masse d'huile		390 Kg

Masse totale	1560 Kg	1515 Kg
Dispositions des bornes BT	Neutre à gauche vu côté ou sur le petit côté de la cuve	Neutre à gauche vu côté BT
Repérage des bornes	Par symboles gravés sur le couvercle ou plaquettes métalliques.	Par Symboles gravés sur le couvercle

