

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

BENYAHIA HADJER

TALEB SAFAA

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Etude du risque foudre pour la protection de structure

Soutenu le 07/07 /2022 devant le jury composé de:

| | | | | |
|-------------|---------|------------|------|-------------|
| Mr. HAMEL | MEZIANE | MCA | UMBB | Président |
| Mme. LARABI | ZINA | MAA | UMBB | Examinateur |
| Mme. MZIOU | NASSIMA | Professeur | UMBB | Encadreur |

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

*Nous remercions tout d'abord **Dieu** de nous avoir prêté le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes reconnaissances et mes sincères remerciements à notre docteur de recherche, Professeur **MEZZIOU NASSIMA** d'avoir accepté de nous encadrer et pour suivi. Ainsi pour sa patience et sa générosité, et la pleine confiance qu'elle nous avons accordé. Je voudrais aussi la remercier pour ses encouragements tout au long de ces années, et d'avoir cru en nos capacités. Qu'elle trouve ici le témoignage de toute nos gratitudes.*

Nous tenons à remercier aussi, les membres du jury de nous faire l'honneur de lire et évaluer ce travail.

Le grand remerciement aussi pour tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

En fin je tiens à exprimer ma reconnaissance a tous mes amis et collègues pour leur soutien et leur compréhension, et toute nos familles.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, surtout à mes chers parents ma source de vie, d'amour et d'affection. Je remercie mon cher père et sur tout ma mère, Cette femme remarquable et exceptionnelle qui m'a tant soutenue... Tous les mots du monde ne suffiront pour décrire ma gratitude, respect et amour pour toi mama. A mes deux chers frère Amine et Ridha, à mon mari Nassim ma source d'espoir et de motivation.

A mes nièces et mes neveux que je l'aime trop, et le spécial dédicace à mon bebe Sohaib que dieu a protégé à nos

A ma partenaire de mémoire, mon amie et ma sœur Hadjer, avec laquelle j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler. Merci pour votre amour ainsi que pour les moments inoubliables qu'on a vécus ensemble durant cette année et les années passées.

A mes chères amies, Mouna, Ikram, Rania et Zineb qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long du projet. A mes camarades de la promotion du master machine électrique. Je vous remercie, tous vos soutiens et vos encouragements me donnent la force de continuer.

SAFAA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, qui m'ont soutenu durant toute ma vie en particulier les années de mes études pour arriver enfin à ce jour.

A ma chère sœur Sarah qui m'a toujours soutenu pour L'attente de mes objectifs, ainsi a mes chers frères Ayoub et Nassim Et à mon mari Hamide pour l'encouragement amour et son soutien moral.

Sans oublier ma chère sœur mon binôme Safaa pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Votre amour ainsi que pour les moments inoubliables qu'on a vécus ensemble durant cette année.

A ma chère ami Lidia pour vos encouragements, A mes camarades de la promotion du master machine électrique .

HADJER

تم إعداد هذه المذكرة في إطار ختم المرحلة النهائية من التعليم العالي والبحث العلمي ، لنيل شهادة الماستر في تخصص الكترول وتقني مآكنات كهربائية. هذا العمل هو مجموعة من البحوث حول الصواعق الكهربائية، تلقائية تكونها، الاضرار الناتجة عنها و مدى خطورتها. تم البحث حول وسائل الحماية منها داخل و خارج المباني، للتقليل من مخاطر الاصابة بها قمنا بعمل دراسة احتمالية اعتمادا على المعايير الدولية و خاصة 2 - la norme 62305 من اجل دراسة احتمالية خطر الصاعقة الكهربائية على المباني و عليها يتعين دراسة و اختيار الاجهزة المناسبة للتصدي من مخاطرها.

Résumé

Ce mémoire a été préparé dans le cadre du projet fin de cycle cycle master de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, pour l'obtention d'un master en électrotechnique, machines électriques. Ce travail est un ensemble de recherches sur la foudre électrique, sa formation spontanée, les dommages qui en résultent et l'étendue de sa dangerosité. Puis, des recherches sur les moyens de s'en protéger à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, pour réduire les risques de dommages, nous avons mené une étude probabiliste basée sur les normes internationales, notamment la norme CEI 62305-2. Afin d'étudier la probabilité qu'un coup de foudre touche des structures, et de choisir les mesures de protection pour savoir les dispositifs appropriés pour faire face à ses risques .

Abstract

This memorandum was prepared within the framework of sealing the final stage of higher education and scientific research, to obtain a master's degree in electrotechnical, electrical machines. This work is a set of research on electric lightning, its spontaneous formation, the damages resulting from it and the extent of its danger. Then, research on means of protection from them inside and outside buildings, to reduce the risk of injury, we conducted a probabilistic study based on international standards, especially 2- la norme 62305 In order to study the possibility of the electric lightning strike on the buildings, it is necessary to study and select the appropriate devices to deal with its risks.

Liste des symboles

- Ad : Surface équivalente d'exposition pour les impacts sur une structure isolée
- Ai : Surface équivalente d'exposition pour les impacts à proximité d'un service
- Al : Surface équivalente d'exposition pour les impacts sur un service
- H : Hauteur de la structure
- Ha : Hauteur de la structure connectée à l'extrémité «a» d'un service
- hz : Facteur augmentant les pertes dues aux dommages physiques en présence d'un danger spécial
- Kd : Facteur associé aux caractéristiques d'un service
- Kp : Facteur associé aux mesures de protection choisies dans un service
- KS1 : Facteur associé à l'efficacité d'écran d'une structure
- KS2 : Facteur associé à l'efficacité d'écran des écrans internes à la structure
- KS3 : Facteur associé aux caractéristiques du câblage interne
- KS4 : Facteur associé à la tension de tenue aux chocs d'un réseau
- L : Longueur de la structure
- La : Longueur de la structure connectée à l'extrémité «a» d'un service
- ND : nombre annuel prévisible des événements dangereux dus aux coups de foudre sur une structure
- NDa Fréquence des événements dangereux dus aux coups de foudre
- Ng Densité de foudroiement au sol
- NI : nombre annuel prévisible des événements dangereux dus aux coups de foudre à proximité d'un service
- NL : nombre annuel prévisible des événements dangereux dus aux coups de foudre sur un service
- NM : nombre annuel prévisible des événements dangereux dus aux coups de foudre à proximité d'une structure
- NX Nombre annuel d'événements dangereux
- P A Probabilité de blessures sur des êtres vivants (impacts sur une structure)
- P C Probabilité de défaillances des réseaux internes (impacts sur la structure)
- P M Probabilité de défaillances des réseaux internes (impacts à proximité d'une structure)
- P U Probabilité de blessures d'êtres vivants (impacts sur le service connecté)
- P V Probabilité de dommages physiques sur une structure (impacts sur le service connecté)
- P W Probabilité de défaillance des réseaux internes dans une structure (impacts sur le service connecté)
- P Z Probabilité de défaillances des réseaux internes (impacts à proximité d'un service connecté)
- PB Probabilité de dommages physiques sur une structure (impacts sur une structure)
- PSPD Probabilité de défaillance des réseaux internes

Lise des figures

| | |
|--|----|
| Figure I- 1 Nuage électrisé | 7 |
| Figure I- 2 formation et repertition des charges | 8 |
| Figure I- 3 coup de foudre | 8 |
| Figure I- 4 Classification des coups de foudre | 9 |
| Figure I- 5 Principe d'une décharge | 10 |
| Figure I- 6 Classification des coups de foudre | 11 |
| Figure I- 7 les différents étapes du développement d'un traceur par bonds..... | 13 |
| Figure I- 8présentation D'UN L'arc en retour..... | 14 |
| Figure II- 1Une installation de paratonnerre à tige simple comporte..... | 23 |
| Figure II- 2Protection d'un stockage de fûts extérieurs par paratonnerre à fils tendus [21]. | 24 |
| Figure II- 3Protection d'un bâtiment par un paratonnerre à cage maillée [21] | 25 |
| Figure II- 4Paratonnerre à dispositif d'amorçage(PDA) [23]. | 26 |
| Figure II- 5Conduiteure de descente partagé même bâtiment..... | 28 |
| Figure II- 6longueur minimale L1 de chaque prise de terre, en fonction des niveaux de SPF et de la résistivité du sol | 30 |
| Figure II- 7prise de terre type..... | 33 |
| Figure II- 8Éclateurs d'Isolement | 35 |
| Figure II- 9Caractéristique temps/courant d'un parafoudre à varistance | 38 |
| Figure III - 1 Types de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages..... | 48 |
| Figure III - 2procédure de calcule de risque..... | 51 |
| Figure IV- 1 Représentation graphique des risques de la maison rurale..... | 58 |
| Figure IV- 2 Représentation graphique des risques pour le 1 ^{er} cas. | 59 |
| Figure IV- 3 Représentation graphique des risques pour le 2 ^{eme} cas..... | 60 |
| Figure IV- 4 : Représentation graphique des risques de la zone 1 | 67 |
| Figure IV- 5 : Représentation graphique des risques de la zone 2 | 68 |
| Figure IV- 6 : Représentation graphique des risques de la zone 3 | 68 |
| Figure IV- 7 Représentation graphique des risques de la zone 4 | 69 |
| Figure IV- 8 Représentation graphique des risques de la zone 5 | 69 |
| Figure IV- 9 Représentation graphique des risques de la zone 1 | 71 |

| | |
|--|----|
| Figure IV- 10 Représentation graphique des risques pour la zone 2..... | 72 |
| Figure IV- 11 Représentation graphique des risques pour la zone 3..... | 72 |
| Figure IV- 12 Représentation graphique des risques pour la zone 4..... | 73 |
| Figure IV- 13 Représentation graphique des risques pour la zone 5..... | 73 |
| Figure IV- 14 Représentation graphique des risques pour la zone 1 | 74 |
| Figure IV- 15 Représentation graphique des risques pour la zone 2..... | 74 |
| Figure IV- 16 Représentation graphique des risques pour la zone 3..... | 75 |
| Figure IV- 17 Représentation graphique des risques pour la zone 4..... | 75 |
| Figure IV- 18 Représentation graphique des risques pour la zone 5..... | 76 |
| Figure IV- 19: Risques résultant en fonction du type de dommage dans la zone 1 (à l'extérieur de bâtiment) | 85 |
| Figure IV- 20 : Risques résultant en fonction du type de dommage dans la zone 2 (Bloc Chambre) | 85 |
| Figure IV- 21: Risques résultant en fonction du type de dommage dans la zone 3 (bloc opretation)..... | 86 |
| Figure IV- 22 : Risques résultant en fonction du type de dommage dans la zone 4 (Unité de soins INTENSIFS)..... | 86 |

Lise des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau II- 1 Lise des figures | 22 |
| Tableau II- 2 distances entre les fixations des descentes..... | 28 |
| Tableau II- 3niveau de protection..... | 29 |
| TABLEAU III - 1 Sources de dommages, types de dommages et types de pertes en fonction du point d'impact..... | 47 |
| TABLEAU III - 2 Risque dans une structure pour chaque type de dommages et de pertes | 49 |
| TABLEAU III - 3 Composition des composantes de risques à prendre en compte pour chaque type de perte dans une structure. | 50 |
| TABLEAU III - 4 composantes de risque à prendre en compte pour chaque type de perte dans une structure | 50 |
| Tableau IV- 1 Données et caractéristiques de la structure..... | 53 |
| Tableau IV- 2 Données et caractéristiques des lignes entrantes et des matériels internes | 54 |
| Tableau IV- 3 Caractéristiques de la zone Z2 (à l'intérieur du bâtiment) | 55 |
| Tableau IV- 4 Surfaces d'exposition équivalente des structures et des lignes. | 56 |
| Tableau IV- 5 Nombre annuel prévisible d'événements dangereux..... | 56 |
| TABLEAU IV- 6 Composantes du risque impliquées et leur calcul (valeurs $\times 10^{-5}$) | 57 |
| Tableau IV- 7 Valeurs des composantes de risque relatives au risque R1 (valeurs $\times 10^{-5}$) pour les cas adaptés | 58 |
| Tableau IV- 8 Caractéristiques de la structure | 61 |
| Tableau IV- 9 Caractéristiques du réseau de puissance interne et de la ligne de puissance entrante concernée | 61 |
| Tableau IV- 10 Caractéristiques du réseau de communication interne et de la ligne entrante concernée..... | 62 |
| Tableau IV- 11 Caractéristiques de la zone Z1 (zone d'entrée dans le bâtiment). | 63 |
| Tableau IV- 12 Caractéristiques de la zone Z2 (jardin)..... | 63 |
| Tableau IV- 13 Caractéristiques de la zone Z3 (archives)..... | 63 |
| Tableau IV- 14 Caractéristiques de la zone Z4 (bureaux) | 64 |
| Tableau IV- 15 Caractéristiques de la zone Z5 (centre informatique) | 64 |
| Tableau IV- 16 Surfaces équivalentes d'exposition de la structure et des lignes..... | 65 |
| Tableau IV- 17 Nombre annuel prévisible d'événements dangereux..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Tableau IV- 18 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques | 66 |
| Tableau IV- 19 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques | 67 |
| Tableau IV- 20 Valeurs des composantes de risque relatives au risque R1(valeurs x10–5) pour les cas adaptés..... | 70 |
| Tableau IV- 21 caractéristiques de la structure | 76 |
| Tableau IV- 22 caractéristiques du réseau de puissance interne et de la ligne de puissance entrante concerné..... | 77 |
| Tableau IV- 23 caractéristique du réseau de communication interne et de la ligne concernée | 77 |
| Tableau IV- 24 caractéristique de la zone Z1 (extérieure du bâtiment)..... | 79 |
| Tableau IV- 25 caractéristiques de la zone Z2 (bloc chambres) | 79 |
| Tableau IV- 26 caractéristiques de la zone Z3 (bloc opératoire) | 80 |
| Tableau IV- 27 caractéristiques de la zone Z4 (unité de soin intensif)..... | 81 |
| Tableau IV- 28 caractéristiques de zone Z1 (extérieur du bâtiment) | 81 |
| Tableau IV- 29 caractéristiques de la zone Z2 (bloc chambres) | 82 |
| Tableau IV- 30: Surfaces d'exposition équivalente des structures et des lignes | 82 |
| Tableau IV- 31: L'évaluation des composantes de risqué pour les structures | 83 |
| Tableau IV- 32 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques | 83 |
| Tableau IV- 33 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques | 84 |
| Tableau IV- 34 Valeurs de la probabilité P pour une structure protégée | 87 |
| Tableau IV- 35 résultats de réduction des risques..... | 88 |

SOMMAIRE

| | |
|--|------|
| Remerciements | I |
| Dédicace | II |
| Résumé | IV |
| Liste des symboles..... | V |
| Liste des figures..... | VI |
| Liste des Tableaux..... | VIII |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 2 |
| I.1 Chapitre I : Généralités sur la foudre | 5 |
| I.1. Introduction | 5 |
| I.2 Le phénomène foudre..... | 5 |
| I.3 L’histoire de la recherche sur la foudre..... | 5 |
| I.4 La création et l’action de la foudre..... | 7 |
| I.4.1 Mécanisme de création des orages et de la foudre | 7 |
| I.4.2 Début du mécanisme d’électrisation | 7 |
| I.4.3 Début de la phase active :..... | 8 |
| I.4.4 Maturité de la phase active..... | 8 |
| I.4.5 Fin de la phase active | 9 |
| I.5. Classification des coups de foudre | 9 |
| I.6. Principe d’une décharge | 9 |
| I.7. Les conditions de formation de la foudre..... | 10 |
| I.8. Les différents coups de foudre | 11 |
| I.9. Points d’impact..... | 12 |
| I.10. Différents types de foudre | 12 |
| I.10.1 Éclairs intranuageux et internuageux | 12 |
| I.10.2 Éclairs nuage-sol | 12 |
| I.10.3 Foudre en boule :..... | 12 |

| | |
|--|----|
| I.11. Le traceur..... | 13 |
| I.12. L'arc en retour..... | 14 |
| I.13. Les effets de la foudre..... | 14 |
| I.14. Statistiques générales..... | 17 |
| I.14.1 Considérations factuelles..... | 17 |
| I.14.2 Analyse d'accidents dus à la foudre..... | 17 |
| I.15. Conclusion..... | 19 |
| Chapitre II : Système de protection contre la foudre..... | 21 |
| II.1 Introduction..... | 21 |
| II.2. Les systèmes de protection foudre..... | 21 |
| II.2.1 Installation extérieure de protection contre la foudre (IEPF)..... | 22 |
| II.2.1.1 Dispositifs de capture..... | 22 |
| II.2.1.2 Conducteur de descente..... | 27 |
| II.2.1.3 Les prises de terre :..... | 29 |
| II.2.2 Installation intérieure de protection contre la foudre..... | 33 |
| II.2.2.1 Protection des appareils par la mise en place de liaisons équipotentielles..... | 34 |
| II.2.2.2 Parafoudre..... | 35 |
| II.3. Les risques liés à la foudre..... | 38 |
| II.3.1. Le danger pour la structure peut donner lieu à des dommages affectant la structure et son contenu :..... | 38 |
| II.3.2 Le danger pour les services peut donner lieu :..... | 38 |
| II.3.3 Le risque :..... | 38 |
| II.3.4 Les coups de foudre impliquant une structure peuvent être divisés en :..... | 39 |
| II.3.5 Les coups de foudre impliquant un service peuvent être divisés en :..... | 39 |
| II. Conclusion..... | 39 |
| Chapitre III : Analyse du Risque Foudre..... | 41 |
| III.1. Introduction..... | 41 |

| | |
|--|----|
| III.2. Méthodologie de travail..... | 41 |
| III.3. OBJECTIFS DE L'ARF | 42 |
| III.4. Limites de l'Analyse du Risque Foudre | 42 |
| III.5. Principaux paramètres influents dans la méthode d'analyse du risque foudre..... | 42 |
| III.5.1. Densité de foudroiement sur le site | 42 |
| III.5.2. Dimensions du bâtiment | 42 |
| III.5.3. Facteur d'emplacement..... | 42 |
| III.5.4. Dangers particuliers | 43 |
| III.5.5. Risque d'incendie | 43 |
| III.5.6. Protection anti-incendie | 43 |
| III.5.7. Type de sol | 44 |
| III.5.8. Facteur d'environnement de la ligne entrante dans le bâtiment | 44 |
| III.5.9. Résistivité du terrain..... | 44 |
| III.5.10. Longueur de la ligne entrante | 44 |
| III.5.11. Type de câblage | 44 |
| III.5.12. Tension de tenue..... | 45 |
| III.6. Quelques termes et définitions utilisés | 45 |
| III.7. Types d'impact foudre..... | 46 |
| III.7.1. Composition de composantes de risques par rapport à l'impact de foudre | 47 |
| III.8. Les dommages | 48 |
| III.8.1. Composition des composantes de risque par rapport à la source de dommages . | 48 |
| III.8.2. Synthèse des composantes du risque dans une structure | 50 |
| III.9 Calcul de risque | 51 |
| III.10. Conclusion | 51 |
| Chapitre IV : Analyse du Risque Foudre dans le cas de Structure..... | 53 |
| IV.1. Introduction | 53 |
| IV.2. Etude de risque foudre pour une maison rurale | 53 |

| | |
|---|----|
| IV.2.1. Données et caractéristiques de la structure | 53 |
| IV.2.2. Calcul des valeurs correspondantes..... | 56 |
| IV.2.3. Calcul du risque pour décider le besoin de protection | 57 |
| IV.2.4. Réduction du risque..... | 58 |
| IV.3. Etude de risque foudre pour un bâtiment de bureaux..... | 60 |
| IV.3.4. Calcul des valeurs correspondantes..... | 65 |
| IV.3.4. Calcul du risque pour décider du besoin de protection | 67 |
| IV.3.5. Réduction du risque toléré..... | 70 |
| IV.4. Etude de risque de foudre pour un Hôpital..... | 76 |
| IV.4.1. Données et caractéristiques de la structure | 76 |
| IV.4.2. Définition des zones de l'hôpital et leurs caractéristiques | 78 |
| IV.4.3. Calcul des valeurs correspondantes..... | 82 |
| IV.4.4. Calcul du risque pour décider le besoin de protection | 83 |
| IV.4.5. Réduction des risques..... | 87 |
| IV.5. Conclusion..... | 88 |
| Conclusion générale | 90 |
| Bibliographie | 90 |

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La foudre est un phénomène naturel qui se produit très brièvement se frayant un chemin conducteur ionisé pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. La différence de potentiels entre le nuage orageux et la terre peut s'élever à plusieurs centaines de millions de volts et le courant de foudre varie de milliers à des centaines de milliers d'ampères, rendant ainsi inévitable le recours à une protection adéquate [1].

La foudre est notamment responsable du décès d'une vingtaine de personnes par An. Elle présente également une cause d'accidents majeurs en milieu industriel, dans le Secteur du transport, sur le réseau de distribution d'énergie électrique ainsi que sur le réseau de télécommunication. Le montant annuel des dégâts engendrés par ce phénomène S'élèverait à plusieurs centaines de millions d'euros et pourrait atteindre le milliard D'euros selon certains chiffres avancés par les assureurs [2].

Par ses multiples effets, la foudre est susceptible d'engendrer dans les installations industrielles des sinistres sur les structures des bâtiments et des perturbations au niveau des équipements et des moyens de production. Les conséquences dues à ces phénomènes peuvent entraîner directement ou indirectement des risques graves pour la sécurité du personnel, la sureté du matériel et la qualité de l'environnement.

Pour protéger les personnes et les biens des effets de la foudre, deux familles de Systèmes complémentaires sont généralement mises en œuvre : les systèmes de protection. Intérieure et les systèmes de protection extérieure. Les premiers ont pour fonction de protéger les installations et équipements électriques intérieurs contre les tensions induites par la foudre ainsi que les montées en potentiel (typiquement les parafoudres). Le rôle des Seconds, et en particulier les paratonnerres, est de capter et écouler vers la terre les coups de foudre qui, en leur absence, auraient frappé le bâtiment ou la structure à protéger.

Le manuscrit comporte une introduction générale, conclusion générale et quatre chapitres :

Dans le premier chapitre de notre étude, nous parcourrons les connaissances actuelles sur l'électricité atmosphérique et plus particulièrement sur la phénoménologie d'un coup de foudre, nous étudions la nature de la foudre, son origine et son mécanisme de formation, ces

INTRODUCTION GÉNÉRALE

types et ces effets. On finisse par des statistiques mondiales sur la gravité et les accidents liés aux coups de foudre.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les différents dispositifs de protection contre la foudre qui seront répartis selon les types de danger et selon le point d'impact de la foudre.

Le principe de la méthode probabilistique de l'analyse de risque de foudre (ARF) fait l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre a pour vocation de présenter les résultats de l'analyse de risque foudre pour les structures proposées ainsi que le choix des mesures de protection.

Chapitre I :
Généralité sur la foudre

I.1 Chapitre I : Généralités sur la foudre

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous emploierons à faire un état des lieux des connaissances actuelles relatives à la foudre. Nous débuterons, tout d'abord, par une description de la phénoménologie de la foudre en évoquant brièvement les mécanismes menant au coup de foudre. Enfin nous nous concentrerons plus particulièrement sur les décharges de polarité négative, qu'elles soient descendantes ou ascendantes.

I.2 Le phénomène foudre

Pendant les journées d'été, l'humidité de l'air ainsi que l'échauffement du sol provoquent la formation d'un important nuage : le cumulo-nimbus. Un vent violent au sein de ce nuage sépare les charges électriques ; le nuage se voit alors chargé positivement à son sommet et négativement à sa base. A la surface du sol, en-dessous du nuage, se concentrent des charges positives. Une différence de potentiel de plusieurs millions de volts apparaît entre sol et nuage orageux ; lorsque l'équilibre électrostatique se rompt, une décharge électrique de plusieurs milliers d'Ampères traverse l'air pendant quelques millièmes de secondes : c'est la foudre. Le tonnerre n'est autre que l'onde de choc sonore qui accompagne cette décharge [3].

I.3 L'histoire de la recherche sur la foudre

Depuis des temps primitifs, la puissance délivrée par la foudre et l'intensité des phénomènes qui l'accompagnent sont sources de craintes : les peintures découvertes la représentent comme une hache ou une pierre lancée depuis les Cieux. Plusieurs motifs datant de 2500 ans avant notre ère ont également été découverts, à savoir des personnages les bras levés vers le ciel, prolongés par des éclairs. Il semblerait que ces représentations de la foudre soient liées à des observations de la nature faites par les premiers hommes [3]. Pendant l'antiquité de nombreuses religions et mythologies associent la foudre à la colère des dieux [4].

Dans la Grèce antique, des philosophes ont tenté de donner des explications rationnelles du phénomène. Aussi, ARISTOTE a émis l'hypothèse d'une fumée tellurique explosant avec force. Dans ses « Questions naturelles », SENEQUE a supposé que la foudre résulterait de la transformation de l'air réchauffé en feu. Par ailleurs, PLINE l'ancien

expliqua que « celui qui voit l'éclair et entend le tonnerre n'est pas l'homme qui a été frappé ». Toutefois, les connaissances de l'époque n'ont pas permis de donner des explications satisfaisantes. Pour autant, une distinction fut déjà établie entre la notion d'éclair (décharges entre deux nuages) et de la foudre (décharges entre nuage et sol). Au Moyen Age, une ancienne coutume de paysans français consistait à porter dans sa poche, par temps d'orage, une pierre de foudre appelée fulgurite. Cette roche se forme par la vitrification de sols siliceux, sous l'effet de la forte chaleur produite par le courant de foudre lors de son impact au sol. Pourtant, selon l'Eglise, ce type de catastrophes naturelles était avant tout une punition d'une faute collective ou individuelle [5].

Au XVIIe siècle, DESCARTES présente des explications plus rationnelles du phénomène orageux en s'appuyant sur une théorie de SENEQUE : le tonnerre se manifesterait lorsque les nuages tombent sur d'autres situés plus bas. L'air situé entre ces deux nuages se comprimerait, produisant ainsi un dégagement de chaleur donnant naissance à un éclair et une détonation qui caractérise le tonnerre.

Il faudra attendre le XVIIIe siècle pour voir apparaître les premières études sur l'électricité marquant ainsi le début de l'ère scientifique. Benjamin FRANKLIN [6] perça les mystères de la foudre en tant que phénomène électrique, notamment avec sa célèbre expérience du cerf-volant en 1752. Son observation des bâtiments frappés par la foudre permit, par la suite, la mise au point de paratonnerres équipant plusieurs monuments.

Toutefois, la survenue d'accidents mortels au cours d'expériences scientifiques permit de prendre conscience du danger des paratonnerres et plus largement de la foudre. Au cours du XIXe siècle, peu de connaissances nouvelles sur les orages et la foudre ont émergé.

En revanche, cette époque fut prolifique en matière de recueil de données statistiques : nombre d'orages, de victimes de la foudre et de diverses manifestations par lesquelles la foudre frappe êtres vivants et édifices. En 1926, l'invention de la caméra à objectifs tournants par Sir Charles VERNONBOYS a permis de montrer toutes les phases du déroulement d'un éclair notamment en enregistrant les foudroiements multiples sur l'Empire State Building de New-York [7], [8].

C'est à cette époque que l'idée de placer des barreaux magnétiques sur les lignes électriques s'aimantant de façon rémanente au passage de courants électriques intenses, a permis d'estimer l'amplitude des courants de foudre [9].

Par la suite, l'arrivée de l'oscilloscope cathodique et des analyseurs très rapide ont servi à observer de manière plus précise les premières formes d'ondes de courants foudre.

Ainsi, au cours de la moitié du XXe siècle, Karl BERGER conclut que la durée d'une décharge pouvait varier entre 0.1 ms et 1 s. On découvrit également que les orages sont indispensables à la vie et qu'ils assurent le maintien du champ électrique de notre planète. En effet, ils agissent comme une machine électrostatique naturelle capable de recharger la couche ionosphérique. Cette partie de l'atmosphère ionisée située à plus de 60 km d'altitude nous protège des rayons solaires et des rayons cosmiques et joue ainsi le rôle d'immense armature de condensateur en maintenant un équilibre électrique entre elle et la surface de la Terre.

I.4 La création et l'action de la foudre

I.4.1 Mécanisme de création des orages et de la foudre

Le nuage orageux est généralement du type cumulo-nimbus (forme d'enclume, couleur sombre à la base). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est de 2 km et le sommet à 10 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage [9].

I.4.2 Début du mécanisme d'électrification

Les violents courants d'air ascendants et descendants entraînent des collisions entre les particules d'eau et le cristal de glace, provoquant ainsi la création de charges positives et négatives [9]

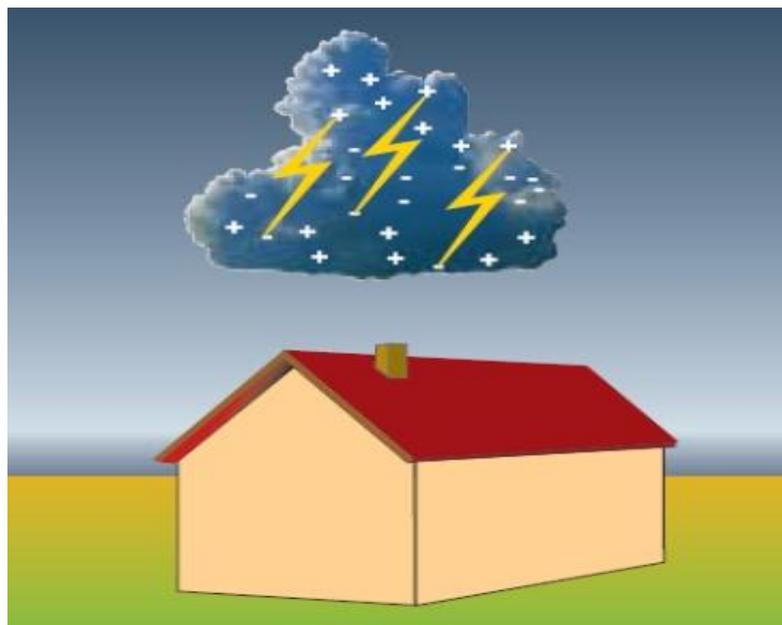


Figure I- 1 Nuage électrifié

I.4.3 Début de la phase active :

Les charges de signe opposé se séparent. Les charges positives se situent dans la partie supérieure, alors que les charges négatives se situent dans la partie inférieure du nuage. Une petite quantité de charges positives demeure à la base du nuage. Les premiers éclairs intra-nuages apparaissent [9].

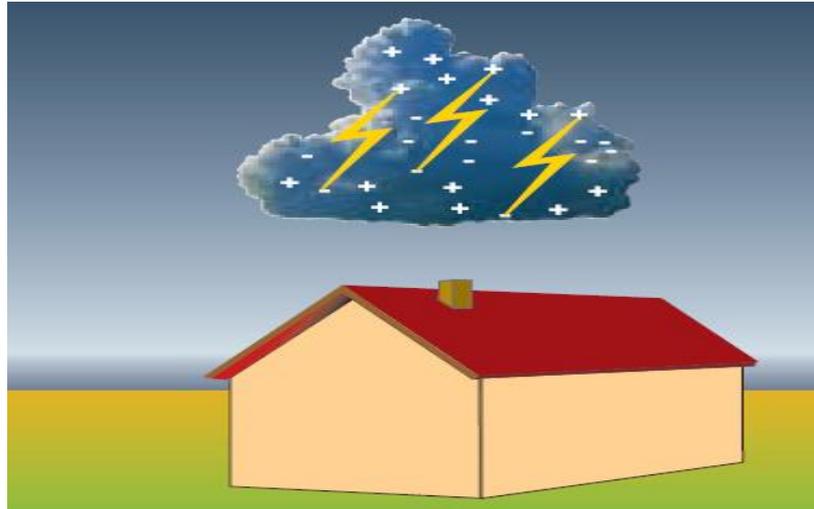


FIGURE I- 2 FORMATION ET REPERTITION DES CHARGES

I.4.4 Maturité de la phase active

Ce nuage forme un énorme condensateur avec le sol :

Après les premiers éclairs intra nuages, des éclairs se forment entre le nuage et le sol (coup de foudre), les premières pluies apparaissent

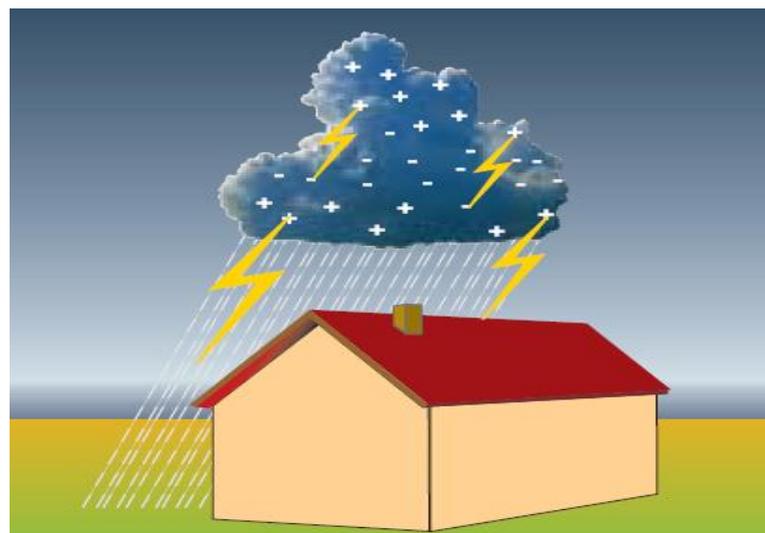


FIGURE I- 3 COUP DE Foudre

I.4.5 Fin de la phase active

L'activité du nuage diminue tandis que le foudroiement du sol s'intensifie : Il s'accompagne de fortes précipitations et de rafales de vent. C'est la phase d'effon - durement du nuage [9].

I.5. Classification des coups de foudre

Les coups de foudre sont classés selon :

- La partie positive ou négative du nuage qui se décharge.
- Le sens de formation du traceur qui se développe entre le nuage et le sol. Il a été observé que dans les pays à climat tempéré, la majorité des coups de foudre sont de type négatif descendant. Ce traceur crée un canal ionisé dans lequel circule l'arc. Selon l'origine du traceur, le coup de foudre sera ascendant ou descendant. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups négatifs ascendants peuvent se développer [9].

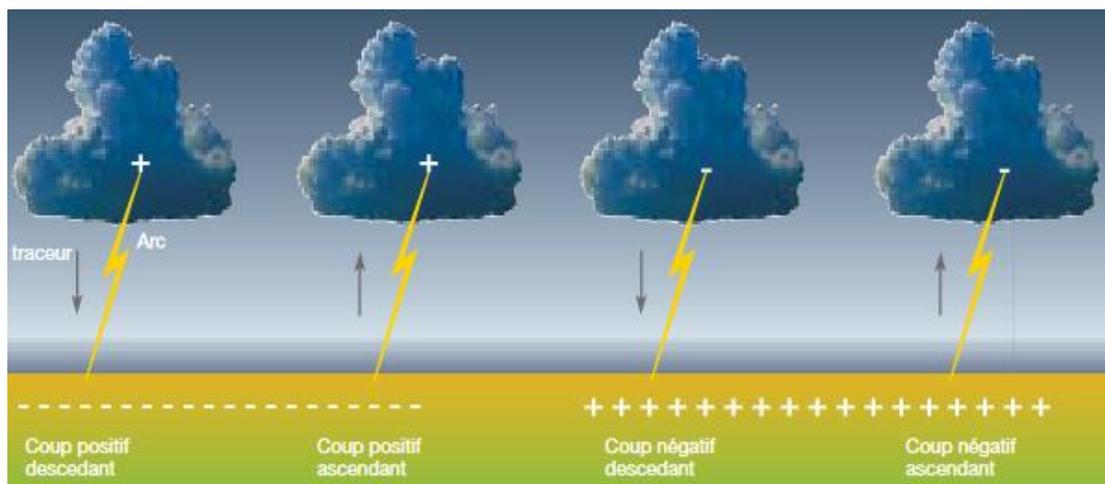


FIGURE I- 4 CLASSIFICATION DES COUPS DE FOUDRE

I.6. Principe d'une décharge

1. Le principe de la décharge d'un coup de foudre négatif descendant est le suivant :
Un traceur se développe à partir du nuage
2. Ce traceur progresse par bonds vers le sol. Il est constitué de particules électriques arrachées au nuage par le champ électrique nuage-sol. Ces particules forment un canal lumineux qui se dirige vers le sol.
3. Lorsque le traceur arrive à proximité du sol, les effluves (étincelles) partent du sol.

4. Les effluves entrent en contact avec la pointe du traceur.
5. Un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur. Cet arc très lumineux permet l'échange des charges électriques entre le nuage et le sol. Le traceur ne progresse plus et devient continu, l'onde de choc se transforme en onde sonore (le tonnerre) la lumière.
6. Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra. Entre ces arcs, le traceur continu subsiste, laissant circuler un courant.



FIGURE I- 5 PRINCIPE D'UNE DECHARGE

I.7. Les conditions de formation de la foudre

La création de la foudre nécessite des conditions météorologiques particulières. Ces conditions sont réunies la plupart du temps en été, lorsqu'à la fin d'une journée ensoleillée, l'humidité remonte dans l'atmosphère, portée par le mouvement ascendant d'une masse d'air chaud. On assiste alors à la création de nuages de plusieurs kilomètres de haut : les cumulonimbus. La hauteur de ces nuages est impressionnante. La base d'un cumulonimbus se situe à 1 000 m d'altitude, et son sommet peut culminer à 10 000 m. Ces cumulonimbus sont constitués d'eau à la base, et, plus on monte, plus cette eau se transforme en glace. Au premier abord, cela semble assez inoffensif : un grand nuage dans le ciel, le soir d'une belle journée d'été. Mais, à l'intérieur de ce grand nuage, toutes les conditions sont réunies pour que ça éclate [10].

I.8. Les différents coups de foudre

La foudre est la manifestation lumineuse de la décharge électrique entre le sol et le nuage. De nombreuses études menées par Berger, Golde, Mason et Uman, ont permis de mieux comprendre le principe de déclenchement des coups de foudre. Ces diverses études ont permis de classer les coups de foudre en différentes catégories qui sont fonction de deux critères importants : Le premier est lié à l'origine de la décharge et le second à la polarité des charges véhiculées. On obtient alors quatre types de coups de foudre indiqués ci-dessous.

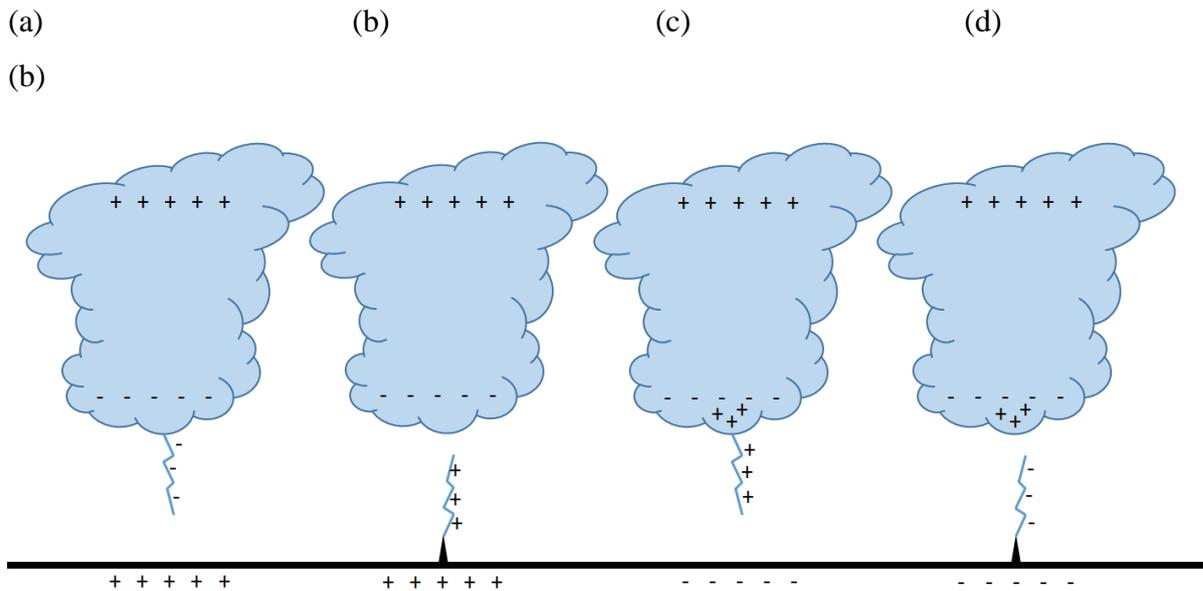


Figure I- 6 Classification des coups de foudre

Dans les pays tempérés, 90% des décharges orageuses sont de type 1. Ce type de décharge, appelée décharge négative, peut par conséquent être considérée comme la forme la plus commune des décharges nuage-sol. Ce type d'éclair est déclenché par un traceur descendant chargé négativement. Les coups de foudre appartenant à la 3 -ème catégorie sont eux aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol. Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 sont déclenchées par des traceurs ascendants et sont relativement rares car elles se produisent généralement aux sommets de montagnes ou de hautes structures [6].

I.9. Points d'impact

La foudre peut tomber directement sur le sol, les structures ou les lignes. Les conséquences peuvent être néfastes du fait de la propagation des perturbations par conduction ou par rayonnement. Le (ou les) point d'impact du coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie inférieure de la trajectoire (aux environs de 300 m d'altitude). De nombreux facteurs locaux peuvent avoir une action sur la localisation de l'impact (arbres, bâtiments, cheminées, nature du sol, cours d'eau, etc.).

I.10. Différents types de foudre

I.10.1 Éclairs intranuageux et internuageux

La disposition des charges électriques dans l'orage, tel qu'expliquée antérieurement, crée des différences de potentiel entre le sommet, le centre et la base de l'orage. Lorsque le potentiel est suffisamment grand, l'air entre ces différents niveaux n'est plus assez isolant et un claquage se produit. La foudre alors générée peut se produire entre les différentes parties du nuage ou entre des nuages voisins.

Comme ces couches sont plus près en général entre elles qu'elles ne le sont du sol, ce genre d'éclairs sera le premier à se produire. À mesure que l'orage prend de l'extension verticale et que le potentiel augmente, la foudre nuage-sol prendra le dessus sans jamais être la seule. Le changement de proportion entre le type inter/intranuageux et nuage-sol est donc une indication du stade de développement du cumulonimbus[6]

I.10.2 Éclairs nuage-sol

Il existe deux types de foudre nuage-sol : soit positif (sommet du nuage vers le sol) ou soit négatif (sol vers base du nuage). Le type négatif est le plus fréquent mais un basculement de ce type vers le type positif est souvent indicatif de temps violent car le nuage est alors particulièrement développé. Le type positif se produit également souvent à l'avant du nuage proprement dit, car il part de l'enclume ce qui peut surprendre les gens qui se pensent à l'abri en voyant l'orage dans le lointain.

I.10.3 Foudre en boule :

La foudre en boule, ou foudre globulaire, est un phénomène météorologique rare. Elle se présenterait sous la forme d'une sphère lumineuse d'une vingtaine de centimètres de diamètre qui apparaîtrait au cours d'un orage. Encore aujourd'hui les connaissances à son sujet sont assez fragmentaires. Cependant la foudre en boule peut être produite selon la

théorie chimique imaginée par les chercheurs néo-zélandais John Abrahamson et James Dinnis. Les premières petites foudres en boules auraient été créées par des scientifiques brésiliens de cette façon :

1. Un arc électrique créé entre deux électrodes vaporise du silicium pour
2. En se refroidissant, le nuage de silicium se contracte en une sphère plus compacte.
3. Le silicium se combine à l'oxygène de l'air. Une réaction chimique dégage de l'énergie donnant une température estimée de 1700°C à ces boules de feu produites par les chercheurs brésiliens. Trois fois moins que la température de surface du Soleil (selon le magazine Science et Vie Junior, no. 213, juin 2007). Les boules de foudre tournent généralement sur elles-mêmes juste au-dessus du sol puis disparaissent ou partent dans tous les sens.

I.11. Le traceur

Le canal ionisé formé ainsi entre les deux pôles un pont suffisamment conducteur pour permettre à la foudre de se propager. On dit un traceur car il trace le chemin de l'éclair, en formant une ramification dans le ciel visible par l'œil nu, en progressant par bonds. La figure ci-dessous

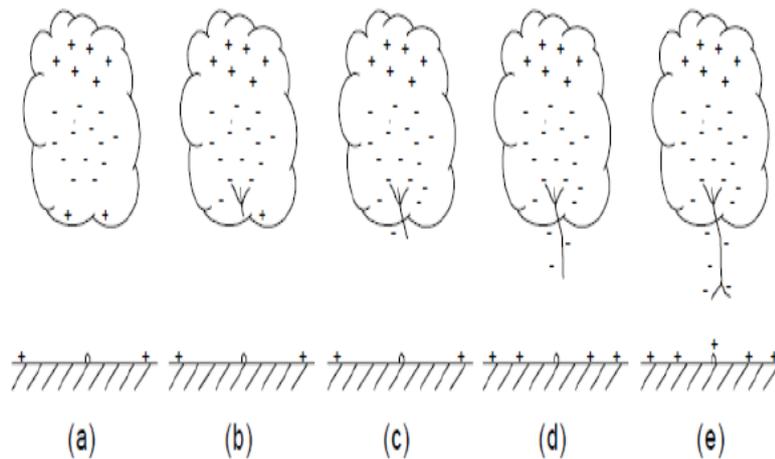


FIGURE I- 7 LES DIFFERENTS ETAPES DU DEVELOPPEMENT D'UN TRACEUR PAR BONDS

I.12. L'arc en retour

Dès que la pointe du traceur s'approche du sol, les pré-décharges ascendantes se forment et rejoignent le traceur ascendant situé à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol (60 mètres en moyenne), dès que le traceur par bonds négatif rencontre les pré-décharges positives du sol, une connexion se produit entre elle. Les pré-décharges qui neutralisent à ce moment le traceur par bonds en remontant le canal ionisé est appelé « arc en retour ».

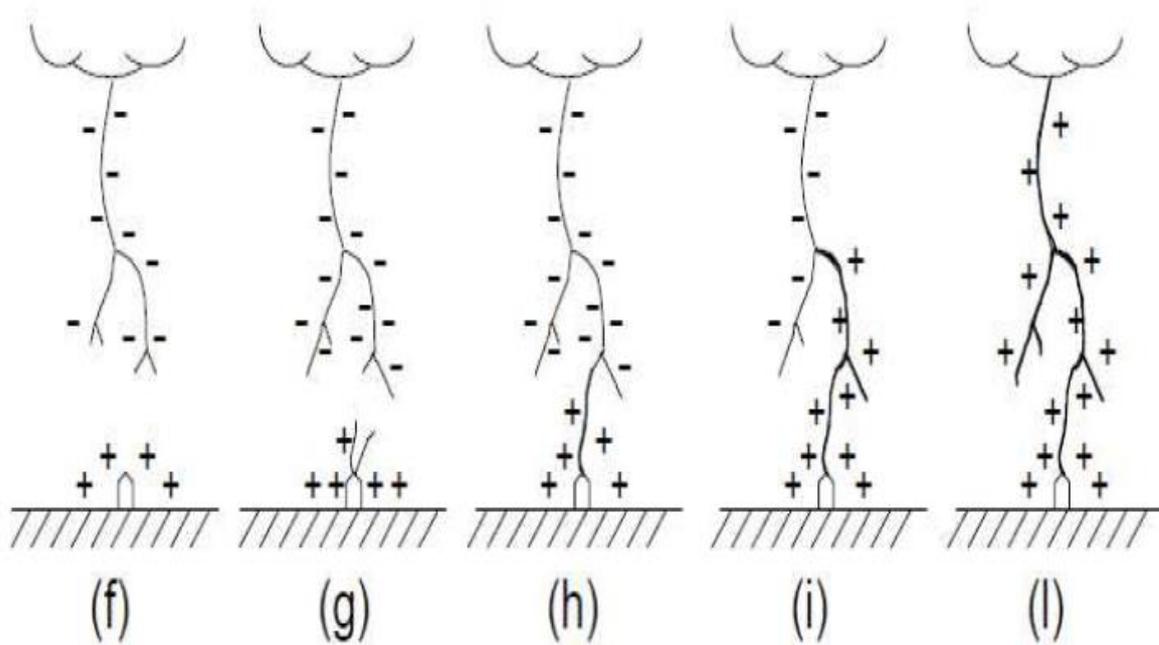


FIGURE I- 8PRESENTATION D'UN L'ARC EN RETOUR

I.13. Les effets de la foudre

Les effets d'un courant de décharge atmosphérique (engendré par un impact de foudre) sont liés à la présence de tout courant dans un conducteur. Ils sont de différentes natures :

a. Effets électriques d'un impact de foudre

Dans les chemins variés et complexes empruntés par la foudre pour s'écouler vers la terre apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances. Celles-ci provoquent des claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol.

Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants, notamment en surface (tension de pas). De plus, des effets électriques indirects, liés au couplage galvanique ou

couplage par conduction, engendrent des perturbations sur les lignes d'énergie électrique et sur les lignes de télécommunications ainsi que sur les réseaux de masse[11]

a. Effets électrodynamiques

Entre conducteurs parallèles ou quasi parallèles parcourus par des courants de même sens s'exercent des forces d'attraction (antennes tubulaires minces, descentes de paratonnerre et descentes de gouttière, etc.) qui entraînent des contraintes mécaniques et déforment ces conducteurs qui s'entrechoquent ou même s'écrasent.

b. Effets acoustiques : le tonnerre

L'arc en retour crée une brutale augmentation de pression de l'air dans le canal de décharge due aux forces électrodynamiques développées lors du l'éclair.[10] Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courte distance (pressions de centaines d'atmosphères dans le plasma du canal de foudre). Celles-ci provoquent des bris de vitres proches du point d'impact. L'onde de choc acoustique d'un coup proche (de l'ordre de quelques mètres) est à l'origine des déflagrations importantes citées au paragraphe précédent. La perception du tonnerre ne dépasse guère 10 kilomètres dans les régions tempérées à forte urbanisation et à grande densité de population [11]

c. Effets thermiques

La décharge atmosphérique produit la fusion des parties métalliques au point d'impact. Les coups chauds (ceux qui durent plus d'un centième de seconde) peuvent enflammer du bois sec et provoquer des incendies. Dans des sols mauvais conducteurs (silice), il y a vitrification au passage du courant de foudre (plasma à 30.000 °C !) et formation de fulgurites (cf. figure ci-dessous), structures géologiques particulières de sable siliceux fondu ressemblant à du verre naturel. Les fulgurites suivent la forme ramifiée des éclairs ; on parle d'éclairs fossilisés.

Leurs dimensions peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres (exemple : une fulgurite de 35 m de longueur a été extraite du désert libyen). Hormis au point d'impact, la foudre ne peut faire fondre que des fils métalliques assez fins. Les décharges de longue durée entraînent facilement une mise à feu. Il faut prendre garde aux mauvais contacts. L'eau contenue dans le bois ou les maçonneries (en particulier dans les fissures, les jointures, les

cavités, la sève des arbres, etc.) s'évapore instantanément et la pression qui en résulte provoque une explosion[12]

d. Effets électromagnétiques

Les effets électromagnétiques sont des effets induits sur des boucles ouvertes où les différences de potentiel atteintes peuvent provoquer des étincelles et donc des incendies, surtout en présence de matières inflammables ou explosibles. Vu l'importance des amplitudes de courant en jeu, des surtensions sont véhiculées jusqu'aux équipements électriques et électroniques en leurs extrémités provoquant des dégâts, voire des destructions complètes, et altérant la qualité du service. Les signaux parasites détruisent des composants électroniques de plus en plus miniaturisés et donc de plus en plus sensibles aux surtensions.

e. Effets électrochimiques

Ces effets sont essentiellement dus à la corrosion accélérée subie, sous l'influence des courants de fuite, par des objets métalliques enterrés, tels que les câbles et les canalisations, ainsi que les conducteurs de mise à la terre. Cependant, compte tenu de la très faible durée du coup de foudre, ces effets demeurent négligeables comparés aux autres effets. [13].

j. Onde de choc :

Lors d'un coup de foudre, l'air situé dans le canal ionisé est brutalement porté à une température évaluée à environ 30000 kelvin il se produit alors une onde de surpression importante :

Le coup de tonnerre. Les effets de cette onde de choc même s'ils sont limités, ne doivent pas être oubliés [14].

k. Les effets sur l'homme et l'être vivants :

On peut classer les effets sur l'homme et l'être vivant selon deux classes :

- ceux qui sont directement liés au foudroiement et qui sont de nature thermique, Électrique, auditif, oculaire etc. et qui sont très spécifiques à la foudre.
- ceux qui font suite aux conséquences des effets indirects d'un foudroiement ; brûlures liées à un incendie, courants électriques à fréquences industrielles de défauts, etc. [15].

1. Les effets sur les structures :

Les coups de foudre peuvent engendrer tous les dégâts suivants [15] :

- Incendies, des chuts d'arbre provoquant des accidents.
- Explosions de liquides ou de gaz inflammables.
- Dommages sur les réseaux électriques et téléphoniques.
- Dommage sur les sites agricoles : élevages, piscicultures.
- Dommage sur les sites industriels : installation portuaires, raffineries de pétrole.

I.14. Statistiques générales

I.14.1 Considérations factuelles

Dans le monde, la foudre frappe statistiquement de 50 à 100 fois par seconde. Pour ce qui concerne le territoire français, on estime à 2 000 000 environ le nombre de coups de foudre observés par an. Les conséquences de ce phénomène atmosphérique sont particulièrement importantes. Ainsi, on compte en moyenne sur le territoire français :

- Plusieurs dizaines de morts par an,
- 20 000 animaux foudroyés dont 10 000 vaches,
- Environ 20 000 sinistres dus à la foudre dont 15 000 incendies,
- Des milliers de compteurs détruits. D'un point de vue financier, le coût annuel des

dommages se chiffre en dizaines de millions d'euros.[16]

I.14.2 Analyse d'accidents dus à la foudre

A. Présentation

L'analyse d'accidents menée dans le cadre du présent rapport a été établie à partir de données issues de la base de données ARIA du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles). Ainsi, l'analyse concerne 151 accidents survenus en France (101 cas) ou à l'étranger (50 cas) depuis la fin des années 1970 jusqu'au mois de septembre 2010. Un descriptif synthétique de ces accidents est fourni en Annexe 4 du présent rapport [17].

Compte tenu du nombre limité de références, il n'est bien entendu pas question d'en tirer des conclusions statistiques. Néanmoins, l'examen de ces accidents permet d'identifier quelques-unes des principales caractéristiques des sinistres initiés par la foudre.

B. Résultats de l'analyse d'accidents

La foudre frappe directement l'objet (installation ou bâtiment) dans près de 60 % des cas (49 cas d'agression directe). Dans ces cas, la foudre a frappé les cibles suivantes :

- Les toitures et structures des bâtiments (13 cas),
- Les capacités de stockage : gazoducs, cuves, bacs (10 cas),
- Les produits stockés : bois, sciure, papier, limailles de fer, batteries (6 cas),
- Les installations électriques : armoires électriques, automatismes (5 cas),
- Les protections contre la foudre : paratonnerre (3 cas),
- Les installations mobiles : pétrolier, véhicule, semi-remorque (3 cas). Dans près de 40 % des cas, la foudre frappe les lignes et canalisation connectées aux bâtiments (36 cas d'agressions indirectes).

Dans ces cas, la foudre a frappé les cibles suivantes :

0. Les automatismes (16 cas).
1. Les installations électriques dans les bâtiments : armoires électriques, compteur, fusibles, alternateur, condensateur (8 cas).
2. Les lignes électriques pénétrantes dans les bâtiments : ligne HT, ligne BT, ligne de transmission (4 cas).
3. Les équipements électriques à l'intérieur des bâtiments : pompes, réacteur, capteur (4 cas).
4. Les transformateurs (3 cas). La majorité des accidents enregistrés sont consécutifs d'un Impact sur une structure ou sur une ligne entrante [18].

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une courte synthèse sur le phénomène de la foudre. La foudre est un phénomène naturel susceptible de détruire une grande diversité de matériels, la quantité d'électricité transportée lors de chaque décharge est extrêmement importante et même dans le cas de petites décharges, provoque des tensions qui excèdent largement les tensions maximum admissibles des matériels électriques, alors la protection contre le danger de la foudre est importante. Elle fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II :

*Systemes de protection contre la
foudre*

Chapitre II : Système de protection contre la foudre

II.1 Introduction

Afin de protéger une structure contre la foudre, un **Système de protection contre la foudre** doit être conçu conformément aux normes de protection foudre (NF EN 62305, NF C 17-102, UTE C 15-443...) [14].

Il existe deux types de protection contre la foudre :

- La protection intérieure, ou parafoudre
- La protection extérieure, ou paratonnerre.

Le parafoudre vise à protéger les appareils électriques à l'intérieur de la maison. Il s'agit d'installations permettant de dévier la surcharge électrique dans la terre afin de protéger les appareils électriques (informatique, alarmes, télécommunications, TV) contre les surtensions.

L'installation d'un parafoudre n'est pas obligatoire mais vivement recommandé par l'Établissement cantonal d'assurance des bâtiments (**ECAB**). Il vient très souvent de pair avec le paratonnerre. Il est possible de l'installer après la construction d'une maison si l'on désire des mesures supplémentaires pour se protéger.

Le paratonnerre protège les installations électriques d'une habitation. Il s'agit d'un dispositif de capture qui canalise la foudre et l'évacue dans le terrain alentours. Il n'est en général pas obligatoire d'installer un paratonnerre ; cela dépend du permis de construire et des recommandations de la police du feu. Toutefois, les bâtiments publics tels que les écoles et les hôpitaux ont l'obligation d'en installer [19].

II.2. Les systèmes de protection foudre

Ce paragraphe reprend quelques recommandations de la norme NF EN 62305-3. Il a pour objectif de montrer quelques mesures qui illustrent ce qu'est une protection contre la foudre. Les caractéristiques d'un système de protection foudre (SPF) sont déterminées par les caractéristiques de la structure à protéger et par les niveaux de protection à prendre en

compte. Quatre types de SPF (I à IV) sont définis, qui correspondent aux niveaux de protection définis dans la norme NF EN 62305-1.

TABLEAU II- 1 LISE DES FIGURES

| Niveau de protection issu de l'ARF | Types de SPF | Efficacité de la protection | Probabilité PB de défaillance du SPF | Probabilité de PSPD de défaillance des réseaux internes |
|------------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|
| IV | IV | 80% | 0.2 | 0.03 |
| III | III | 90% | 0.1 | 0.03 |
| II | II | 95% | 0.05 | 0.02 |
| I | I | 98% | 0.02 | 0.01 |
| I+ | I(9) | 99% | 0.01 | 0.005 |
| I++ | I(10) | 99.9% | 0.001 | 0.001 |

II.2.1 Installation extérieure de protection contre la foudre (IEPF)

Installation extérieure de protection contre la foudre l'IEPF est la partie extérieure du système de protection foudre (SPF) destinée à capter, conduire et écouler le courant de foudre vers le sol. Sa fonction est donc de préserver l'intégrité de la structure en faisant suivre aux courants de foudre un chemin dont l'impédance est maîtrisée afin qu'il soit le passage privilégié de la foudre

L'IEPF est constituée :

- D'un système de capture destiné à être le point d'impact privilégié de la foudre.
- De conducteurs de descente assurant l'écoulement des courants de foudre vers le sol.
- D'une prise de terre assurant la dissipation de ces courants en limitant les risques pour les systèmes et les personnes à proximité des installations.

II.2.1.1 Dispositifs de capture

La probabilité de pénétration d'un courant de foudre dans la structure est considérablement réduite par la présence d'un dispositif de capture convenablement conçu. Pour les structures de hauteur supérieures à 60 m, un complément de dispositifs de capture doit être mis en place sur les façades latérales sur les 20% les plus hauts du bâtiment [19]. Ces dispositifs sont comme suit des Tiges simples, fils tendus ou conducteurs maillés,

structure naturelle et paratonnerre à dispositif d'amorçage (NF EN 62305-3 :2006-12 et NF EN 62305-3 :2012-12)

A. Tiges simples (compris les mâts séparés) (PTS) :

Par leur géométrie dominante, ils favorisent le déclenchement des amorçages ascendants et s'imposent ainsi comme le point d'impact préférentiel des coups de foudre qui surviendraient dans un voisinage très proche. Ce type de protection est particulièrement conseillé pour les stations hertziennes et les mâts d'antenne lors quel volume à protéger est faible [20].

Une installation de paratonnerre à tige simple comporte (FigureII-1) [SOU16][21]:

- Un paratonnerre à tige et son mâtrallonge,
- Un ou deux conducteurs de descente,
- Une barrette de coupure ou joint de contrôle par descente permettant la vérification de la résistance de la prise de terre paratonnerre, un tube de protection protégeant les deux derniers mètres de chaque descente, une liaison équipotentielle déconnectable entre chaque prise de terre et le circuit de terre général de la structure.

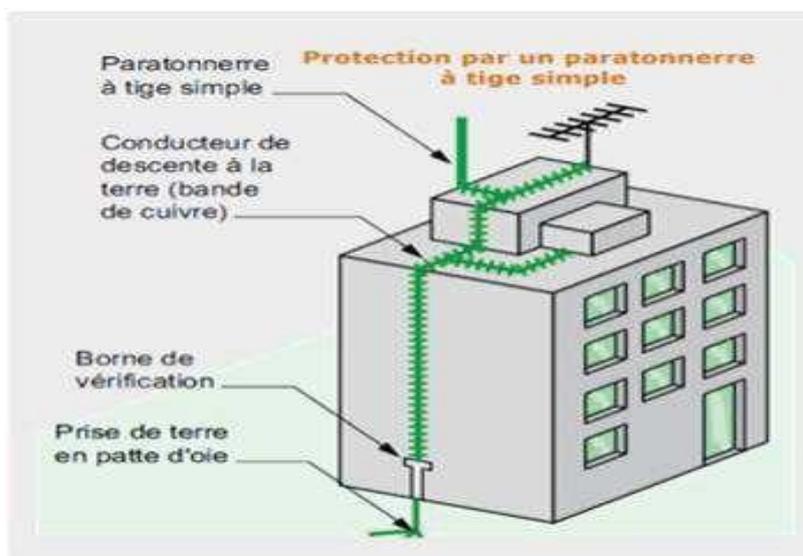


FIGURE II- 1UNE INSTALLATION DE PARATONNERRE A TIGE SIMPLE COMPORTE

B. Fils tendus :

Ce système est composé d'un ou plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger (Figure II-2). Les conducteurs peuvent être reliés à la terre à chacune de leur extrémité. L'installation de fils tendus nécessite une étude particulière tenant compte notamment de la tenue mécanique, de la nature de l'installation, des distances d'isolement. Le paratonnerre à fil tendu est aussi dit « Paratonnerre horizontal ».

Cette technologie est très utilisée pour protéger les dépôts de munition et en règle générale lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser la structure du bâtiment comme support des conducteurs qui écoulent le courant de foudre à la terre [21].

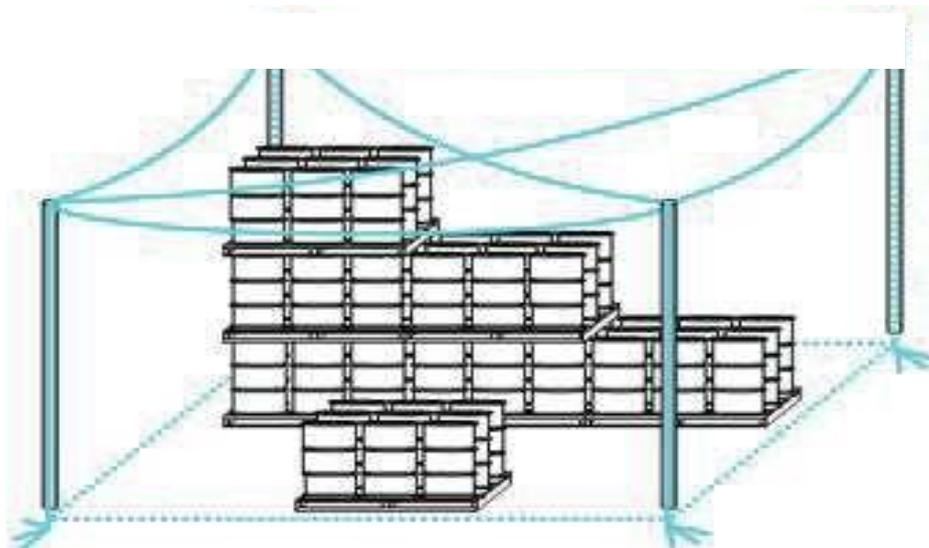


FIGURE II- 2PROTECTION D'UN STOCKAGE DE FUTS EXTERIEURS PAR PARATONNERRE A FILS TENDUS [21].

C. Conducteurs maillés :

A un coût acceptable, cette installation n'est pas adaptée à des bâtiments de grande superficie ou à des zones avec de multiples unités. Nous l'écartons.

Pour certaines configurations des objets à protéger, le paratonnerre à tige ne permet pas d'assurer la bonne protection. On se retrouve contraint de réaliser une combinaison de paratonnerres verticaux formant ainsi une cage maillée dite cage de Faraday.

Une installation par cage maillée (Figure II-3) impose un nombre de descentes important et constitue de ce fait une solution intéressante lorsque le matériel situé à

L'intérieur du bâtiment est sensible aux perturbations électromagnétiques. En effet, le courant de foudre est divisé par le nombre des descentes et la faible valeur du courant circulant dans les mailles crée peu de perturbations. Son principe consiste à favoriser la répartition et l'écoulement vers la terre du courant de foudre par un ensemble de conducteurs et prises de terre [22].

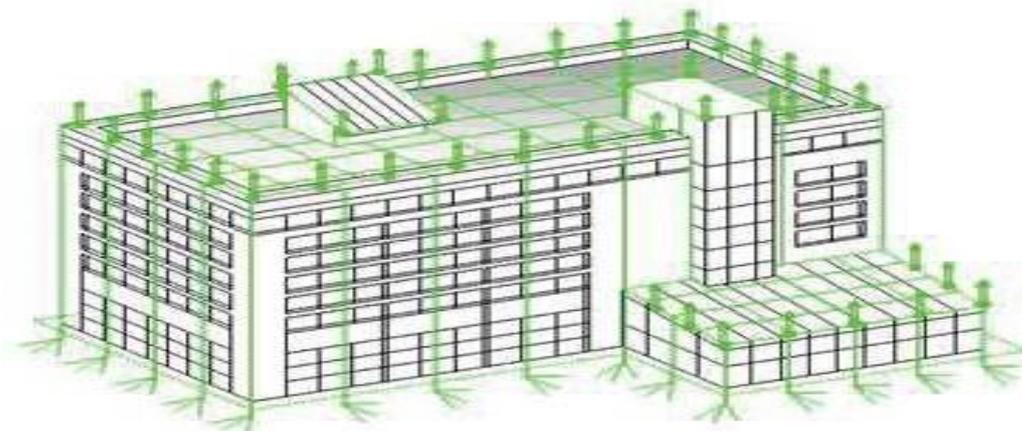


FIGURE II- 3PROTECTION D'UN BATIMENT PAR UN PARATONNERRE A CAGE MAILLEE
[21]

D. Structures naturelles :

Les couvertures métalliques peuvent être utilisées comme éléments naturels de capture si leur épaisseur est supérieure à 0,5 mm et s'il n'est pas nécessaire de protéger contre les problèmes de perforation paratonnerres à dispositif d'amorçage, de point chaud ou d'inflammation. Si nous n'acceptons pas le risque de perforation l'épaisseur est amenée à 4 mm. Nous ne pouvons pas accepter la perforation d'éléments métalliques au-dessus des matières combustibles stockées dans le bâtiment de tri ou sur les unités concentrant du biogaz...

E. Paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA) :

Malgré la réduction obligatoire des rayons de protection de 40%, les PDA permettent en un point de protéger une grande superficie. Cette solution sera donc la plus adaptée techniquement et économiquement à la protection des unités. De plus cette solution permet d'éviter tout impact directement sur les unités et donc d'éviter les points chauds, étincelage [19].

Il n'en reste pas moins que l'amélioration du paratonnerre de Franklin ou à tige simple consiste à créer une ionisation nettement supérieure à celle qui résulte de l'effet couronne

spontané, ou à maîtriser cet effet couronne pour optimiser sa production [22].

Sur cette base, les paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA) ou encore (ESE), de l'anglais Early Streamer Emission (Figure II-4), ont fait leur apparition en 1984 en France puis en Espagne. Aujourd'hui ; ce type de paratonnerres est proposé par un large nombre de fabricants (américains, chinois, australiens, argentins, turcs, indonésiens, etc. ...).

Ces dispositifs à pointes actives reposent sur la théorie « de l'avance à l'amorçage »: le dispositif d'amorçage permet d'accroître la distance d'amorçage en générant un traceur ascendant précoce (par rapport au traceur ascendant naturellement émis par une pointe simple) et ainsi la zone de protection du paratonnerre.



FIGURE II- 4 PARATONNERRE A DISPOSITIF D'AMORÇAGE(PDA) [23].

Il convient d'installer les composants des dispositifs de capture aux coins, aux points exposés et sur les rebords (particulièrement aux points hauts et à la partie supérieure des façades) conformément à l'une ou à plusieurs des méthodes (combinées) suivantes :

- **La méthode de l'angle de protection :**

Adaptée pour la plupart des formes simples de bâtiments, mais elle est soumise aux limites de hauteur (20 m en niveau I, 30 m en niveau II, 45 m en niveau II et 60 m en niveau IV). La position du dispositif de capture est considérée appropriée si la structure à protéger est complètement située à l'intérieur du volume protégé par le dispositif de capture.

- **La méthode de la sphère fictive :**

L'emplacement du dispositif de capture est approprié si la sphère de rayon r , selon le niveau de protection (rayon de 20 m en niveau I, de 30 m en niveau II, de 45 m en niveau III et de 60 m en niveau IV), roulant autour et au sommet de la structure dans toutes les

directions possibles ne vient en contact avec aucun point de la structure à protéger. De cette manière, la sphère touche uniquement le dispositif de capture et le sol. La méthode de la sphère fictive est appropriée dans tous les cas, notamment pour des structures de forme complexe.

- **La méthode des mailles :**

Les conducteurs de capture sont situés sur des bordures de toit, des avancées de toit, des pentes de toit si leur pente est supérieure à 1/10. Les dimensions des mailles ne doivent pas être supérieures aux valeurs suivantes : 5 x 5 m en niveau I, 10 x 10 m en niveau II, 15x15 m en niveau III et 20 x 20 m en niveau IV. La méthode des mailles est une forme appropriée de protection pour les surfaces planes. Utilisation des composants naturels du bâtiment (NF EN 62305-3 :2006-12 et NF EN 62305-3 :2012-12)

Selon la norme NF EN 62305 :2006 -12, les composants naturels en matériau conducteur qui resteront toujours dans la structure et qui ne seront pas modifiés (par exemple armatures d'acier interconnectées, structures métalliques, etc.) peuvent être utilisés comme une partie de l'installation de protection.

Il convient que les autres composants naturels soient utilisés comme complément à l'installation de protection

Sous certaines conditions, les parties suivantes des structures peuvent être considérées comme dispositifs de capture naturels et constituer des parties du Système de Protection foudre :

Les tôles métalliques recouvrant la structure à protéger

Les éléments métalliques de construction du toit (fermes, armatures acier interconnectées, etc.) ;

- Les parties métalliques de type gouttières, décorations, rambardes, etc.,
- Les tuyaux et réservoirs métalliques sur la toiture,
- Les tuyaux et réservoirs métalliques de mélanges combustibles et explosifs [24].

II.2.1.2 Conducteur de descente

Le paratonnerre est relié à la terre par au moins deux conducteurs de descente situés, dans la mesure du possible, sur des façades opposées. Ces conducteurs de descente doivent être installés à l'extérieur du bâtiment, en évitant la proximité de canalisations électriques et de conduites de gaz. Leur cheminement doit être le plus rectiligne possible, en suivant le trajet le plus court jusqu'à la terre et en évitant toute formation de coude ou remontée

soudaine. Plusieurs paratonnerres PDA installés sur un même bâtiment peuvent partager les mêmes conducteurs de descente.

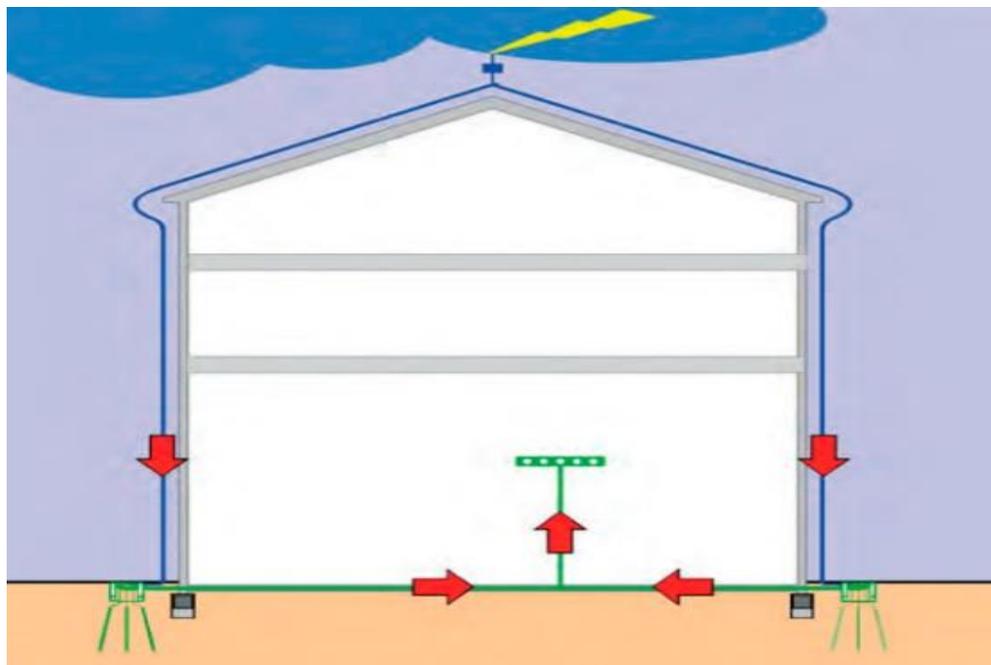


FIGURE II- 5 CONDUITEUR DE DESCENTE PARTAGE MEME BATIMENT

Dans l'objectif de réduire la probabilité de dommages provoqués par les courants de foudre circulant à travers le SPF, les conducteurs de descente doivent être placés de manière à ce que les distances du tableau ci-dessous soient respectées [25]. :

TABLEAU II- 2 DISTANCES ENTRE LES FIXATIONS DES DESCENTES

| Disposition | Points de fixation pour conducteurs torsadés ou ruban | Points de fixation pour conducteurs pleins |
|---|---|--|
| Conducteurs horizontaux sur surfaces horizontales ou verticales | 50 cm | 1 m |
| Conducteurs verticaux du sol jusqu'à 20 m | 1 m | 1 m |
| Conducteurs verticaux au-dessus de 20 m | 1 m | 1 m |

TABLEAU II- 3NIVEAU DE PROTECTION

| Niveau de protection | Distance entre conducteur de descente |
|----------------------|---------------------------------------|
| 1 | 10m |
| 2 | 10m |
| 3 | 15m |
| 4 | 20m |

II.2.1.3 Les prises de terre :

Afin d'assurer l'écoulement du courant de foudre dans la terre tout en minimisant des surtensions potentiellement dangereuses, la forme et les dimensions du réseau de prises de terre constituent les critères importants. Généralement, une faible résistance de terre (si possible inférieure à 10 Ω lors d'une mesure à basse fréquence) est recommandée.

1. Dispositions de prise de terre :

Pour les prises de terre, deux dispositions de prise de terre sont utilisées :

- La disposition A comporte des électrodes de terre horizontales ou verticales, installées à l'extérieur de la structure à protéger [26]., connectées à chacune des descentes. La longueur minimale de chaque électrode de terre est de $L1$ lorsque l'électrode est horizontale ou de $0,5 \times L1$ lorsqu'elle est verticale ou inclinée. Le nombre minimal d'électrodes de terre doit être de deux. $L1(m)$

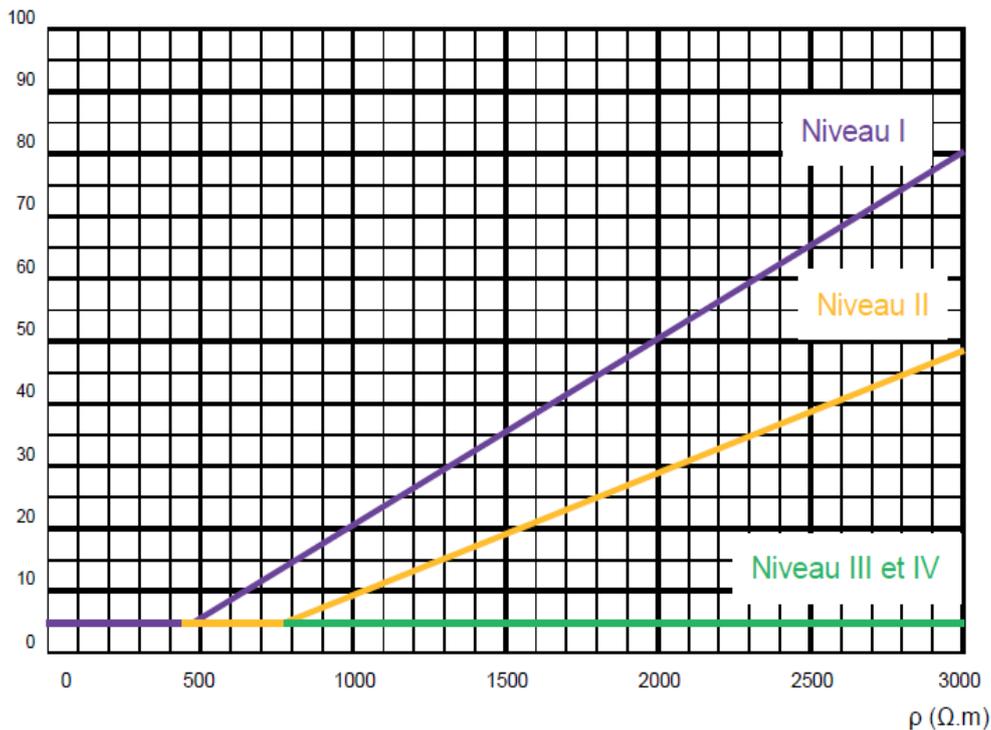


FIGURE II- 6 LONGUEUR MINIMALE L1 DE CHAQUE PRISE DE TERRE, EN FONCTION DES NIVEAUX DE SPF ET DE LA RESISTIVITE DU SOL

Les longueurs minimales de chaque électrode (L1) telles qu'indiquées à la figure ci-dessus peuvent ne pas être considérées, si la valeur de résistance de la prise de terre est inférieure à 10 ohms. Il n'y a pas de valeur de résistivité maximale pour une prise de terre à condition de respecter les longueurs minimales d'électrodes.

- La disposition B comporte, soit une boucle extérieure à la structure à protéger, en contact avec le sol sur au moins 80 % de sa longueur, soit une boucle à fond de fouille. Ces prises de terre peuvent aussi être maillées. Pour une prise de terre en boucle (ou une prise de terre à fond de fouille), le rayon géométrique moyen r_e de la surface intéressée par la prise de terre ne doit pas être inférieur à la valeur de L1 (voir figure page précédente):

$$r_e > L1$$

Lorsque la valeur prescrite de L1 est supérieure à la valeur appropriée de r_e , des conducteurs radiaux ou verticaux (ou inclinés) supplémentaires doivent être rajoutés ; les longueurs L_r (horizontale) et L_v (verticale) sont obtenues à l'aide des formules suivantes :

$$L_r = L1 - r_e$$

$$L_v = (L1 - r_e) / 2$$

Dans la roche vive nue, seule la disposition B est recommandée.

Pour des structures avec systèmes électroniques ou à risque d'incendie élevé, une disposition B est préférée.

Les armatures d'acier interconnectées du béton ou d'autres structures métalliques souterraines peuvent être utilisées comme prises de terre naturelles, sous réserve de respecter les sections indiquées dans la norme NF EN 62305-3 (exemples 50 mm² de cuivre ou 75 mm² d'acier).

a) Prise de terre à fond de fouille :

Une prise de terre à fond de fouille, comporte des conducteurs installés dans la fondation de la structure sous la surface du sol. Il convient que la longueur des prises de terre complémentaires soit déterminée en utilisant le diagramme de la Figure précédente.

Les prises de terre à fond de fouille sont incorporées dans le béton. Elles présentent l'avantage d'être bien protégées contre la corrosion si le béton est correct et recouvre la prise de terre à fond de fouille d'une couche d'au moins 50 mm.

Il convient que les métaux utilisés pour les prises de terre soient conformes aux matériaux énumérés dans le Tableau 7 de la norme NF EN 62305-3 :2006-12 et de la norme NF EN 62305-3 :2012-12, tout comme il convient de toujours tenir compte de la tenue des métaux à la corrosion dans le sol. Il convient que les prises de terre dans le sol utilisent des conducteurs en cuivre ou en acier inoxydable lorsqu'elles sont connectées à du fer dans du béton.

b) Prises de terre naturelles

Peuvent être utilisées comme prises de terre naturelles les armatures d'acier interconnectées du béton ou d'autres structures métalliques souterraines, conformément au § 5.6 de la NF EN 62305-3 :2006-12 et de la norme NF EN 62305-3 :2012-12.

Si l'armature métallique du béton est utilisée comme prise de terre, un soin particulier doit être apporté aux interconnexions, pour éviter un éclatement mécanique du béton.

c) Mise en œuvre :

Les prises de terre doivent être installées de façon à permettre une inspection pendant la construction. La profondeur d'enfouissement et le type des électrodes de terre doivent minimiser les effets de la corrosion, de l'assèchement, et du gel du sol pour stabiliser la valeur de la résistance de terre équivalente. Il est recommandé que la partie supérieure d'une

prise de terre verticale égale à la profondeur du sol gelé ne soit pas considérée pour le calcul dans des conditions de gel (En plus de la longueur l_1 , il convient d'ajouter une longueur de 0,5 m pour toute électrode verticale).

Dans la roche vive nue, seule la disposition B est recommandée.

Pour des structures avec systèmes électroniques ou à risque d'incendie élevé, une disposition de prise de terre de type B est préférable.

Prise de terre selon NF C 17-102 :2011-09 pour paratonnerre à dispositif d'amorçage
Une prise de terre est réalisée pour chaque conducteur de descente sur la base d'au moins deux électrodes par prise de terre.

Conformément à la norme, les prises de terre doivent répondre aux exigences suivantes :

- La valeur de résistance mesurée à l'aide d'un équipement classique doit être la plus basse possible (inférieure à 10 Ω). Cette résistance doit être mesurée au niveau de la prise de terre isolée de tout autre composant conducteur ;
- Éviter les prises de terre équipées d'un composant vertical ou horizontal unique excessivement long (> 20 m) afin d'assurer une valeur d'impédance ou d'inductance la plus faible possible.

Sauf impossibilité réelle, il convient que les prises de terre soient toujours dirigées vers l'extérieur des bâtiments.

4. Types des prises de terre

a. Prise de terre de type A

Prise de terre spécifique, devisé en A1 et A2 :

5. A1 – les conducteurs de même nature et section que les conducteurs de descente ;
à l'exception de l'aluminium, disposé sous forme de patte d'oie de grandes dimensions et entrés à une profondeur minimum de 50 cm.
6. A2 – ensemble composé de plusieurs électrodes verticales de longueur totale minimum de 6m a une profondeur minimum de 50cm :
 - Disposées en ligne ou en triangle et séparé les unes des autres par une distance égale a au moins la longueur enterrée ;

- Interconnectée par conducteur enterré identique au conducteur de descente ou aux caractéristiques compatibles avec de dernier.

b. Prise de terre de type B

Cette disposition comprend soit une boucle extérieure à la structure en contact avec le sol sur une longueur d'au moins 80 % de la boucle, soit une prise de terre à fond de fouille, à condition qu'elle soit constituée d'un conducteur de 50 mm². De plus, il convient que chaque conducteur de descente soit au moins connecté à une électrode horizontale de longueur 4 m minimum ou à une électrode verticale de longueur 2 m minimum.

La norme NFC 17102 impose une section de 50 mm² pour le cuivre (ou équivalent pour d'autre matériaux) pour qu'un fond de fouille soit utilisable comme élément dissipateur de foudre. Aucune information sur ce point n'a pu être retrouvée. Il sera donc nécessaire de créer des prises de terre paratonnerres spécifiques de type A pour les descentes des PDA [27].



FIGURE II- 7PRISE DE TERRE TYPE

II.2.2 Installation intérieure de protection contre la foudre

Installation intérieure de protection contre la foudre IIPF est la partie intérieure du SPF qui réalise l'équipotentialité des conducteurs métalliques et évite les étincelages dangereux. L'installation intérieure de protection contre la foudre a pour objectifs d'empêcher l'apparition d'étincelles dangereuses dans la structure à protéger, dues à l'écoulement du courant dans l'installation extérieure de protection contre la foudre ou dans les éléments conducteurs de la structure [27].

Les étincelles peuvent apparaître entre l'installation extérieure et les composants suivants :

- Les installations métalliques.
- Les systèmes intérieurs.
- Les éléments conducteurs extérieurs et les lignes pénétrant dans la structure.

II.2.2.1 Protection des appareils par la mise en place de liaisons équipotentielles

En cas d'atteinte directe de la foudre ou même en présence d'effets indirects, les défauts d'équipotentialité peuvent provoquer par différence de potentiel des amorçages générateurs de courants parasites particulièrement de structures. De plus, une bonne équipotentialité par interconnexion de l'ensemble des prises de terre d'un même site est indispensable à l'efficacité d'une installation de protection. Il est de même de l'interconnexion des masses métalliques situées dans l'environnement proche d'équipements sensibles (autocommutateurs, UC informatique) [28].

A- Distance de séparation :

Le calcul de distance de séparation permet d'établir un critère pour choisir de réaliser l'éventuelle liaison équipotentielle nécessaire pour éviter les étincelles.

On calcule une distance de séparation en un point particulier en fonction de coefficient relié a des caractéristiques de l'installation paratonnerre puis on compare cette distance a l'écartement physique entre les éléments du système de protection foudre (descente et pointes notamment)

- Si la distance de séparation est inférieure à la distance physique, il n'y a pas de risque d'amorçage.
- Si la distance de séparation est supérieure à la distance physique, il y a risque d'amorçage et il convient de prendre les mesures nécessaires pour le réduire. Ces mesures peuvent être un éloignement du conducteur de descente ou de l'élément du bâtiment. Un ajout de liaison équipotentielle de foudre directe ou via un éclateur voire l'utilisation de conducteur de descente isolé.

Le principe de calcul de distance séparation est le suivant [29] :

$$s = ((k_i \times k_c) / km) \times L$$

où k_i dépend du niveau de protection ;

k_c dépend du courant de foudre s'écoulant dans les conducteurs de descente ;

km dépend du matériau de séparation; L est la longueur, en mètres, le long des dispositifs de capture ou des conducteurs de descente entre le point où la distance de séparation est prise en considération et le point de la liaison équipotentielle la plus proche.

B- Isolation

L’isolation électrique entre l’IEPF et les parties métalliques de la structure peut être dimensionnée pour éviter les étincelages dangereux par le calcul d’une distance de séparation « s ».

Le respect de cette distance permet d’éviter de connecter des éléments métalliques situés intégralement à l’extérieur ou à l’intérieur de l’installation sans risquer un amorçage avec les conducteurs de capture et de descente [30].

| Éclateur | Modèle | Icône | Tension de tenue assignée | Classification | Courant de choc I _{imp} (10/350 µs) | Terminaux |
|---|--------------|---|---------------------------|----------------|--|---|
|  | G 60/150 C 3 |  | 165 V AC | 1L | 40 kA | torsadés |
|  | G 60/150 A 1 |  | 165 V AC | 1L | 40 kA | cosse de câble M8 |
|  | G 100/150 A |  | 500 V AC | H | 100 kA | cosse de câble M12/ M12 boulon |
|  | G 100/150 Ex |  | 500 V AC | H | 100 kA | cosse de câble M12/ cosse de connexion M12 |
|  | G 100/150 F |  | 120 V DC | 1L | 40 kA | équerre M12/ M12 boulon |

FIGURE II- 8ÉCLATEURS D'ISOLEMENT

II.2.2.2 Parafoudre

Si les conducteurs des réseaux internes ne sont ni blindés ni installés dans des conduits métalliques, ils doivent être mis à la terre par des parafoudres. Pour les lignes électriques et de télécommunication, la liaison équipotentielle de foudre doit être établie aussi près que possible du point de pénétration dans la structure à protéger.

Il convient que les parafoudres supportent la partie du courant de foudre susceptible de les traverser sans dommage.

Il convient qu’un parafoudre soit également capable d’éteindre les courants de suite électriques de l’alimentation s’ils sont connectés aux conducteurs de puissance.

1. Les trois types de parafoudre

a. Parafoudre de type 1 :

Le parafoudre de type 1 est préconisé dans le cas particulier des bâtiments tertiaires et industriels, protégés par un paratonnerre ou par une cage maillée. Il protège l'installation électrique contre les coups de foudre directs. Il permet d'écouler le courant de foudre « en retour » se propageant du conducteur de terre vers les conducteurs du réseau. Les parafoudres de type 1 sont caractérisés par une onde de courant 10/350 μ s.

b. Parafoudre de type 2

Le parafoudre de type 2 est la protection principale de toutes les installations électriques basse tension. Installé dans chaque tableau électrique, il évite la propagation des surtensions dans les installations électriques et protège les récepteurs. Les parafoudres de type 2 sont caractérisés par une onde de courant 8/20 μ s.

Parafoudre de type 3

Ces parafoudres possèdent une faible capacité d'écoulement. Ils sont donc obligatoirement installés en complément des parafoudres de type 2 et à proximité des récepteurs sensibles. Les parafoudres de type 3 sont caractérisés par une combinaison des ondes de tension (1,2/50 μ s) et de courant (8/20 μ s).

2. Caractéristiques communes :

Uc : tension maximale de service permanent

C'est la tension efficace ou continue au-delà de laquelle le parafoudre devient passant. Cette valeur est choisie en fonction de la tension du réseau et du schéma des liaisons à la terre.

Up : niveau de protection (à In)

C'est la tension maximale aux bornes du parafoudre lorsqu'il est passant. Cette tension est atteinte lorsque le courant qui s'écoule dans le parafoudre est égal à In. Le niveau de protection doit être choisi inférieur à la tenue en surtension des charges. Lors de coups de foudre, la tension aux bornes du parafoudre reste généralement inférieure à Up.

In : courant nominal de décharge

C'est la valeur de crête d'un courant de forme d'onde 8/20 μ s que le parafoudre est capable d'écouler 20 fois.

a. Parafoudre de type 1

Le courant I_{imp} : La norme CEI 62305 exige une valeur de courant d'impulsion maximum par pôle I_{imp} de 25 kA. Pour assurer la protection de toute installation, le parafoudre doit être correctement dimensionné pour le courant maximum prévu. Attention de ne pas confondre le courant par pôle (25 kA) avec le courant total (100 kA pour un réseau 3P + N) [31].

I_{imp} : courant impulsionnel de décharge

C'est la valeur de crête d'un courant de forme d'onde 10/350 μ s que le parafoudre est capable d'écouler 5 fois.

I_{fi} : courant d'auto-extinction

Applicable uniquement à la technologie à éclateur.

C'est le courant (50 Hz) que le parafoudre est capable d'interrompre de lui-même après amorçage. Ce courant doit toujours être supérieur au courant de court-circuit présumé au point d'installation.

b. Parafoudre de type 2

Le courant I_{max} : La différence entre I_{max} et I_n indique que le parafoudre fonctionne dans des conditions nominales près de ses limites. Plus I_{max} est élevé, pour une même valeur de I_n , plus les conditions de fonctionnement sont sûres, loin des limites de performance [32].

I_{max} : courant maximal de décharge.

C'est la valeur de crête d'un courant de forme d'onde 8/20 μ s que le parafoudre est capable d'écouler 1 fois.

c. Parafoudre de type 3

U_{oc} : Tension en circuit ouvert appliquée lors des essais de class III (type 3).

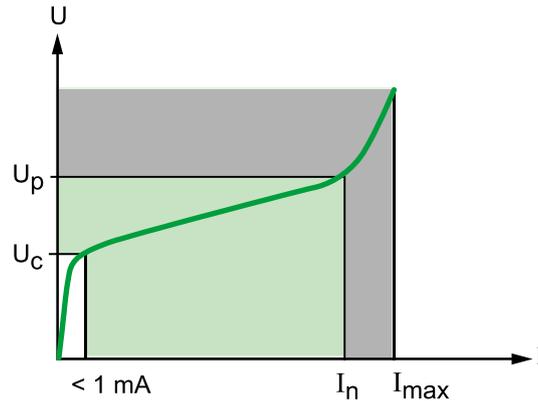


FIGURE II- 9 CARACTERISTIQUE TEMPS/COURANT D'UN PARAFONDRE A VARISTANCE

II.3. Les risques liés à la foudre

Les coups de foudre à la terre peuvent être dangereux pour les structures et les services [33].

II.3.1. Le danger pour la structure peut donner lieu à des dommages affectant la structure et son contenu :

- A des défaillances des réseaux électriques et électroniques associés,
- A des blessures sur des êtres vivants dans la structure ou à proximité.
- Les effets consécutifs à des dommages et à des défaillances peuvent s'étendre à la proximité immédiate de la structure ou peuvent impliquer son environnement [34]

II.3.2 Le danger pour les services peut donner lieu :

- À des dommages affectant le service lui-même.
- À des défaillances des équipements électriques et électroniques associés.
- Des mesures de protection peuvent être prescrites pour réduire les pertes dues à la foudre. Il est recommandé que la nécessité d'une telle protection et son choix soient considérés en termes d'évaluation du risque[35].

II.3.3 Le risque :

Le risque est défini dans cette norme comme la perte annuelle moyenne probable dans une structure et dans un service due aux coups de foudre dépend :

- Du nombre annuel de coups de foudre impliquant la structure et le service ;
- De la probabilité de dommages dus à l'un de ces coups de foudre ;
- Du coût moyen des pertes consécutives [36]

II.3.4 Les coups de foudre impliquant une structure peuvent être divisés en :

- Coups de foudre directs sur la structure,
- Coups de foudre à proximité de la structure et/ou à proximité des services connectés (réseaux d'énergie, réseaux de communication, autres services).

II.3.5 Les coups de foudre impliquant un service peuvent être divisés en :

- Coups de foudre directs sur le service ;
 - Coups de foudre à proximité du service ou coups de foudre directs sur une structure connectée au service [37]
- a. Les coups de foudre directs sur la structure ou les services connectés peuvent causer des dommages physiques et mettre en danger la vie des personnes et des animaux.
- b. Les coups de foudre indirects à proximité d'une structure ou d'un service, comme les coups de foudre directs, peuvent causer des défaillances des réseaux électriques et électroniques en raison des surtensions dues à un couplage résistif ou inductif entre ces matériels et le courant de foudre.
- c. Les défaillances dues aux surtensions de foudre dans les installations des utilisateurs et dans les réseaux de puissance peuvent également générer des surtensions de manœuvre dans leurs circuits.

II. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les dispositifs de protection contre la foudre qui doivent être installés pour éliminer le risque foudre. Le chapitre suivant présente la méthodologie de calcul de risque foudre.

Chapitre III :
Analyse du risque foudre

Chapitre III : Analyse du Risque Foudre

III.1. Introduction

L'Analyse du Risque Foudre (ARF) permet de définir s'il y a nécessité de mettre en place un système de protection contre la foudre et, si oui, quel est le niveau de protection à atteindre. L'évaluation du risque foudre permet de déterminer la probabilité d'occurrence d'un dégât (humain ou matériel) sur une installation. Dans ce chapitre nous présentons la méthodologie de calcul du risque foudre selon la norme NF EN 62305-2. La méthode de base de cette évaluation est de comparer le risque d'une structure par rapport à un risque « tolérable ». Si le niveau de risque sur la structure est inférieur au risque tolérable, la structure est considérée comme « auto-protégée », et si le risque est supérieur, la structure nécessite une protection.

III.2. Méthodologie de travail

L'Analyse du Risque Foudre (**ARF**) est réalisée conformément à la norme NF EN 62305-2 « Protection contre la foudre Partie 2 : Analyse du risque ». La méthode d'évaluation de la norme NF EN 62305-2 prend en compte différents critères influents tels que la densité de foudroiement, les dimensions et la structure du bâtiment, l'activité qu'il abrite et les dommages que peut engendrer la foudre en cas de foudroiement sur ou à proximité des bâtiments concernés. Les coups de foudre directs sur la structure ou les services connectés peuvent causer des dommages physiques et mettre en danger la vie des personnes. Les coups de foudre indirects à proximité d'une structure ou d'un service, comme les coups de foudre directs, peuvent causer des défaillances des réseaux électriques et électroniques en raison des surtensions dues à un couplage résistif ou inductif entre ces matériels et le courant de foudre. La probabilité des dommages dus à la foudre dépend de la structure, du service et des caractéristiques du courant de foudre ainsi que du type et de l'efficacité des mesures de protection appliquées. La norme NF EN 62305-2 fixe la limite supérieure du risque tolérable à 10^{-5} . Le risque de dommages causés par la foudre est calculé et comparé à cette valeur. Lorsque la valeur est supérieure au risque acceptable des solutions de protection et/ou de prévention sont introduites dans les calculs pour réduire le risque à une valeur inférieure ou égale à la valeur limite tolérable. Le résultat obtenu fournit le niveau de protection à atteindre pour chaque bâtiment ou zone étudié. Le niveau de protection peut aller de I pour le plus sévère à IV pour le moins sévère. Cette méthode permet d'optimiser les différentes solutions de protection à mettre en œuvre à l'aide de système paratonnerre et ou parafoudre.

III.3. OBJECTIFS DE L'ARF

L'objectif de cette ARF est d'évaluer les risques liés à la foudre afin de statuer sur la nécessité ou non de mettre en place des dispositifs de prévention et/ou de protection sur les installations (structures et/ou réseaux) du site étudié. Cette ARF ne considère que le risque de perte de vie humaine (risque R1) et les défaillances de réseaux électriques et électroniques (risque RO). Les autres risques définis par la méthode de la norme NF EN 62305-2 n'en font pas partie.

III.4. Limites de l'Analyse du Risque Foudre

L'Analyse du risque Foudre est établie à partir des connaissances existantes au jour de son élaboration. Elle peut être sujette à des modifications en fonction de l'évolution des normes, des techniques et des réglementations.

Les protections existantes ne sont pas prises en compte dans l'Analyse du Risque Foudre. L'étude technique traitera des moyens de protection à mettre en œuvre et de la mise en conformité des protections existantes si nécessaire

III.5. Principaux paramètres influents dans la méthode d'analyse du risque foudre

En fonction de la configuration du site, certains bâtiments peuvent être découpés en différentes zones afin de tenir compte de la diversité des risques et d'optimiser l'analyse de risque et les protections qui en découlent.

Les critères pris en compte dans les calculs de l'analyse du risque seront choisis, entre autres, en fonction des paramètres suivants :

III.5.1. Densité de foudroiement sur le site

La densité de foudroiement N_g prise en compte dans l'étude correspond au nombre d'impacts par an au km^2 sur le département concerné. Cette valeur est issue de la carte du niveau céramique.

III.5.2. Dimensions du bâtiment

Le risque foudre sur un bâtiment dépend de ses dimensions (longueur, largeur et hauteur).

III.5.3. Facteur d'emplacement

L'emplacement relatif de la structure dépend des objets environnants ou de l'exposition de la structure. Différents cas peuvent se présenter :

- Bâtiment entouré par des structures plus hautes.
- Bâtiment entouré par des structures de même hauteur ou plus petites.
- Bâtiment isolé (pas d'autres structures à proximité).
- Bâtiment isolé au sommet d'une colline.

III.5.4. Dangers particuliers

- Pas de risque de panique.
- Faible niveau de panique : structures limitées à deux étages et nombre de personnes inférieur à 100.
- Niveau de panique moyen : structures destinées à des événements culturels ou sportifs avec un nombre de personnes compris entre 100 et 1 000.
- Difficulté d'évacuation : structures avec personnes immobilisées, hôpitaux.
- Niveau de panique élevé : structures destinées à des événements culturels ou sportifs avec un nombre de personnes supérieur à 1 000.
- Danger pour l'environnement : émission de substances biologiques, chimiques et/ou radioactives dans le périmètre immédiat de la structure ou du site.
- Contamination de l'environnement : émission de substances biologiques, chimiques et/ou radioactives dans une zone débordant largement du périmètre immédiat de la structure ou du site au-delà des valeurs autorisées.

III.5.5. Risque d'incendie

Le risque d'incendie est lié à la charge calorifique de la structure et de son contenu Elle s'exprime en Mégajoule par m² (MJ/m²). Les définitions sont données ci-après :

- Pas de risque : structure concernée par aucun des cas ci-dessous.
- Risque faible : charge calorifique inférieure à 400 MJ/m².
- Risque ordinaire : charge calorifique comprise entre 400 MJ/m² et 800 MJ/m².
- Risque élevé : charge calorifique supérieure à 800 MJ/m².
- Risque d'explosion : structure contenant des mélanges explosifs.

III.5.6. Protection anti-incendie

La présence ou non de moyens de lutte contre l'incendie est pris en compte. Les définitions sont données ci-après :

- Pas de protection : aucune des dispositions indiquées ci-dessous

- Protection manuelle : une des dispositions suivantes : extincteurs, installations d'extinction fixes déclenchées manuellement, installations manuelles d'alarme, prises d'eau, compartiments étanches, voies d'évacuation protégées
- Protection automatique : une des dispositions suivantes : installations d'extinction fixes déclenchées automatiquement, installations d'alarme automatiques (seulement si elles sont protégées contre les surtensions ou d'autres dommages et si le temps d'intervention des pompiers est inférieur à 10 minutes).

III.5.7. Type de sol

- béton
- bois
- moquette
- etc...

III.5.8. Facteur d'environnement de la ligne entrante dans le bâtiment

L'emplacement relatif de la ligne dépend des objets environnants. Différents cas peuvent se présenter :

- urbain avec bâtiments dont la hauteur est supérieure à 20 mètres.
- urbain avec bâtiments dont la hauteur est comprise entre 10 et 20 mètres.
- suburbain avec bâtiments dont la hauteur est inférieure à 10 mètres.
- rural pour des zones présentant une faible densité de bâtiment (ex : la campagne).

III.5.9. Résistivité du terrain

Pour les lignes enterrées, lorsque la résistivité du terrain est inconnue, il convient d'estimer la valeur maximale de 500 Ωm .

III.5.10. Longueur de la ligne entrante

Lorsque la longueur de la ligne est inconnue on estime une valeur maximale de celle-ci égale à 1000 mètres.

III.5.11. Type de câblage

- Câble non écranté $Ks3 = 1$: pas de précaution de cheminement afin d'éviter les boucles
- Câble non écranté $Ks3 = 0,2$: précaution de cheminement afin d'éviter des boucles de grande taille.
- Câble non écranté $Ks3 = 0,02$: précaution de cheminement afin d'éviter les boucles.
- Câble écranté avec résistance d'écran $Ks3 = 0,001$: $5 < R_s \leq 20 \Omega/\text{km}$.

-Câble écrané avec résistance d'écran $Ks3 = 0,0002 : 1 \leq R_s < 5 \Omega/\text{km}$.

-Câble écrané avec résistance d'écran $Ks3 = 0,0001 : R_s < 1 \Omega/\text{km}$.

III.5.12. Tension de tenue

-Catégorie 1 : composants électroniques dont la tension de tenue aux chocs est faible ; cette tension de tenue aux chocs est spécifiée par le constructeur.

-Catégorie 2 : matériels d'utilisation destinés à être connectés à l'installation électrique fixe du bâtiment ; leur tenue aux chocs est au moins égale à 2 kV.

-Catégorie 3 : matériels appartenant à l'installation fixe et d'autres matériels pour lesquels un plus haut niveau de fiabilité est demandé ; leur tenue aux chocs est au moins égale à 4kV.

-Catégorie 4 : matériels utilisés à l'origine ou au voisinage de l'origine de l'installation en amont du tableau de distribution ; leur tenue aux chocs est au moins égale à 6 Kv.

III.6. Quelques termes et définitions utilisés

- a) **-Structures à protéger** : structure pour laquelle une protection contre les effets de la foudre est exigée.
- b) **-Structures dangereuses pour l'environnement** : structures qui peuvent être à l'origine d'émissions biologiques, chimiques ou radioactives à la suite d'un foudroiement, par exemple les installations chimiques, nucléaires, etc...
- c) **-Environnement urbain** : zone présentant une forte densité de bâtiments, avec une population importante et des immeubles élevés (ex : centre-ville).
- d) **-Environnement suburbain** : zone présentant une densité moyenne de bâtiment (ex : les zones à la périphérie immédiate des villes).
- e) **-Environnement rural** : zone présentant une faible densité de bâtiments (ex : campagne).
- f) **-Réseau interne** : réseaux électriques et électroniques à l'intérieur d'une structure.
- g) **-Service à protéger** : service pénétrant dans une structure pour lequel la protection contre les effets de la foudre est exigée, conformément à la présente norme.
- h) **-Système de protection contre la foudre (SPF)** : installation complète utilisée pour réduire les dommages physiques dus aux coups de foudre qui frappent une structure. Elle comprend à la fois des installations extérieures et intérieures de protection contre la foudre (IEPF et IIPF).

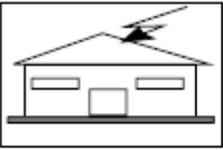
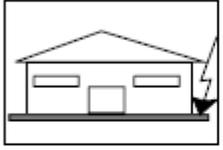
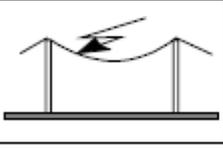
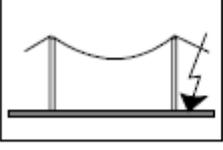
- i) **-Installation Extérieure de Protection Foudre (IEFP)** : partie du système de protection contre la foudre comprenant un dispositif de capture, des conducteurs de descente et une prise de terre.
- j) **-Installation Intérieure de Protection Foudre (IIPF)** : partie du système de protection contre la foudre comprenant des liaisons équipotentielle de foudre et des parafoudres.
- k) **-Parafoudre coordonné** : Parafoudre dont les caractéristiques sont choisies de façon coordonnée (coordination en énergie) et qui est installé de manière appropriée pour réduire les défaillances des réseaux électriques et électroniques.
- l) **-Liaison équipotentielle de foudre** : interconnexion des parties métalliques d'une installation de SPF par des connexions directes ou par des parafoudres réduisant les différences de potentiel engendrés par le courant de foudre.

III.7. Types d'impact foudre

Cette méthode considère que la foudre constitue 4 sources potentielles Tableau III-1:

- S1 : impact sur une structure.
- S2 : impact à proximité d'une structure.
- S3 : impact sur un service.
- S4 : impact à proximité d'un service.

TABLEAU III - 1 SOURCES DE DOMMAGES, TYPES DE DOMMAGES ET TYPES DE PERTES EN FONCTION DU POINT D'IMPACT

| Point d'impact | Source de dommages | Structure | | Service | |
|---|--------------------|------------------|---|------------------|----------------------|
| | | Type de dommages | Type de pertes | Type de dommages | Type de pertes |
|  | S1 | D1 D2 D3 | L1, L4 ²⁾ L1, L2, L3, L4 L1 ¹⁾ , L2, L4 | D2 D3 | L'2, L'4 L'2, L'4 |
|  | S2 | D3 | L1 ¹⁾ , L2, L4 | | |
|  | S3 | D1 D2 D3 | L1, L4 ²⁾ L1, L2, L3, L4 L1 ¹⁾ , L2, L4 | D2 D3 | L'2, L'4 L'2, L'4 |
|  | S4 | D3 | L1 ¹⁾ , L2, L4 | D3 | L'2, L'4 |

1) Seulement dans le cas de structures présentant des risques d'explosion et dans les hôpitaux ou autres structures dans lesquelles des défaillances de réseaux internes peuvent entraîner des dangers mortels.
2) Seulement dans le cas où des pertes d'animaux peuvent survenir.

III.7.1. Composition de composantes de risques par rapport à l'impact de foudre

A. Impacts sur la structure

- RA : composante du risque lié aux blessures sur les êtres vivants
- RB : composante du risque lié aux dommages physiques sur la structure
- RC : composante du risque lié aux défaillances des réseaux internes.

B. Impacts à proximité de la structure

- RM : composante du risque lié aux défaillances des réseaux internes.

C. Impacts sur le service connecté

- RU : composante du risque lié aux blessures sur les êtres vivants
- RV : composante du risque lié aux dommages physiques sur la structure
- RW : composante du risque lié aux défaillances des réseaux internes.

D. Impacts à proximité d'un service

- RZ : composante du risque lié aux défaillances des réseaux internes.

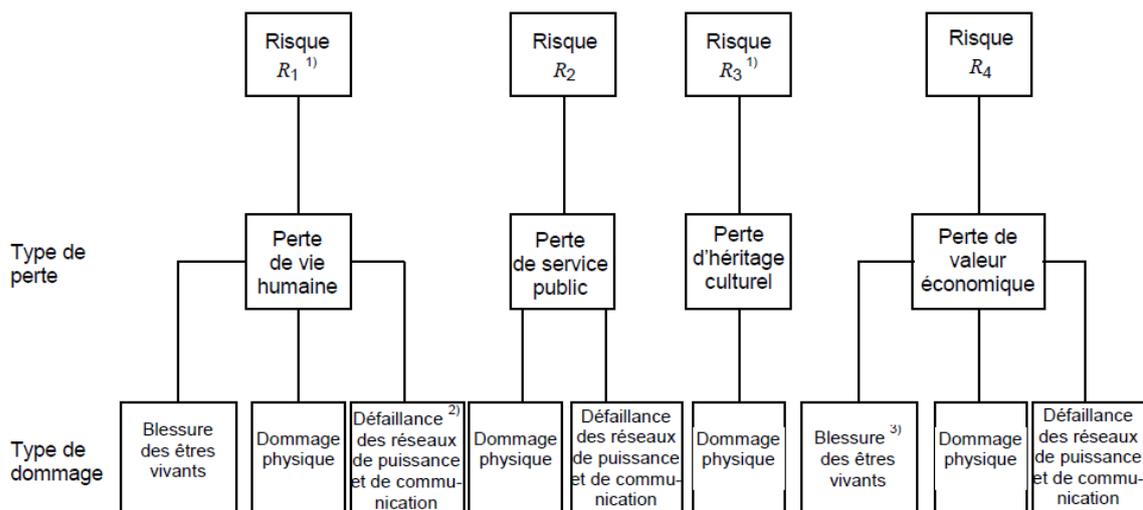
➤ Risques de pertes

- R1 : Risque de perte de vie humaine dans une structure.
- R2 : risque de perte de service public dans une structure.
- R3 : risque de perte d’héritage culturel dans une structure.
- R4 : Risque de perte de valeur économique dans une structure.

III.8. Les dommages

Cette méthode distingue 3 types de conséquences à un impact de foudre Tableau III-1 ;

- ❖ Blessures d’êtres vivants (D1),
- ❖ Dommages physiques (atteinte à l’intégrité des structures) (D2),
- ❖ Défaillances de réseaux électriques et électroniques et des équipements qui leurs sont raccordés (D3).



1) Seulement pour les structures.

2) Seulement pour les hôpitaux et autres structures analogues où les défaillances des réseaux internes mettent en danger immédiat la vie humaine.

3) Seulement dans le cas de pertes d’animaux.

FIGURE III - 1 TYPES DE PERTES ET RISQUES CORRESPONDANTS DUS A DIFFERENTS TYPES DE DOMMAGES

III.8.1. Composition des composantes de risque par rapport à la source de dommages

$$R = RD + RI$$

Où

RD est le risque dû aux coups de foudre frappant la structure (source S1) et qui est la somme:

$$RD = RA + RB + RC$$

Où

RI est la somme dû aux coups de foudre qui ont une influence sur elle mais qui ne frappent pas la structure (sources S2, S3 et S4) et qui peut être la somme :

$$RI = RM + RU + RV + R_w + RZ$$

Pour les composantes des risques et leurs compositions telles qu'indiquées ci-dessus, se reporter au Tableau III.3.

Composition des composantes de risque par rapport au type de dommages

$$R = RS + RF + RO$$

Où

RS est le risque dû aux blessures des êtres vivants (D1) et peut être la somme :

$$RS = RA + RU$$

RF est le risque dû aux dommages physiques (D2) et peut être la somme :

$$RF = RB + RV$$

RO est le risque dû aux défaillances des réseaux internes (D3) et peut être la somme :

$$RO = RM + RC + RW + RZ$$

TABLEAU III - 2 RISQUE DANS UNE STRUCTURE POUR CHAQUE TYPE DE DOMMAGES ET DE PERTES

| Perte / Dommages | L1 Perte de vie humaine | L2 Perte de service public | L3 Perte d'héritage culturel | L4 Perte de valeurs économiques |
|--|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| D1 Blessures des êtres vivants | R_S | - | - | R_S 1) |
| D2 Dommages physiques | R_F | R_F | R_F | R_F |
| D3 Défaillance des réseaux électriques ou électroniques | R_O 2) | R_O | - | R_O |

1) Seulement dans le cas où des pertes d'animaux peuvent survenir.
 2) Seulement dans le cas des structures présentant des risques d'explosion et dans des hôpitaux ou autres structures dans lesquelles des défaillances de réseaux internes peuvent entraîner des dangers mortels.

III.8.2. Synthèse des composantes du risque dans une structure

TABLEAU III - 3 COMPOSITION DES COMPOSANTES DE RISQUES A PRENDRE EN COMPTE POUR CHAQUE TYPE DE PERTE DANS UNE STRUCTURE.

| Source de Dommage / Dommage | S1 Impact sur une structure | S2 Impact a proximité d'une structure | S3 Impact sur un service entrant | S4 Impact proximité | Risques résultant en fonction du type de dommage |
|--|--------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------|--|
| D1 Blessures d'êtres vivants | RA= ND*PA*ra*Lt | - | Ru= (NI+VDa)*Pu*Ru*L t | - | Rs=RA+RU |
| D2 Dommages physiques | RB= ND*PB*rp*hz* rf*Lf | - | Rv= (NL+NDa)*Pv*rp*h z*rf*Lf | - | RF=RB+RV |
| D3 Défaillances des réseaux électrique et électroniques | Rc= ND*PC*Lo | RM= NM*PM*Lo | Rw= (NI+Nda)*Pw*Lo | Rz= (NI-NL) *PZ*Lo | Ro=RC+RM+RW+ RZ |
| Risque résultant en fonction de la source de dommage | Rd= RA+RB+RC | R1=RM+RU+RV+RW+RZ | | | - |

TABLEAU III - 4 COMPOSANTES DE RISQUE A PRENDRE EN COMPTE POUR CHAQUE TYPE DE PERTE DANS UNE STRUCTURE

| Source de dommage | Impact sur la structure S1 | | | Impact a proximité de la structure S2 | Impact sur une ligne entrante S3 | | Impact a proximité d'une ligne entrante S4 | |
|--|----------------------------|----|-----|---------------------------------------|----------------------------------|----|--|-----|
| | RA | RB | RC | RM | RU | RV | RW | RZ |
| Composante du risque | | | | | | | | |
| Risque pour chaque type de perte | | | | | | | | |
| R1 | * | * | *1) | *1) | * | * | *1) | *1) |
| R2 | | * | * | * | | * | * | |
| R3 | | * | | | | * | | |
| R4 | *2) | * | * | * | *2) | * | * | |
| 1. Seulement dans le cas des structures présentant des risques d'explosion et dans des hôpitaux et autres structures dans les quelles des défaillances de réseaux internes peuvent mettre en danger immédiat la vie humaine. 2. Seulement dans le cas des propriétés ou des pertes d'animaux peuvent survenir | | | | | | | | |

III.9 Calcul de risque

Pour déterminer la nécessité de la protection contre la foudre d'une structure donnée on doit calculer le risque totale R et le comparer avec le risque toléré R_T . Une fois le risque totale $R > R_T = 10^{-5}$ on doit le minimiser en réduisant la probabilité des risques selon l'organigramme suivant :

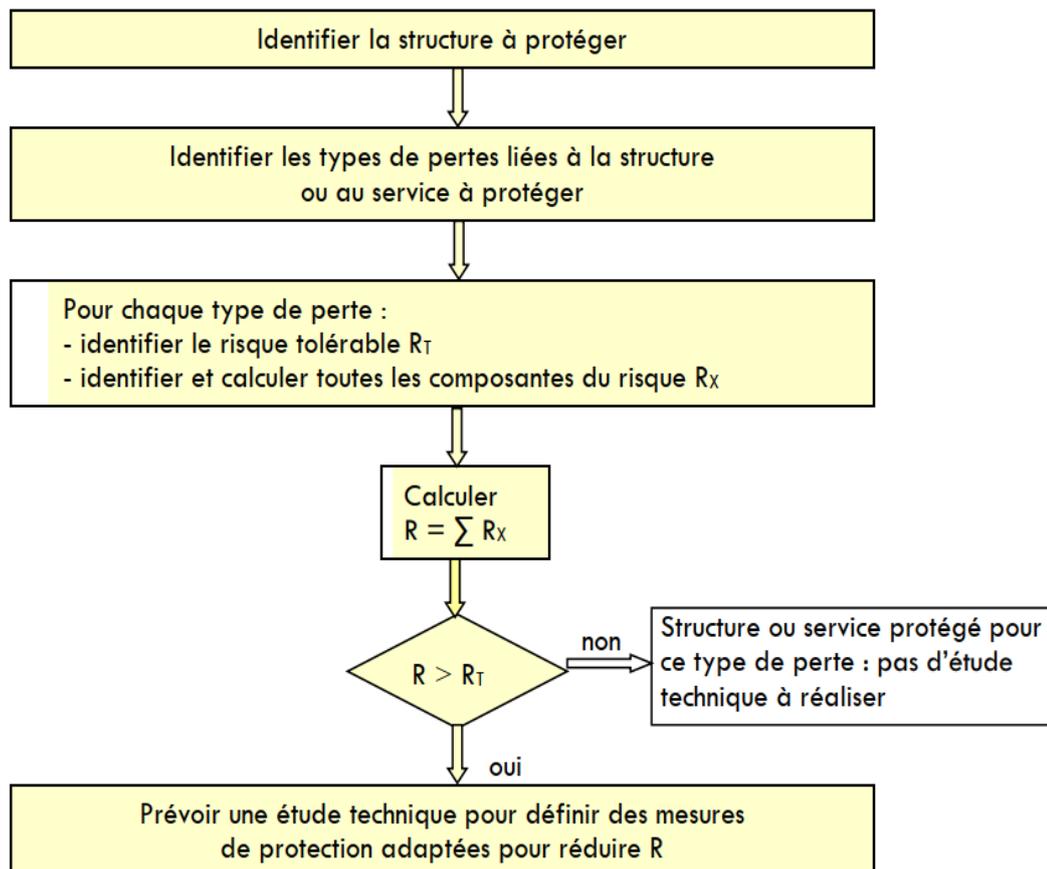


FIGURE III - 2PROCEDURE DE CALCULE DE RISQUE

III.10. Conclusion

La méthode (ARF) inspiré à partir de la norme NF EN 62305-2 « Protection contre la foudre Partie 2 : Analyse du risque » nous permet de calculer deux types de risques, vie humaine et défaillance de réseau électrique et électronique, elle est basée sur l'identification des pertes liées à la structure puis d'identifier les risques et les calculer.

Chapitre IV :

*Évaluation des risques de
foudre sur des structures*

Chapitre IV : Analyse du Risque Foudre dans le cas de Structure

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, des cas relatifs à une maison rurale, un bâtiment de bureaux, un hôpital et un appartement sont traités dans le but de montrer la nécessité de la protection foudre issu de l'analyse de risque foudre.

IV.2. Etude de risque foudre pour une maison rurale

IV.2.1. Données et caractéristiques de la structure

Les données et les caractéristiques suivantes s'appliquent :

- 1) La maison elle-même et son environnement sont présentés au Tableau IV-1;
- 2) Les matériels électriques et électroniques internes et les services entrants auxquels ils sont connectés sont présentés au Tableau IV-2.

TABLEAU IV- 1 DONNÉES ET CARACTÉRISTIQUES DE LA STRUCTURE

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------|
| Dimensions (m) | – | (<i>Lb, Wb, Hb</i>) | 15, 20, 6 |
| Facteur d'emplacement | Isolé | <i>Cd</i> | 1 |
| SPF | Aucun | <i>PB</i> | 1 |
| Ecran à la frontière de la structure | Aucun | <i>Ks1</i> | 1 |
| Ecran dans la structure | Aucun | <i>Ks2</i> | 1 |
| Personnes à l'extérieur de la maison | Aucune | - | - |
| Densité de foudroiement | km ² /an | <i>Ng</i> | 4 |

**TABLEAU IV- 2 DONNÉES ET CARACTÉRISTIQUES DES LIGNES
ENTRANTES ET DES MATÉRIELS INTERNES**

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|---|------------------------|-----------|--------|
| Résistivité du sol ($\Omega.m$) | - | P | 500 |
| Ligne de puissance aérienne BT et son réseau interne | | | |
| Longueur (m) | | L_c | 1 000 |
| Hauteur (m) | Enterrée | H_c | - |
| Transformateur | Non | C_t | 1 |
| Facteur d'emplacement de ligne | Isolé | C_d | 1 |
| Facteur d'environnement de ligne | Rural | C_e | 1 |
| Ecran de ligne | Aucun | P_{LD} | 1 |
| Précaution d'installation des câbles | Aucune | K_{S3} | 1 |
| Tenue des réseaux internes | $U_w = 1,5 \text{ kV}$ | K_{S4} | 1 |
| Parafoudres coordonnés | Non | P_{SPD} | 1 |
| Ligne de communication aérienne et matériel électronique interne | | | |
| Longueur (m) | | L_c | 1 000 |
| Hauteur (m) | | H_c | 6 |
| Facteur d'emplacement de ligne | Isolé | C_d | 1 |
| Facteur d'environnement de ligne | Rural | C_e | 1 |
| Ecran de ligne | Aucun | P_{LD} | 1 |
| Précaution d'installation des câbles | Aucune | K_{S3} | 1 |
| Tenue du matériel | $U_w = 1,5 \text{ kV}$ | K_{S4} | 1 |
| Parafoudres coordonnés | Non | P_{SPD} | 1 |

En tenant compte des éléments suivants

- Le type de surface de sol est différent à l'extérieur et à l'intérieur de la structure ;
- La structure constitue un compartiment unique à l'épreuve du feu ;
- Il n'y a pas d'écrans spatiaux ;

La zone principale suivante peut être définie :

-Z1 (à l'extérieur du bâtiment) ;

-Z2 (à l'intérieur du bâtiment).

Il convient de ne pas définir d'autres zones en tenant compte de ce qui suit :

- les deux réseaux internes (de puissance et de communication) couvrent toute la zone Z2 ;
- les pertes L sont considérées comme constantes dans la zone Z2.

Si personne ne se tient à l'extérieur du bâtiment ; le risque $R1$ pour la zone Z1 peut être négligé et l'évaluation est faite seulement pour la zone Z2.

Les caractéristiques des zones sont données dans le Tableau IV-3 pour la zone Z2.

TABLEAU IV- 3 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE Z2 (À L'INTÉRIEUR DU BÂTIMENT)

| Paramètre | Commentai | Symbole | Valeur |
|--|------------------|--------------------------------------|---------------|
| Type de surface du sol | Bois | r_u | 10^{-5} |
| Risque d'incendie | Faible | r_f | 10^{-3} |
| Danger particulier | Aucun | H_z | 1 |
| Protection contre l'incendie | Aucune | r_p | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | K_{S2} | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Oui | Connectés au réseau BT | - |
| Réseaux de communication internes | Oui | Connectés au réseau de communication | - |
| Pertes par tensions de contact et de pas | Oui | L_t | 10^{-4} |
| Pertes par dommages physiques | Oui | L_f | 10^{-1} |

IV.2.2. Calcul des valeurs correspondantes

Les calculs des surfaces équivalentes d'exposition sont présentés au Tableau IV- 4. Les calculs des nombres prévisibles d'événements dangereux sont donnés au Tableau IV-5.

Tableau IV- 4 Surfaces d'exposition équivalente des structures et des lignes.

| Symbole de Surface | Formule pour la surface équivalente d'exposition | Valeur m ² |
|--------------------|--|-----------------------------|
| Ad | Structure: $Ad = [Lb \times Wb + 6 \times Hb \times (Lb + Wb) + \pi \times (3 Hb)^2]$ | 2,58×10⁺³ |
| Al(P) | Ligne de puissance: $Al(P) = \sqrt{\rho} \times [Lc - 3Hb]$ | 2,2×10⁺⁴ |
| Ai(P) | A proximité de la ligne de puissance: $Al(P) = 25 \sqrt{\rho} \times Lc$ | 5,59×10⁺⁵ |
| Al(T) | Ligne de communication : $Al(T) = 6 Hc \times [Lc - 3 Hb]$ | 3,54×10⁺⁴ |
| Ai(T) | A proximité de la ligne de communication : $Ai(T) = 1\ 000 \times Lc$ | 1×10⁺⁶ |

Tableau IV- 5 Nombre annuel prévisible d'événements dangereux

| Symbole du nombre | Formule pour le nombre d'impacts | Valeur (1/an) |
|-------------------|---|-----------------------------|
| ND | Sur la structure : $ND = Ng \times Ad \times Cd \times 10^{-6}$ | 1,03×10⁻² |
| NL(P) | Ligne de puissance : $NL(P) = Ng \times Al(P) \times Cd(P) \times Ct(P) \times 10^{-6}$ | 8,78×10⁻² |
| Ni(P) | A proximité de la ligne de puissance: $Ni(P) = Ng \times Ai(P) \times Ct(P) \times Ce(P) \times 10^{-6}$ | 2,24 |
| NL(T) | Ligne de communication: $NL(T) = Ng \times Al(T) \times Cd(T) \times 10^{-6}$ | 1,41×10⁻¹ |
| Ni(T) | A proximité de la ligne de communication: $Ni(T) = Ng \times Ai(T) \times Ce(T) \times 10^{-6}$ | 4 |

IV.2.3. Calcul du risque pour décider le besoin de protection

Dans le cas étudié, il convient d'évaluer la composante $R1$.

$R1 = RB + RU$ (Ligne de puissance) + RV (Ligne de puissance) + RU (Ligne de communication) + RV (Ligne de communication)

Les composantes impliquées et l'évaluation du risque total sont données au Tableau IV-6. En utilisant de manière adéquate ces valeurs dans les formules du Tableau IV- 6, on obtient de nouvelles valeurs de composantes de risque comme indiqué au Tableau.

**TABLEAU IV- 6 COMPOSANTES DU RISQUE IMPLIQUÉES ET LEUR CALCUL
(VALEURS X10⁻⁵)**

| Symbole de la Composante | Formule pour la composante avec impacts sur | Valeur x (10 ⁻⁵) |
|-------------------------------|--|-------------------------------|
| RB | la structure donnant lieu à des dommages physiques: $RB = ND \times PB \times hz \times rp \times rf \times Lf$ | 1,03×10⁻¹ |
| RU (Ligne de puissance) | la ligne de puissance donnant lieu à un choc: $RU = (NL + NDa) \times P_U \times ru \times Lt$ | 8,78E×10⁻⁰⁶ |
| RV (Ligne de puissance) | la ligne de puissance donnant lieu à des dommages physiques: $RV = (NL + NDa) \times P_V \times hz \times rp \times rf \times Lf$ | 8,78×10⁻⁰¹ |
| RU (Ligne de communication) | la ligne téléphonique donnant lieu à un choc: $RU = (NL + NDa) \times P_U \times ru \times Lt$ | 1,41 ×10⁻¹ |
| RV (Ligne de communication) | la ligne téléphonique donnant lieu à des dommages physiques: $RV = (NL + NDa) \times P_V \times hz \times rp \times rf \times Lf$ | 1,41 |
| $R1$ total | $R1 = RA + RB + RU$ (Ligne de puissance) + RV (Ligne de puissance) + RU (Ligne de communication) + RV (Ligne de communication) | 2.4 |



FIGURE IV- 1 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA MAISON RURALE

IV.2.4. Réduction du risque

Pour la structure, le risque $R1 = 2,4 \cdot 10^{-5}$ est supérieur à la valeur tolérable $RT = 10^{-5}$; nécessitant une protection contre la foudre. Nous devons réduire le risque

Pour se faire on doit tenir en compte des mesures de protection influencent les composantes de risque RV et RB (IV-1) :

- la composante RVT avec un impact sur la ligne de communication pour 59%.
- la composante RVP avec un impact sur la ligne de communication pour 37%
- la composante RB avec un impact sur la structure 4%.

Pour réduire R1 à une valeur tolérable on a adopté deux cas :

1^{ère} cas : le système de protection contre la foudre de type IV il faut alors réduire PB de 1 à 0,2 et les valeurs de PU et PV de 1 à 0,2.

2^{ème} cas : le parafoudre de niveau de protection IV ou point d'entrée dans la maison de la ligne (de puissance et de la ligne téléphonique) donc en doit réduire PU et PV de 1 à 0,03. Finalement et après réduction des risques on obtient des valeurs de composante de risque comme indique le tableau IV-7.

Tableau IV- 7 Valeurs des composantes de risque relatives au risque R1 (valeurs $\times 10^{-5}$) pour les cas adaptés

| Composantes de risqué | Valeurs x10 ⁻⁵ | |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | Cas a) | Cas b) |
| RB | 2,06×10 ⁻⁰⁷ | 1×10 ⁻⁰⁶ |
| RU(Ligne de puissance) | 0 | 0 |
| RV(Ligne de puissance) | 2,60×10 ⁻⁰⁷ | 2,63×10 ⁻⁰⁷ |
| RU(Ligne de communication) | 0 | 0 |
| RV(Ligne de communication) | 4,23×10 ⁻⁰⁷ | 2,24×10 ⁻⁰⁷ |
| TOTAL | 8,89×10⁻⁰⁷ | 1,7187×10⁻⁰⁶ |



FIGURE IV- 2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LE 1^{ER} CAS.

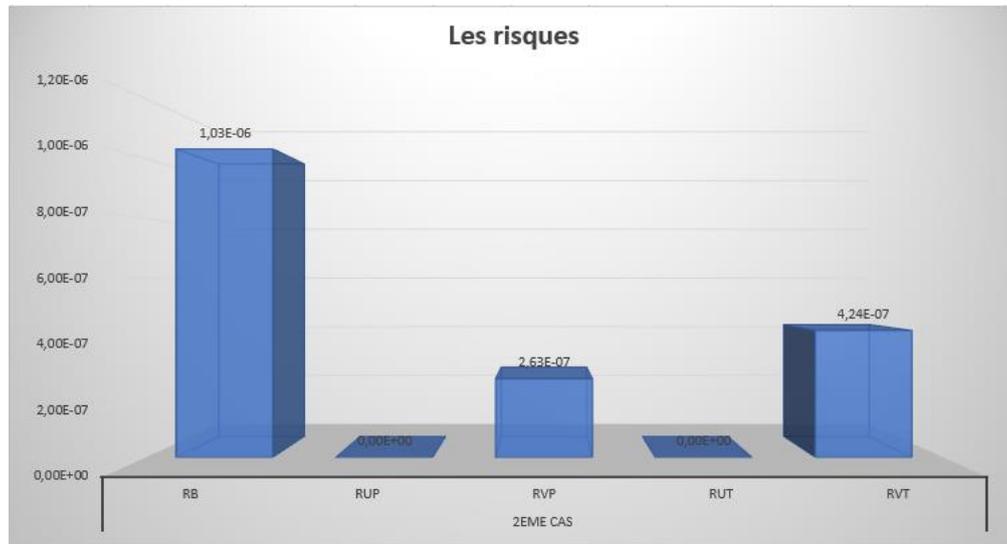


FIGURE IV- 3 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LE 2^{EME} CAS.

IV.3. Etude de risque foudre pour un bâtiment de bureaux

La deuxième étude de cas concerne un bâtiment de bureaux pour lequel le besoin de protection doit être évalué.

A cet effet, le risque R1 de perte de vie humaine doit être déterminé et comparé à la valeur tolérable $RT = 10^{-5}$. Les mesures de protection pour réduire le risque sont choisies. Selon la décision de l'utilisateur.

IV.3.1 Données et caractéristiques concernées

Les données et les caractéristiques suivantes s'appliquent :

Le bâtiment lui-même et son environnement, présentés au Tableau IV-8;

1. Les réseaux électriques internes et la ligne de puissance entrante concernée, présentés au Tableau IV-9;
2. Les réseaux électroniques internes et la ligne de communication entrante concernée, présentés au Tableau IV-10.

TABLEAU IV- 8 CARACTÉRISTIQUES DE LA STRUCTURE

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|
| Dimensions (m) | – | $Lb .Wb .Hb$ | 40 × 20 × 25 |
| Facteur d'emplacement | Isolé | Cd | 1 |
| SPF | Aucun | PB | 1 |
| Ecran à la frontière de la structure | Aucun | $KS1$ | 1 |
| Ecran dans la structure | Aucun | $KS2$ | 1 |
| Densité de foudrolement | 1/km ² /an | Ng | 4 |
| Personnes présentes dans la structure | A l'intérieur et à l'extérieur | Nt | 200 |

Tableau IV- 9 Caractéristiques du réseau de puissance interne et de la ligne de puissance entrante concernée

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|---|-----------------------|----------------|--------|
| Résistivité du sol (Ωm) | | P | 250 |
| Longueur (m) | – | Lc | 1 000 |
| Hauteur (m) | – | – | – |
| Facteur d'emplacement de ligne | Isolé | Cd | 1 |
| Facteur d'environnement de ligne | Rural | Ce | 1 |
| Ecran de ligne | Aucun | PLD | 1 |
| | | PLI | 1 |
| Précaution d'installation des câbles | Aucune | $KS3$ | 1 |
| Tension de tenue des matériels Uw | $Uw = 1,5 \text{ kV}$ | $KS4$ | 1 |
| Système de parafoudre | Aucun | $PSPD$ | 1 |
| Extrémité «a» de la ligne, dimensions de la structure (m) | Aucune | $(La .Wa .Ha)$ | – |

Tableau IV- 10 Caractéristiques du réseau de communication interne et de la ligne entrante concernée

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|---|-------------------------------|--|--------|
| Longueur (m) | | <i>L_c</i> | 200 |
| Hauteur (m) | Aérien | <i>H_c</i> | 6 |
| Transformateur HT/BT | Non | <i>C_t</i> | 1 |
| Facteur d'emplacement de ligne | Isolé | <i>C_d</i> | 1 |
| Facteur d'environnement de ligne | Rural | <i>C_e</i> | 1 |
| Ecran de ligne | Aucun | <i>PLD</i> | 1 |
| | | <i>PLI</i> | 0,4 |
| Précaution d'installation des câbles | Non | <i>KS3</i> | 1 |
| Tension de tenue des matériels <i>U_w</i> | <i>U_w = 2,5 Kv</i> | <i>KS4</i> | 0,6 |
| Parafoudres coordonnés | Aucun | <i>PSPD</i> | 1 |
| Extrémité «a», ligne, structure, dimensions (m) | Aucune | <i>L_a .W_a .H_a</i> | – |

IV.3.2 Définition des zones dans le bâtiment de bureaux et leurs caractéristiques

En tenant compte des éléments suivants :

- le type de sol est différent dans la zone d'entrée, dans le jardin et à l'intérieur de la structure ;
- la structure et les archives sont des compartiments à l'épreuve du feu ;
- il n'y a pas d'écrans spatiaux ;
- les pertes *L* dans le centre informatique sont estimées inférieures à celles dans les bureaux, les zones principales suivantes peuvent définies :
 - Z1 zone d'entrée dans le bâtiment ;
 - Z2 jardin ;
 - Z3 archives – il s'agit d'un compartiment isolé à l'épreuve du feu ;
 - Z4 bureaux ;
 - Z5 centre informatique.

Les caractéristiques des zones sont données au Tableau IV.11 pour la zone Z1, au Tableau IV.12 pour la zone Z2, au Tableau IV.13 pour la zone Z3, au Tableau 14 pour la zone Z4 et au Tableau 15 pour la zone Z5.

Selon l'estimation des mesures de protection par le concepteur, les valeurs moyennes typiques de pertes relatives annuelles est pour le risque $R1$.

- $Lt = 10^{-2}$ à l'extérieur de la structure,
- $Lt = 10^{-4}$ à l'intérieur de la structure,
- $Lf = 10^{-2}$,

Sont réduites pour chaque zone en tenant compte du nombre de personnes potentiellement en danger dans la zone à l'extérieur par rapport au nombre total de personnes à l'intérieur de la structure.

TABLEAU IV- 11 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE Z1 (ZONE D'ENTRÉE DANS LE BÂTIMENT).

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--|-------------|----------------|-------------------|
| Type de sol | Marbre | Ra | 10^{-3} |
| Protection contre les chocs | Aucune | PA | 1 |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | Lt | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 4 |

TABLEAU IV- 12 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE Z2 (JARDIN).

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--|-------------|----------------|---------------|
| Type de sol | Herbe | Ra | 10^{-2} |
| Protection contre les chocs | Clôture | PA | 0 |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | Lf | 10^{-4} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 2 |

TABLEAU IV- 13 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE Z3 (ARCHIVES)

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|------------------------------|----------------|----------------|---------------|
| Type de sol | Linoléum | Ru | 10^{-5} |
| Risque d'incendie | Elevé | Rf | 10^{-1} |
| Danger particulier | Faible panique | HZ | 2 |
| Protection contre l'incendie | Aucune | Rp | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | $KS2$ | 1 |

| | | | |
|--|-----|--|-----------|
| Réseaux de puissance internes | Oui | Connectés à une ligne de puissance BT | – |
| Réseaux téléphoniques internes | Oui | Connectés à une ligne de communication | – |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | <i>Lt</i> | 10^{-5} |
| Perte par dommages physiques | Oui | <i>Lf</i> | 10^{-3} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 20 |

TABLEAU IV- 14 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE Z4 (BUREAUX)

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--|----------------|--|--------------------|
| Type de sol | Linoléum | <i>Ru</i> | 10^{-5} |
| Risque d'incendie | Faibles | <i>Rf</i> | 10^{-3} |
| Danger particulier | Faible panique | <i>H_z</i> | 2 |
| Protection contre l' incendie | Aucun | <i>R_p</i> | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | <i>KS2</i> | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Oui | Connectés à une ligne de puissance BT | – |
| Réseaux téléphoniques internes | Oui | Connectés à une ligne de communication | – |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | <i>Lt</i> | 8×10^{-5} |
| Perte par dommages physiques | Oui | <i>Lf</i> | 8×10^{-3} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | – | – | 160 |

Tableau IV- 15 Caractéristiques de la zone Z5 (centre informatique)

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--------------------|----------------|----------------------|-----------|
| Type de sol | Linoléum | <i>Ru</i> | 10^{-5} |
| Risque d'incendie | Faibles | <i>Rf</i> | 10^{-3} |
| Danger particulier | Faible panique | <i>H_z</i> | 2 |

| | | | |
|--|--------|--|--------------------|
| Protection contre l'incendie | Aucune | R_p | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | KS_2 | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Oui | Connectés à une ligne de puissance | – |
| Réseaux téléphoniques internes | Oui | Connectés à une ligne de communication | – |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | L_t | 7×10^{-6} |
| Perte par dommages physiques | Oui | L_f | 7×10^{-4} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | – | – | 14 |

IV.3.4. Calcul des valeurs correspondantes

Les calculs des surfaces équivalentes d'exposition sont présentés au Tableau IV-16. Les calculs des nombres prévisibles d'événements dangereux sont donnés au Tableau IV-17 et l'évaluation des pertes annuelles attendues est donnée au Tableau IV- 18.

TABLEAU IV- 16 SURFACES ÉQUIVALENTES D'EXPOSITION DE LA

| Symbole | Valeur (m ²) |
|-------------------|--------------------------|
| A_d | 2,75E+04 |
| A_l (Puissance) | 4,5E+03 |
| A_i (Puissance) | 2,00E+05 |
| A_l | 1,46E+04 |
| A_i | 3,95E+05 |

TABLEAU IV- 17 NOMBRE ANNUEL PRÉVISIBLE D'ÉVÉNEMENTS

| Symbole | Valeur (1/an) |
|--------------------|---------------|
| ND | 1,10E-01 |
| NL (Puissance) | 1,80E-2 |
| Ni (Puissance) | 8,00E-01 |
| NL | 5,85E-02 |
| Ni (Communication) | 1,58E+00 |

Tableau IV- 18 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques
SELON LES ZONES (VALEURS $\times 10^{-5}$)

| Symbole | Z1 zone d'entrée | Z2 Jardin | Z3 Archives | Z4 Bureaux | Z5 Centre Informatique | Structure |
|------------------------------------|------------------------|--------------|----------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| <i>RA=ND.PA.ra.Lf</i> | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 |
| <i>RB= ND.PB.hz.rp.rf.Lf</i> | 0 | 0 | 2,20 | 0,176 | 0,0154 | 2,39 |
| <i>RU</i> (Ligne de puissance) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>RV</i> (Ligne de puissance) | 0 | 0 | 0,360 | 0,00288 | $2,52 \times 10^{-3}$ | 0,391 |
| <i>RU</i> (Ligne de communication) | 0 | 0 | 0 | $4,68 \times 10^{-6}$ | 0 | $4,68 \times 10^{-6}$ |
| <i>RV</i> (Ligne de communication) | 0 | 0 | 1,17 | 0,00936 | $8,19 \times 10^{-3}$ | 1,27 |
| TOTAL | 0,002 | 0 | 3,72 | 0,298 | 0,0261 | 4,05 |

IV.3.4. Calcul du risque pour décider du besoin de protection

Les composantes de risque impliquées pour chaque zone et l'évaluation du risque total sont données au Tableau IV-18

**Tableau IV- 19 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques
SELON LES ZONES (VALEURS $\times 10^{-5}$)**

| Symbole | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Structure |
|--------------|--------------|----------|-------------|--------------|---------------|-------------|
| RD | 0,002 | 0 | 2,2 | 0,176 | 0,0154 | 2,393 |
| RI | 0 | 0 | 1,53 | 0,122 | 0,0154 | 1,667 |
| Total | 0,002 | 0 | 3,73 | 0,298 | 0,0261 | 4,05 |
| Rs | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,002 |
| RF | 0 | 0 | 3,73 | 0,298 | 0,0261 | 4,05 |
| Ro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 0,002 | 0 | 3,73 | 0,298 | 0,0261 | 4,05 |

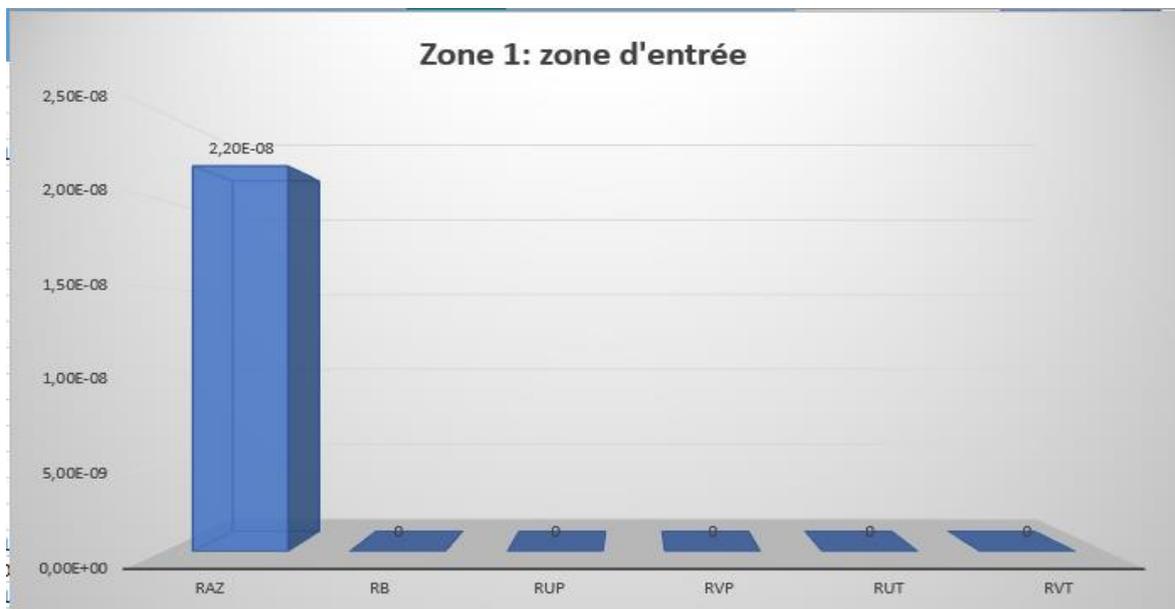


FIGURE IV- 4 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 1



FIGURE IV- 5 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 2

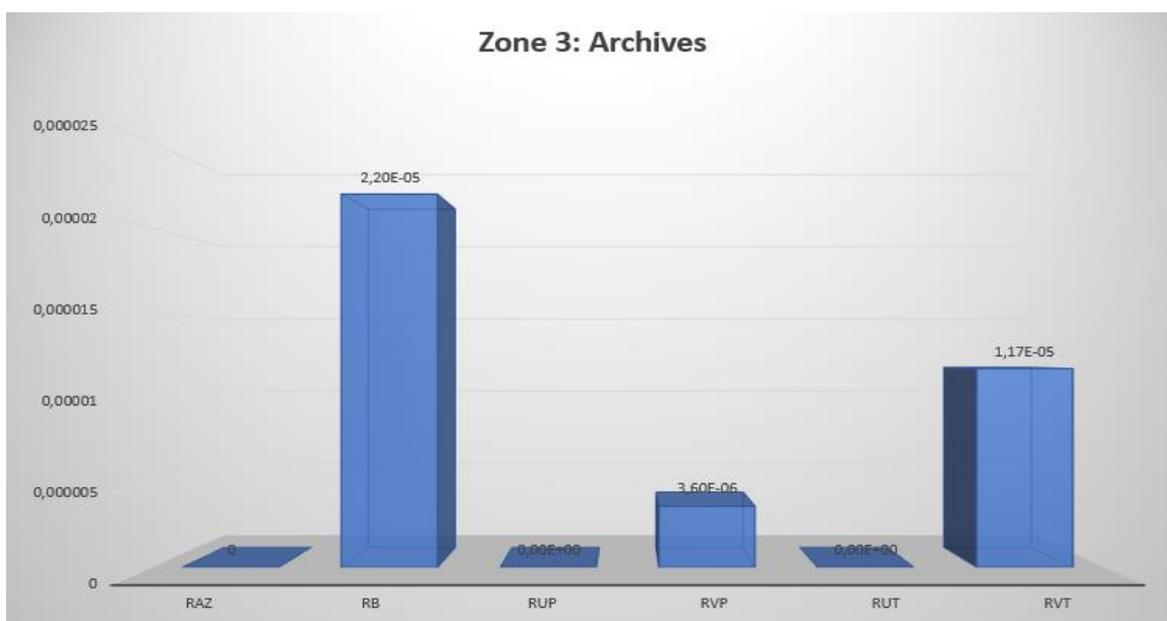


FIGURE IV- 6 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 3

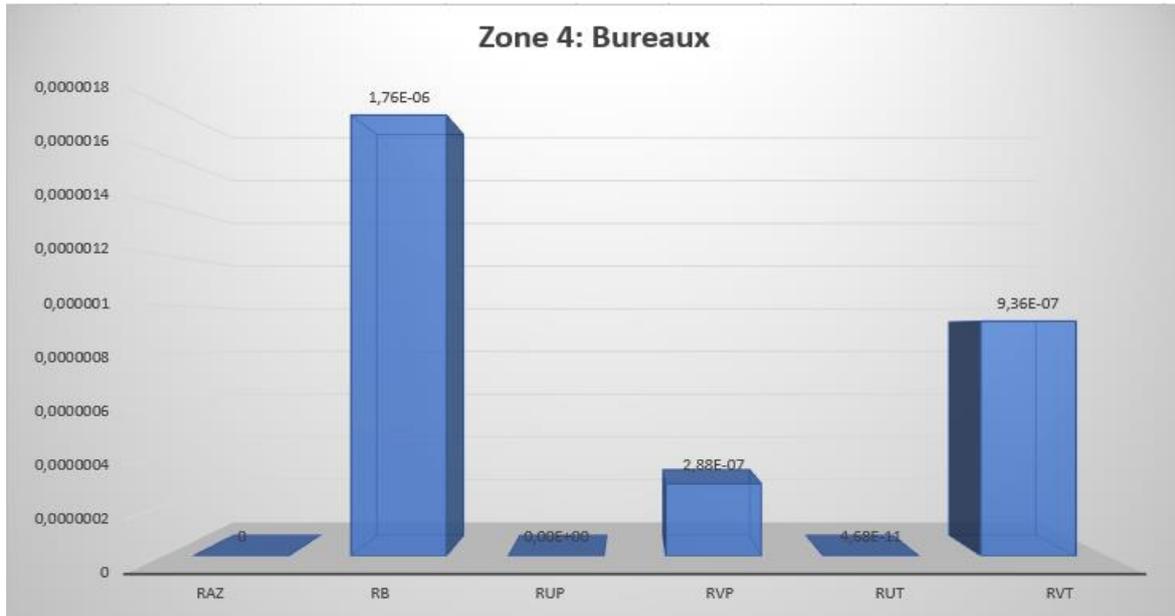


FIGURE IV- 7 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 4

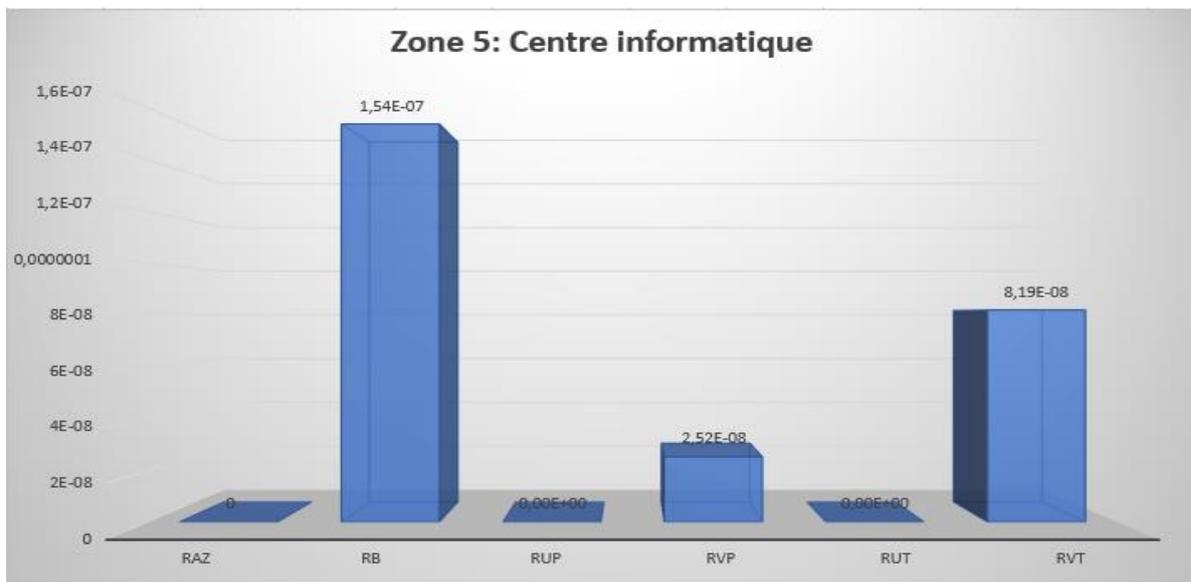


FIGURE IV- 8 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 5

IV.3.5. Réduction du risque toléré

D’après les calculs de tableau IV-18 le risque pour une structure et principalement de ou dommage physique dans la zone 3 frappent les lignes connectée.

Le risque des incendies dans la zone 3 est 92% de risque totale

Les principales contributions à la valeur de risque R1 dans la zone3 sont donnée par :

-Composante RB pour 54%

-La composante RV pour la ligne de puissance est 9%

-La composante RV pour la ligne de communication est 29%

Pour réduire le risque a la valeur tolérable on a adopté deux solutions

a- Le 1^{er} cas : on protège avec un système de protection contre la foudre de niveau IV pour réduire la composante RB, alors on procède comme suit :

$$PB=0,2 ; \quad PV=PU=0,003$$

b- Le 2^{eme} cas : on installe dans la zone 3 un système automatique d’extinction pour réduire les composante RB et RV dans cette zone

$$rp=0,2, \quad PU=PV=0,03$$

TABLEAU IV- 20 VALEURS DES COMPOSANTES DE RISQUE RELATIVES AU RISQUE R1(VALEURS X10⁻⁵) POUR LES CAS ADAPTÉS.

| Zones | | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Cas | | | | | | | |
| 1 ^{er} cas | RA | 2,20.10 ⁻⁰³ | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | RB | 0 | 0 | 4,39.10 ⁻¹ | 2,81.10 ⁻⁰⁴ | 9,23.10 ⁻⁵ | 4,39.10 ⁻⁰¹ |
| | RV_P | 0 | 0 | 1,08.10 ⁻⁵ | 8,64.10 ⁻⁷ | 7,56.10 ⁻⁵ | 8,73.10 ⁻⁰⁵ |
| | RU_P | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | RV_T | 0 | 0 | 3,51.10 ⁻³ | 3,51.10 ⁻⁰² | 2,46.10 ⁻² | 6,32.10 ⁻⁰² |
| | RU_T | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | | 2,20.10⁻³ | 0 | 4,43.10⁻¹ | 3,54.10⁻² | 2,63.10⁻² | 0,5 |

| | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 2 ^{-ème} cas | R_A | 2,20.10 ⁻³ | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,20.10 ⁻³ |
| | R_B | 0 | 0 | 4,39 .10 ⁻¹ | 5,27. 10 ⁻² | 4,61.10 ⁻⁵ | 4,92.10 ⁻¹ |
| | R_{V_P} | 0 | 0 | 1,08 .10 ⁻⁵ | 8,64. 10 ⁻² | 7,56.10 ⁻⁶ | 8,64.10 ⁻² |
| | R_{U_P} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | R_{V_T} | 0 | 0 | 3,51 .10 ⁻³ | 2,81. 10 ⁻² | 1,46 .10 ⁻² | 4,62.10 ⁻² |
| | R_{U_T} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | | 2,20.10 ⁻³ | 0 | 4,43.10 ⁻⁰¹ | 1,7.10 ⁻¹ | 1,47.10 ⁻² | 0,63 |

Représentation graphique du 1^{er} cas après réduction du risque :

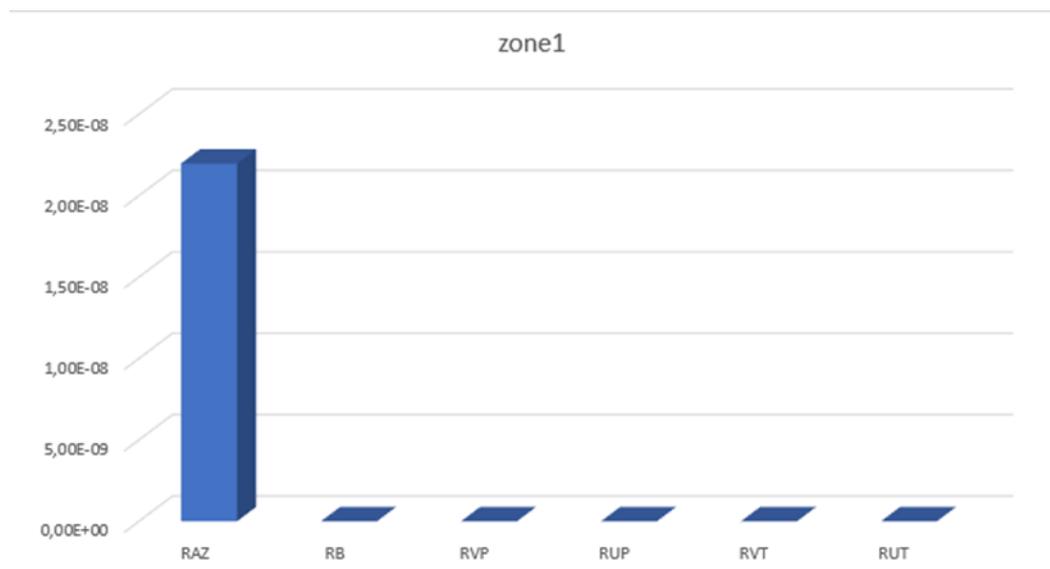


FIGURE IV- 9 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES DE LA ZONE 1

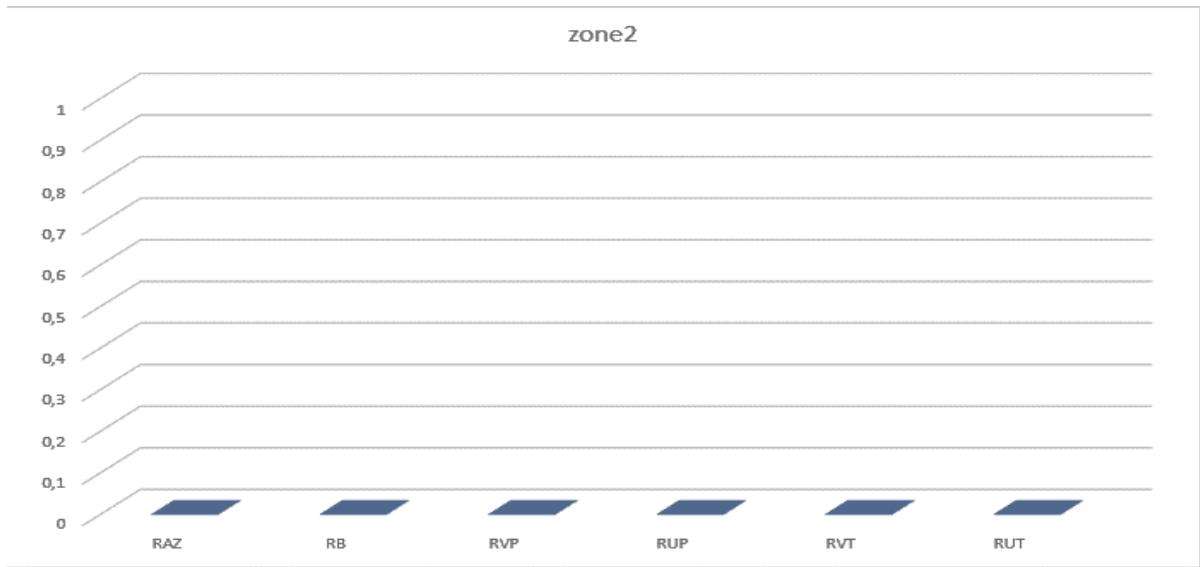


FIGURE IV- 10 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 2

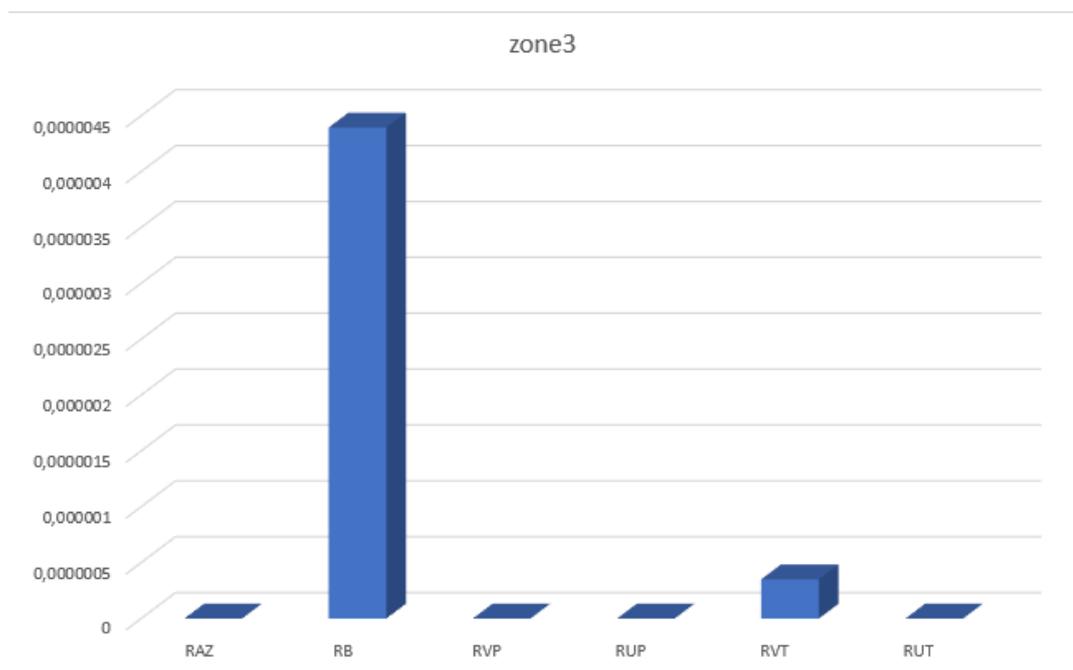


FIGURE IV- 11 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 3

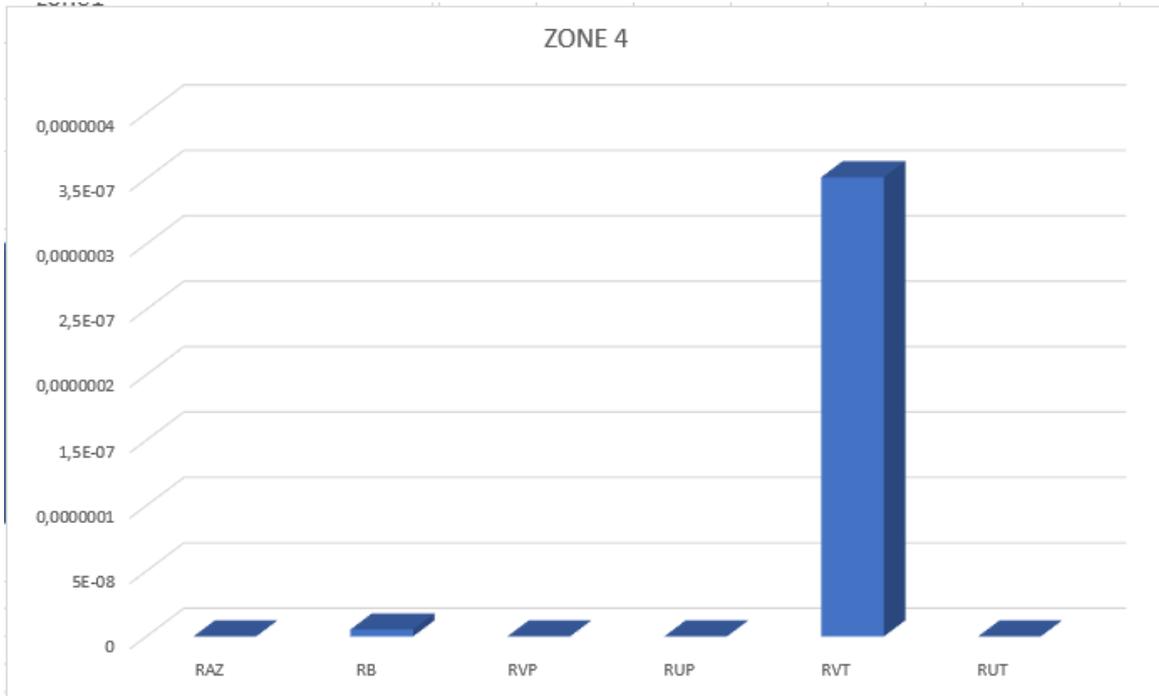


FIGURE IV- 12 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 4

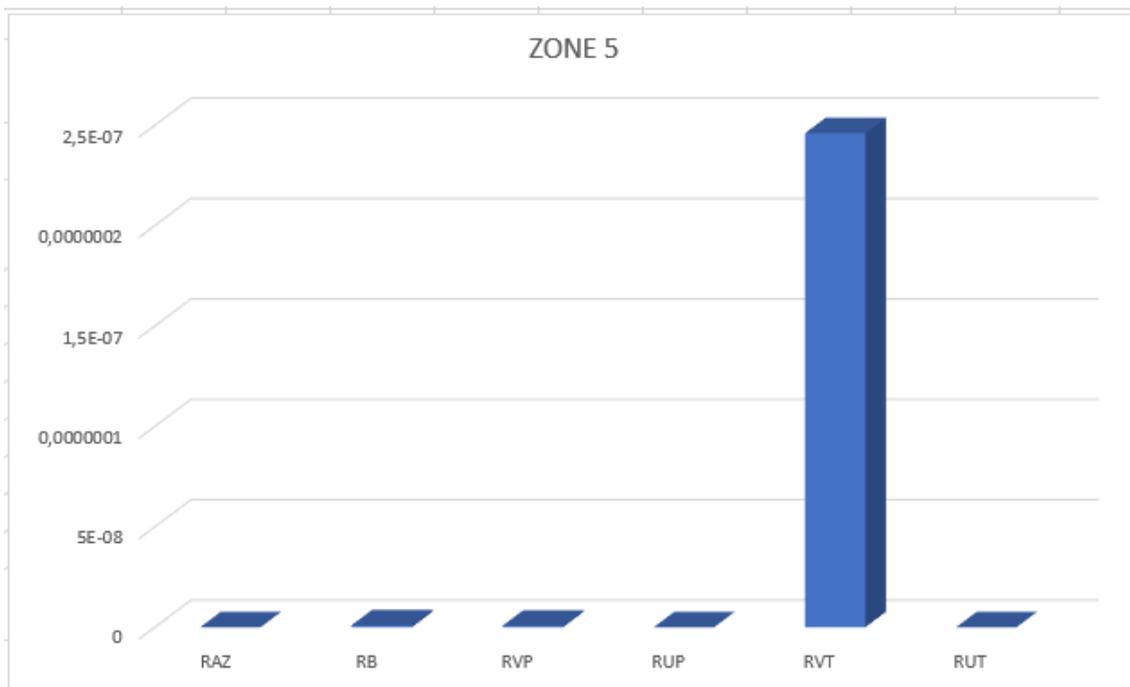


FIGURE IV- 13 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 5

Représentation graphique du 2^{ème} cas après réduction du risque

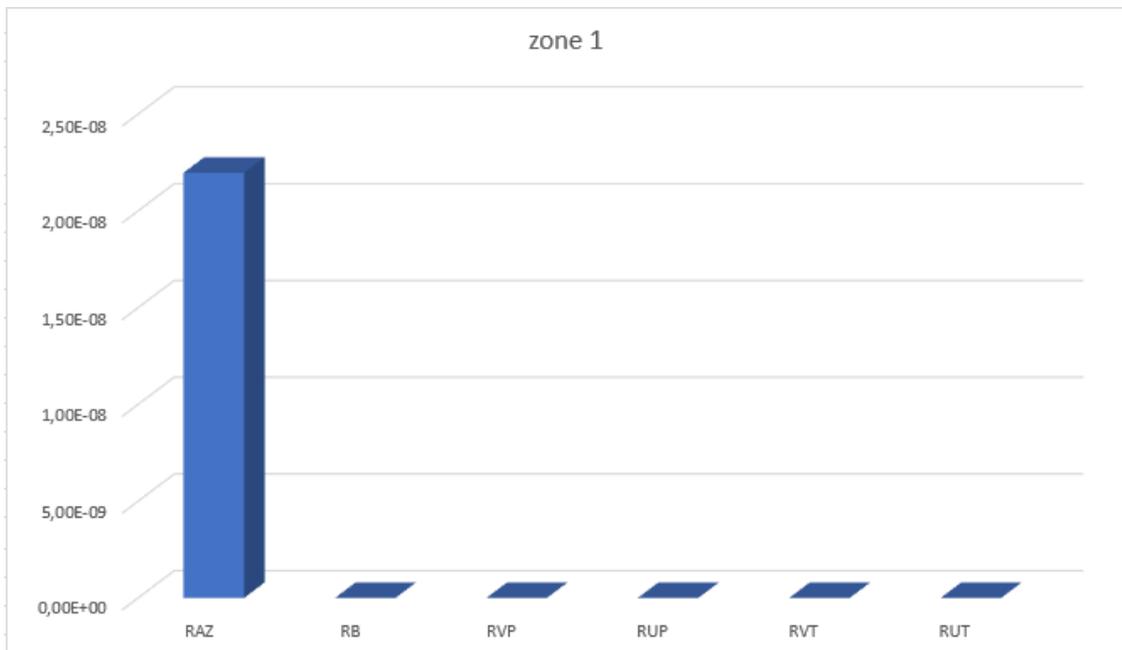


FIGURE IV- 14 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 1

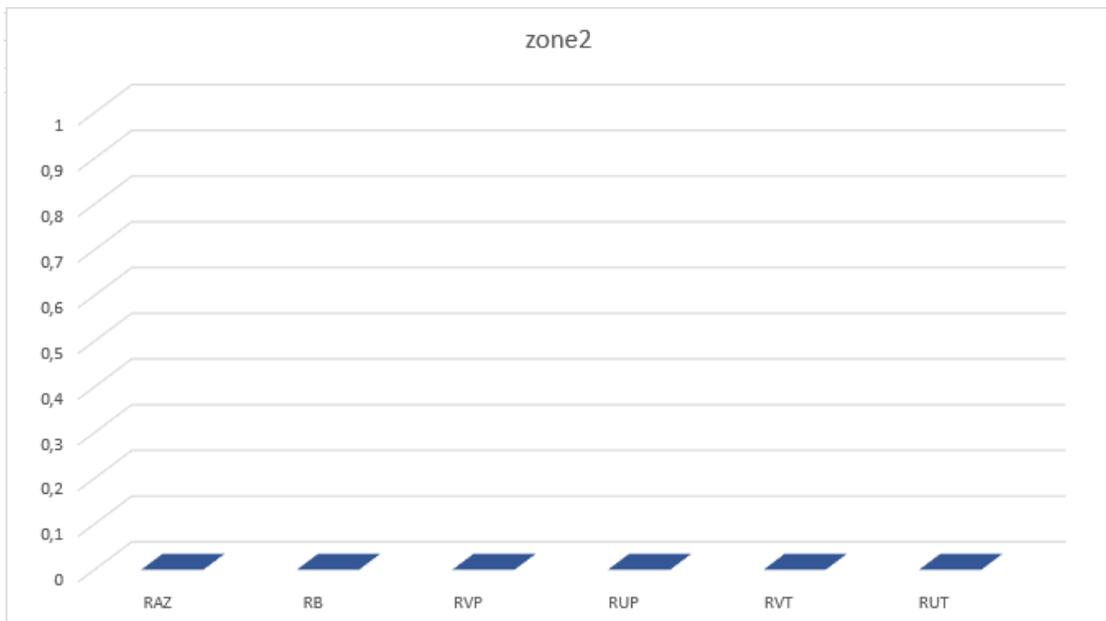


FIGURE IV- 15 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 2

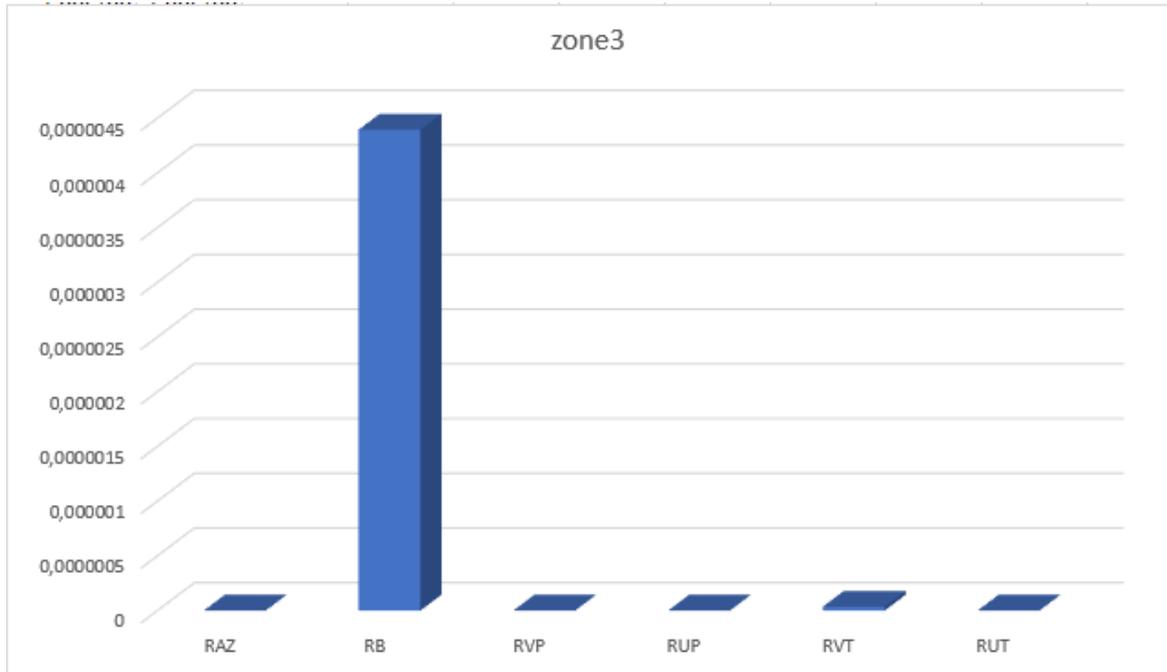


FIGURE IV- 16 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 3

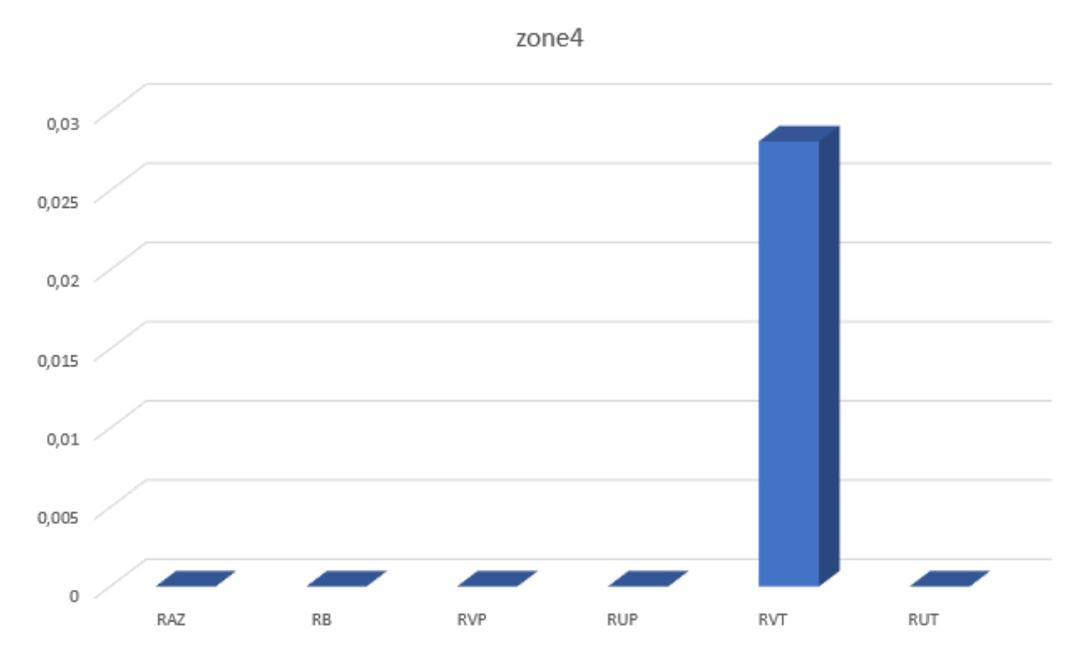


FIGURE IV- 17 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 4

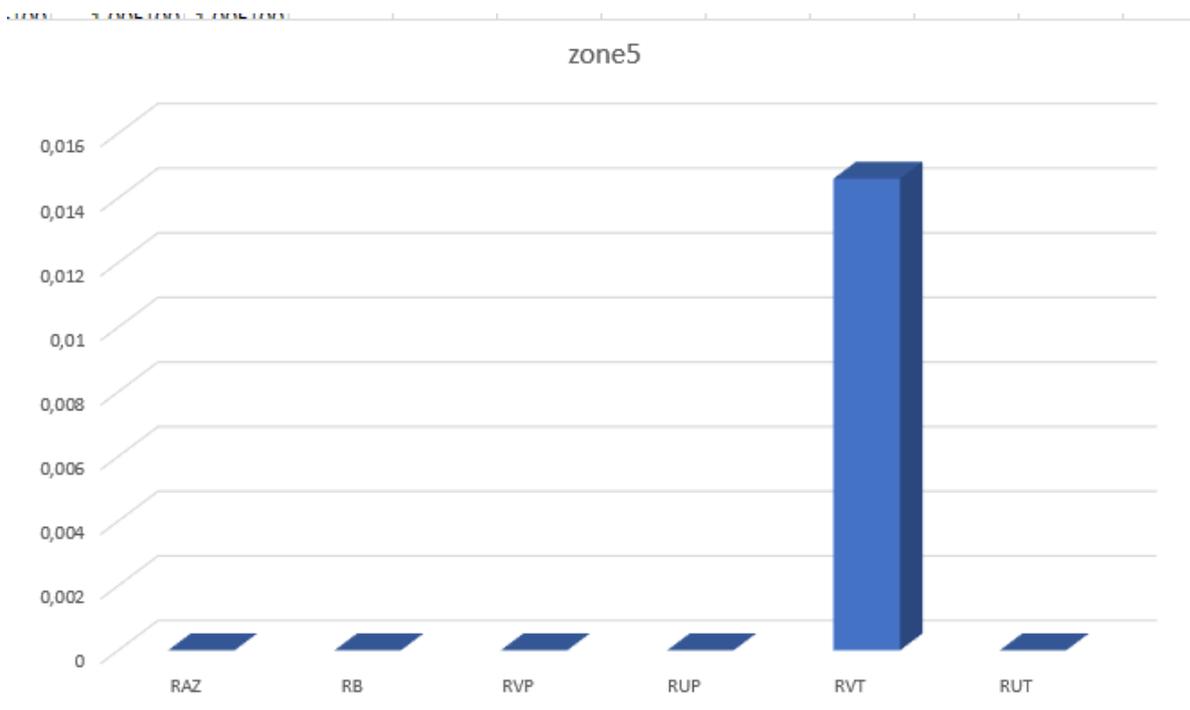


FIGURE IV- 18 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RISQUES POUR LA ZONE 5

IV.4. Etude de risque de foudre pour un Hôpital

IV.4.1. Données et caractéristiques de la structure

La structure a considéré est un hôpital. Elle comprend les installations hospitalières courantes, un bloc opératoire et une unité de soins intensifs.

Les pertes humaines (L1) et les pertes économique (L4) peuvent effectuer ce type de structure. il est nécessaire d'évaluer le besoin de protection et les impacts économiques des mesures de protection, si bien que les risques R1 et R4 doivent être évalués.

Tableau IV- 21 caractéristiques de la structure

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|--|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Dimension (m) | - | Lb.Wb.Hb | 50.150.10 |
| Facteur d'emplacement | Isolé | Cd | 1 |
| SPF | Aucun | P _B | 1 |
| Ecran à la frontière de la structure | Aucun | K _{s1} | 1 |
| Ecran dans la structure | Aucun | K _{s2} | 1 |
| Densité de foudroïment | 1/KM ² /an | N _g | 4 |
| Personne ne présente dans la structure | A l'intérieure et a l'extérieure | N _t | 1000 |

TABLEAU IV- 22 CARACTERISTIQUES DU RESEAU DE PUISSANCE INTERNE ET DE LA LIGNE DE PUISSANCE ENTRANTE CONCERNE

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|---|--|----------|--------|
| Résistivité du sol | Ωm | ρ | 200 |
| Longueur (m) | | Lc | 500 |
| Hauteur (m) | Enterrée | - | 0.2 |
| Transfo HT/BT | A l'entrée | Ct | 0.5 |
| Facteur d'emplacement de ligne | Entouré de petits | Cd | 0.5 |
| Facteur d'environnement de ligne | Suburbain | Ce | 0.2 |
| Ecran de ligne connectée à la borne principale de terre | $R_s \leq 1$ (&/Km) | PID | 0.008 |
| Précaution d'installation des câbles | Cable non écrantés- Précaution d'usage afin d'évité de grandes boucle | PII | 0.2 |
| Tension de tenue des matériels U_w | $U_m = 2.5$ kV | Ks3 | 0.6 |
| Parafoudres coordonnés | Aucun | Pspd | 1 |
| Extrémité {a} de la ligne dimension de la structure (m) | Aucun | La.Wa.Ha | |

TABLEAU IV- 23 CARACTERISTIQUE DU RESEAU DE COMMUNICATION INTERNE ET DE LA LIGNE CONCERNEE

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|--------------------------------|-------------------|----------|--------|
| Résistivité du sol | Ωm | ρ | 200 |
| Longueur (m) | - | Lc | 300 |
| Hauteur (m) | Enterré | - | |
| Facteur d'emplacement de ligne | Entouré de petits | Cd | 0.5 |

| | | | |
|---|--|------------|-------------|
| Facteur d'environnement de ligne | Suburbain | Ce | 0.5 |
| Ecran de ligne connectée a la borne principale de terre | $11 < R_s \leq 5\Omega/Km$ | Pld Pli | 0.8 0.04 |
| Précaution d'installation des cables | Câbles non écranté- Précautions d'usage afin d'évité de boucles | Ks3 | 0.02 |
| Tension de tenue des matériaux Uw | Uw=1.5Kv | Ks4 | 1 |
| Parafoudres coordonnés | Aucun | Pspd | 1 |
| Extrémité {a} de la ligne dimension de la structure (m) | Aucune | La.wa.Ha | 20.30.5 |
| Facteur d'emplacement de structure {a} | Isolé | Cda | 1 |

IV.4.2. Définition des zones de l'hôpital et leurs caractéristiques

En tenant compte des éléments suivants :

- Le type de sole est différent à l'extérieure et a l'intérieure de la structure ;
- La structure et le bloc opératoire sont des compartiments a l'épreuve du feu ;
- Il n'y pas d'écran spatiaux ;
- L'unité de soin intensifs contient de nombreux système électronique sensibles et un écran peut être adopté comme mesure de protection ;
- Dans l'unité de soins intensifs, les pertes L sont présumées supérieure a celles des autres parties de la structure ;

Les zones principales suivantes peuvent être définies :

Z1 (à l'extérieure du bâtiment) ;

Z2(bloc chambres) ;

Z3 (bloc opératoire) ;

Z4 (unité de soins intensifs).

Selon l'estimation des mesures de protection par le concepteur, les valeurs moyennes typique de pertes relatives annuelles pour le risque R1.

- $L_t = 10^{-2}$ (à l'extérieure de la structure).
- $L_t = 10^{-4}$ (a l'intérieure de la structure).
- $L_f = 10^{-1}$
- $L_o = 10^{-3}$
- Sont réduites pour les zones Z1,Z2 et Z3.pour la zone Z4 , une valeur par défaut est prise en raison des caractéristiques particulières de cette zone ; $L_o = 10^{-3}$.

Pour le risque R4, des valeurs typiques moyennes de pertes sont choisies

- $L_f = 5 \times 10^{-1} - L_o = 10^{-2}$

TABLEAU IV- 24 CARACTERISTIQUE DE LA ZONE Z1 (EXTERIEURE DU BATIMENT)

| Paramètres | Note | Symbole | Valeur |
|--|--------|---------|--------------------|
| Type de sol | Béton | ra | 1×10^{-2} |
| Protection contre les chocs | Aucune | PA | 1 |
| Perte par tension de contact et de pas | Oui | Lt | 1×10^{-4} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 10 |

TABLEAU IV- 25 CARACTERISTIQUES DE LA ZONE Z2 (BLOC CHAMBRES)

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------|--------------------|
| Type de sol | Linoléum | ru | 1×10^{-5} |
| Risque d'incendie | Ordinaire | rf | 1×10^{-2} |
| Danger particulier pour R1 | Difficulté d'évacuation | Hz | 5 |
| Danger particulier pour R4 | Aucun | hz | 1 |
| Protection contre l'incendie | Aucun | rp | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | Ks2 | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Connecté a la ligne de puissance | - | |
| Réseaux téléphonique internes | Connecté a une ligne de communication | - | |

| | | | |
|---|--------|----|----------------------|
| Pertes par tension de contact et de pas (relatives) | Oui | Lt | 9.5×10^{-5} |
| Pertes par dommage physique (relative a R1) | Oui | Lf | 9.5×10^{-2} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes | Aucune | Lo | |
| Personnes en danger Présentes dans la zone | Oui | | 950 |
| Pertes par dommage physique(relative a R4) | Oui | Lf | 5×10^{-1} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes (relative a R4) | | Lo | 1×10^{-2} |

TABLEAU IV- 26 CARACTERISTIQUES DE LA ZONE Z3 (BLOC OPERATOIRE)

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|---|---------------------------------------|----------|----------------------|
| Type de sol | Linoléum | ru | 1×10^{-5} |
| Risque d'incendie | Faible | rf | 1×10^{-1} |
| Danger particulier pour R1 | Difficulté d'évacuation | hz | 5 |
| Danger particulier pour R4 | Aucun | hz | 1 |
| Protection contre l'incendie | Aucun | rp | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | Ks2 | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Connecté à la ligne de puissance | - | |
| Réseaux téléphonique internes | Connecté a une ligne de communication | - | |
| Pertes par tension de contact et de pas (relatives à R1) | Oui | Lt | 3.5×10^{-6} |
| Pertes par dommage physique (relative à R1) | Oui | Lf | 3.5×10^{-3} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes (relative à R1) | Aucune | Lo | 1×10^{-3} |
| Personnes en danger Présentes dans la zone | | | 35 |
| Pertes par dommage physique (relative a R4) | Oui | Lf | 5×10^{-1} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes (relative à R4) | Oui | Lo | 1×10^{-2} |

TABLEAU IV- 27 CARACTERISTIQUES DE LA ZONE Z4 (UNITE DE SOIN INTENSIF)

| Paramètres | Note | Symboles | Valeur |
|---|---------------------------------------|----------|--------------------|
| Type de sol | Linoléum | ru | 10^{-5} |
| Risque d'incendie | Faible | rf | 10^{-3} |
| Danger particulier pour R1 | Difficulté d'évacuation | Hz | 5 |
| Danger particulier pour R4 | Aucun | Hz | 1 |
| Protection contre l'incendie | Non | rp | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | Ks2 | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Connecté a la ligne de puissance | - | |
| Réseaux téléphonique internes | Connecté a une ligne de communication | - | |
| Pertes par tension de contact et de pas (relatives a R1) | Oui | Lt | 5×10^{-7} |
| Pertes par dommage physique (relative a R1) | Oui | Lf | 5×10^{-4} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes (relative a R1) | Oui | Lo | 1×10^{-3} |
| Personnes en danger Présentes dans la zone | | | 5 |
| Pertes par dommage physique (relative a R4) | Oui | Lf | 5×10^{-1} |
| Pertes par défaillance des réseaux internes (relative a R4) | Oui | Lo | 1×10^{-2} |

TABLEAU IV- 28 CARACTERISTIQUES DE ZONE Z1 (EXTERIEUR DU BATIMENT)

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|---|--------|---------|--------------------|
| Type de sol | Béton | ra | 1×10^{-2} |
| Protection contre les chocs | Aucune | PA | 1 |
| Perte par tensions de contact et de pas | Oui | Lt | 1×10^{-4} |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 10 |

TABLEAU IV- 29 CARACTERISTIQUES DE LA ZONE Z2 (BLOC CHAMBRES)

| Paramètre | Note | Symbole | Valeur |
|--|--|---------|----------------------|
| Type de sol | Linoleum | ru | 1×10^{-5} |
| Risque d'incendie | Ordinaire | rf | 1×10^{-4} |
| Danger particulier(pour R1) | Difficulté d'évacuation | hz | 5 |
| Danger particulier(pour R4) | Aucun | hz | 1 |
| Protection contre l'incendie | Aucun | rp | 1 |
| Ecran spatial | Aucun | KS2 | 1 |
| Réseaux de puissance internes | Connectes a la ligne de puissance | - | |
| Réseaux téléphoniques internes | Connectes a une ligne de communication | - | |
| Pertes par tensions de contact et de pas (relatives) | Oui | Lt | $9,5 \times 10^{-5}$ |
| Pertes par dommages physiques (relatives a R1) | Oui | Lf | $9,5 \times 10^{-5}$ |
| Pertes par défaillance des réseaux internes | Aucun | Lo | 950 |
| Personnes en danger présentes dans la zone | | | 5×10^{-1} |

IV.4.3. Calcul des valeurs correspondantes

Les calculs des surfaces équivalentes d'exposition sont présentés au Tableau IV-36.

TABLEAU IV- 30: SURFACES D'EXPOSITION ÉQUIVALENTE DES STRUCTURES ET DES LIGNES

| Symbole de surface | Formule pour la surface équivalente d'exposition | Valeur m ² |
|--------------------|--|------------------------|
| Ad | Structure: $Ad = [Lb.Wb + 6.Hb.(Lb + Wb) + \pi.(3 Hb)^2]$ | 223626 |
| Al(P) | Ligne de puissance: $Al(P) = (Lc - e(Ha + Hb)).\sqrt{\rho}$ | 6750 |
| Ai(P) | A proximité de la ligne de puissance: $Ai(P) = 25.Lc.\sqrt{\rho}$ | 17676 |
| Al(T) | Ligne de communication: $Al(T) = (Lc - e(Ha + Hb)).\sqrt{\rho}$ | $3,63 \times 10^{+03}$ |
| Ai(T) | A proximité de la ligne de communication: $Ai(T) = 25.Lc.\sqrt{\rho}$ | 106066 |

TABLEAU IV- 31: L'ÉVALUATION DES COMPOSANTES DE RISQUE POUR LES STRUCTURES

| Symbole | Formule pour le nombre d'impacts | Valeur (1/an) |
|--------------|---|------------------------|
| ND | $ND = Ng \cdot Ab \cdot Cd \cdot 10^{-6}$ | $8,93 \times 10^{-02}$ |
| NM(P) | $NM(P) = Ng(Am - Ad \cdot Cd) \cdot 10^{-6}$ | $1,24 \times 10^{+05}$ |
| NL(P) | $NL(P) = Ng \cdot Alp \cdot Cd \cdot Ctp \cdot 10^{-6}$ | $2,7 \times 10^{-03}$ |
| NI(P) | $Ni(P) = Ng \cdot Aip \cdot Ce \cdot Ctp \cdot 10^{-6}$ | $7,07 \times 10^{-02}$ |
| NDa | $NDa = Ng \cdot Ai \cdot Ce \cdot Ct \cdot 10^{-6}$ | $1,13 \times 10^{-2}$ |
| NM(T) | $NM(T) = Ng(Am - Ad \cdot Cdt) \cdot 10^{-6}$ | $1,12 \times 10^{-02}$ |
| NL(T) | $NL(T) = Ng \cdot Alt \cdot Cdt \cdot Ct \cdot 10^{-6}$ | $7,26 \times 10^{-03}$ |
| NI(T) | $Ni(T) = Ng \cdot Ait \cdot Cet \cdot Ct \cdot 10^{-6}$ | $2,12 \times 10^{-02}$ |

IV.4.4. Calcul du risque pour décider le besoin de protection

Les composantes de risque impliquées pour chaque zone et l'évaluation du risque total sont données au Tableau IV-38

Tableau IV- 32 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques
SELON LES ZONES (VALEURS $\times 10^{-5}$)

| Symbole | Formule pour la Composante avec impacts sur | Z1 A l'extérieur du | Z2 Bloc chambres | Z3 Bloc Operation | Z4 Unite de soins intensifs | Structure |
|-----------|---|------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| RA | $RA = ND \cdot P_A \cdot ra \cdot Lf$ | $8,93 \times 10^{-3}$ | - | - | - | $8,93 \times 10^{-3}$ |
| RB | $RB = ND \cdot P_B \cdot rp \cdot hz \cdot rf \cdot Lf$ | - | 42,4 | 0,156 | $2,23 \times 10^{-2}$ | 42,6 |

| | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| RC | RC = ND.Pc.Lo | - | - | 8,93 | 8,93 | 17,9 |
| RM | RM= NM.Pm.Lo | - | - | 85 | 85 | 170 |
| RU (Ligne de puissance) | RU= (NL+NDa).Pu.ru.Lt | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RV (Ligne de puissance) | RV=(NL+NDa).Pv.rp.hz.rf.Lf | - | 0,25 | 0 | 0 | 0,25 |
| RW (Ligne de puissance) | RW=(NL+NDa).Pw.Lo | - | - | 0,054 | 0,0540 | 0,108 |
| RZ (Ligne de puissance) | RZ=(NI-NL).Pz.Lo | - | - | 0,0544 | 0,0544 | 0,109 |
| RU (Ligne de puissance) | RU=(NL+NDa).Pu.ru.Lt | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| RV (Ligne de puissance) | RV=(NL+NDa).Pv.rp.hz.rf.Lf | - | 8,78 | 0,0259 | 0,00462 | 8,810 |
| RW (Ligne de puissance) | RW=(NL+NDa).Pw.Lo | - | - | 1,48 | 1,48 | 2,96 |
| RZ (Ligne de puissance) | RZ=(NI-NL).Pz.Lo | - | - | 0,820 | 0,820 | 1,64 |
| Total | - | 0,0089 | 51,43 | 96,5 | 96,0 | 243 |

Tableau IV- 33 Risque R1 – Valeurs des composantes de risques

SELON LES ZONES (VALEURS $\times 10^{-5}$)

| Symbole | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Structure |
|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|----------------|
| RD | 0,00893 | 42,4 | 0 | 0 | 0,00893 |
| RI | 0 | 9,03 | 87,43 | 87,43 | 183,9 |
| Total | 0,0089 | 51,43 | 87,43 | 87,43 | 183,908 |
| Rs | 0,0089 | 0 | 0 | 0 | 0,0089 |
| RF | 0 | 51,43 | 0,181 | 0,0269 | 51,63 |
| Ro | 0 | 0 | 95,464 | 95,464 | 190,928 |
| Total | 0,0089 | 51,43 | 95,645 | 95,49 | 243 |

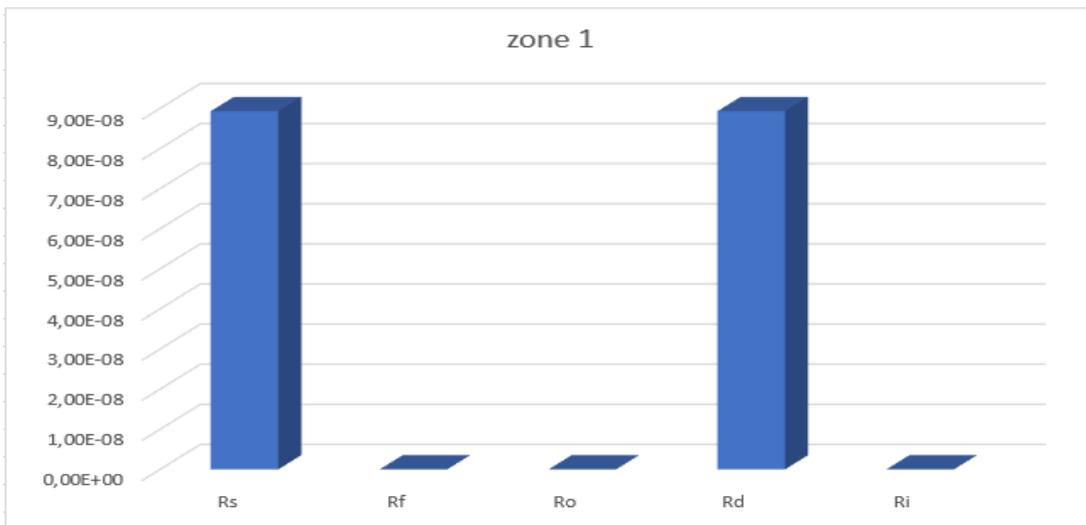


Figure IV- 19: Risques résultant en fonction du type de dommage dans la zone 1 (à l'extérieur de bâtiment)

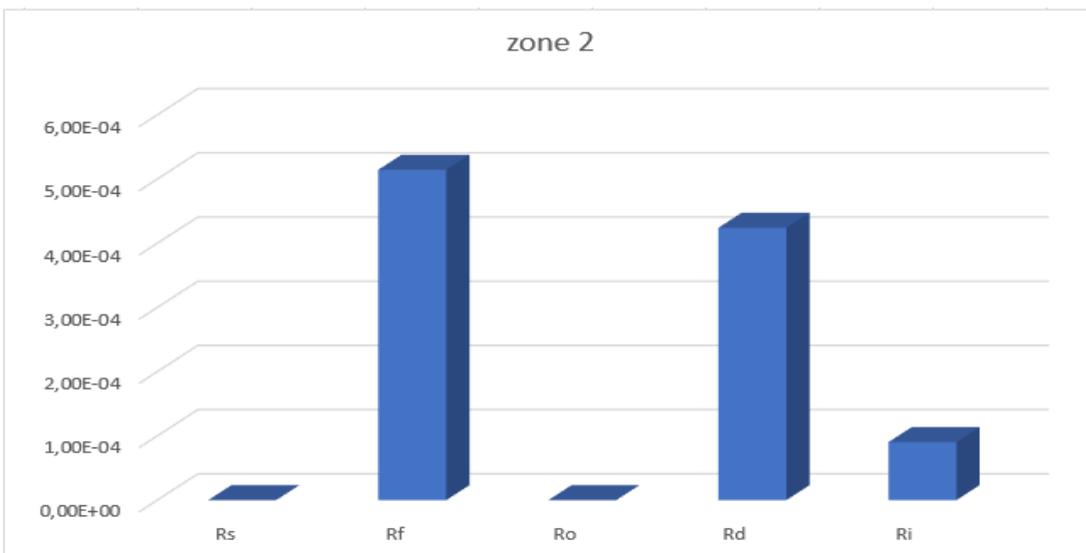


FIGURE IV- 20 : RISQUES RESULTANT EN FONCTION DU TYPE DE DOMMAGE DANS LA ZONE 2 (BLOC CHAMBRE)

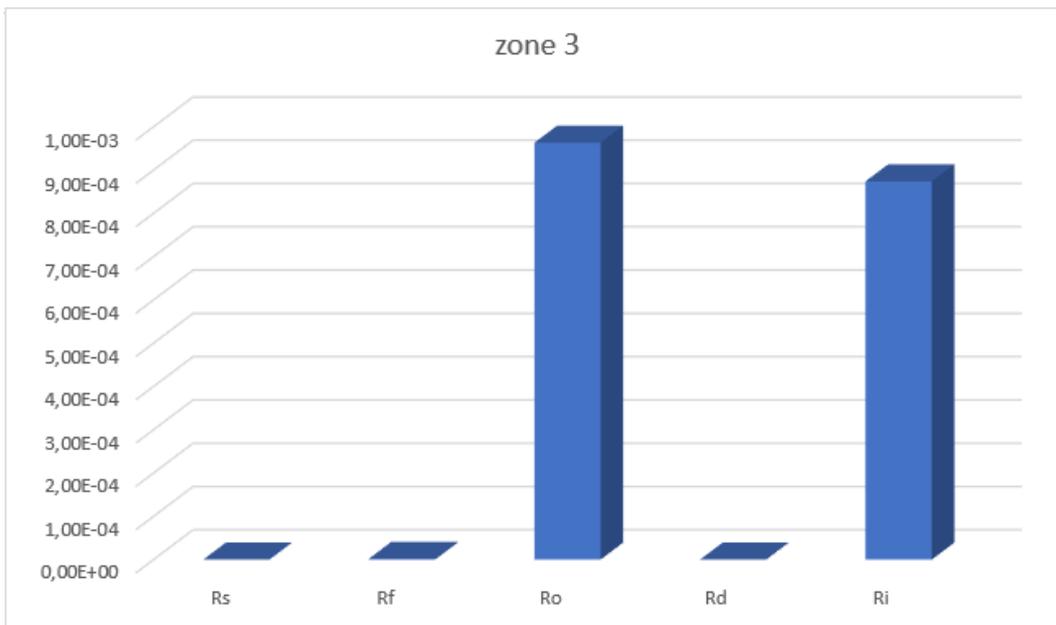


FIGURE IV- 21: RISQUES RESULTANT EN FONCTION DU TYPE DE DOMMAGE DANS LA ZONE 3 (BLOC OPRETATION)

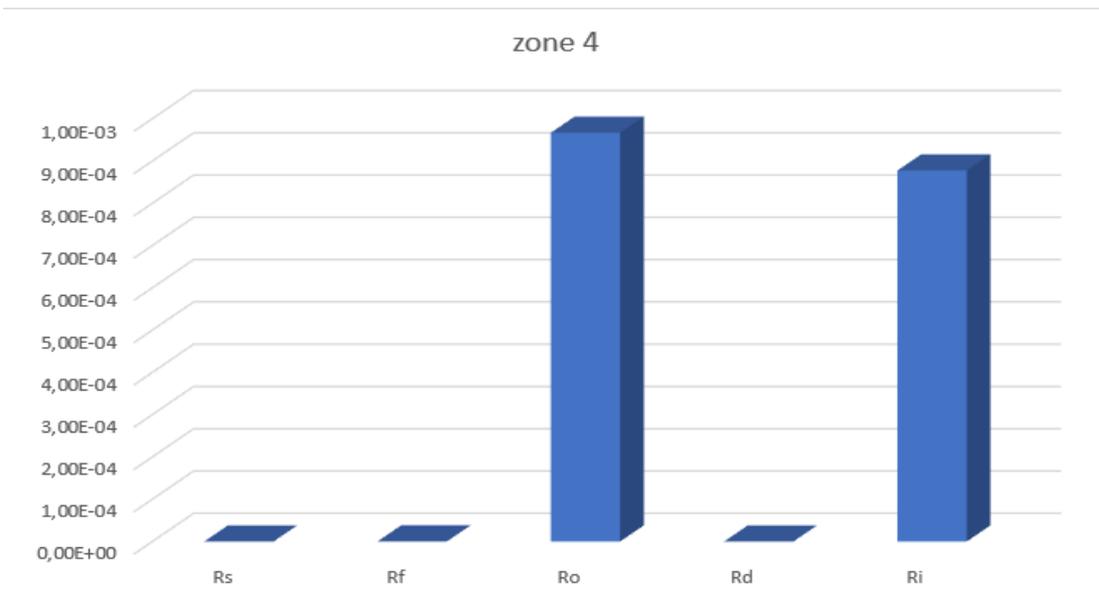


FIGURE IV- 22 : RISQUES RESULTANT EN FONCTION DU TYPE DE DOMMAGE DANS LA ZONE 4 (UNITE DE SOINS INTENSIFS)

IV.4.5. Réduction des risques

Après avoir calculé le risque 1 de la structure Hôpital nous constatons qu'il dépasse le risque toléré donc la structure a besoin d'être protégé contre la foudre. Pour savoir les mesures de protection la solution suivante pourrait être adoptée :

1. Protection du bâtiment avec un SPF de Type I.
2. Installation de parafoudres coordonnés avec $PB = 0,005$ sur les réseaux internes de puissance et de communication : pour réduire les défaillances des réseaux électriques et électroniques
3. Equipement de la zone Z2 avec un système automatique de détection incendie.
4. Equipement des zones Z3 et Z4 avec un écran : tresse métallique utilisée pour réduire les dommages physiques dus aux coups de foudre qui frappent un service maillé : $w = 0,5$ m.
5. Le facteur réduisant les pertes dues aux dispositions contre l'incendie $r_p = 0,2$ spécialement dans la zone 2.

TABLEAU IV- 34 VALEURS DE LA PROBABILITE P POUR UNE STRUCTURE PROTEGEE

| Probabilite | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 |
|--------------------|----|-------|---------|----|
| P_A | 1 | - | | |
| P_B | - | 0,02 | | |
| $P_{C(Puissance)}$ | | - | 0,005 | |
| $P_{C(Telecom)}$ | | - | 0,005 | |
| P_C | | - | 0,00199 | |
| $P_{M(puissance)}$ | | - | 0,0001 | |
| $P_{M(telecom)}$ | | - | 0,0001 | |
| P_U | | - | 0,0002 | |
| P_V | - | 0,005 | | |
| P_W | - | 0,005 | | |
| P_Z | | - | 0,005 | |
| P_U | | - | 0,005 | |
| P_V | - | 0,005 | | |
| P_W | - | 0,005 | | |
| P_Z | | - | 0,005 | |
| P_U | | - | 0,005 | |

TABLEAU IV- 35 RESULTATS DE REDUCTION DES RISQUES

| Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | TOTAL |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 0,0085 | 0,180 | 0,265 | 0,261 | 0,7145 |

IV.5. Conclusion

On s'est intéressé dans ce chapitre à analyser le risque foudre pour trois cas de structures à savoir : une maison rurale, un bâtiment bureau et un hôpital par l'application de la méthode probabilistique analyse du risque foudre. Le risque calculé pour les trois cas dépasse le risque toléré conseillé d'où la nécessité de l'installation des systèmes de protection contre la foudre. Des solutions pour le choix des mesures de protection ont été proposées et étudiées sont présentes dans ce chapitre.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit avait pour objectif d'évaluer le risque de foudroiement d'une structure par une méthode probabilistique dite ARF.

Une première difficulté, dans la réduction du risque lié à la foudre, est liée au caractère aléatoire et difficilement prévisible du phénomène ajouté à la diversité des effets (thermiques, électriques, électrodynamiques...).

Le chapitre « description du phénomène » montre que la foudre se propage de différentes manières, et que l'intensité du courant peut atteindre des dizaines de milliers d'ampères. De plus, les effets sont variés : un coup de foudre est à la fois une source de chaleur ponctuellement très importante.

La première étape de la démarche consiste à évaluer le besoin de protection d'une installation. Une méthode probabiliste définie dans la norme NF EN 62305- 2 consiste à calculer un risque à partir de l'occurrence des événements d'origine orageuse (liée à l'activité orageuse et la taille des structures) et la dangerosité de l'installation. La valeur du risque est comparée à un risque tolérable. Le risque peut être réduit par une approche itérative en ajoutant des mesures de protection.

Le chapitre « analyse du risque foudre » présente la méthode et donne des précisions sur la manière de pondérer les variables de calcul.

L'efficacité d'un système de protection contre la foudre est très liée au respect des règles de mise en œuvre. Il est indispensable de faire appel à des professionnels reconnus compétents pour réaliser les différentes missions : étude, installation et vérifications.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] COO07-DUN03-FAR09-GAR04-JIN17-RAK03
- [2] Charly sigogne {*CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE L'EVALUATION DU RISQUE DE FOUROIEMENT D'UN SITE APPLICATION AU PIC DU MIDI DE BIGORRE*} thèse de doctorat, l'Université de peu et des pays de l'Adour, 12 décembre 2014
- [3] 1 A. Hermant et C. Lesage, L'électricité atmosphérique et la foudre. Paris: Presses universitaires de France, 1997.
- [4] C. Bouqueneau, *Doit-on craindre la foudre?*. EDP Sciences, 2006.
- [5] C. Gary, *La foudre: des mythologies antiques à la recherche moderne*. Paris: Masson, 1994.
- [6] B. Franklin, *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia*, 5ème éd. London: F. Newberry, 1774.
- [7] K. B. McEachron, Lightning to the Empire State Building, *vol. 227, no J. Franklin Inst; p.149–217, 1939*.
- [8] K. Berger, « Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore », *Journal of the Franklin Institute*, vol. 283, no 6, p. 478–525, 1967.
- [9] **Le livre** : guide technique parafoudres
- [10] <https://www.caminteresse.fr/sciences/quelle-est-lorigine-de-la-foudre-11136428/>
- [11] F. Rachidi « Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes : modélisation et simulation », these N974 (1991), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [12] C.GARY, Les principes physiques guidant la protection des bâtiments contre la foudre RGE – Tome 89 -n5 – Mai 1980
- [13] B. PIQUETTE. Protection contre la foudre des installations classé pour la protection de l'environnement INERIS direction des risques accidentels,2011
- [14] S.Halama – E. ERB, « 'Protection des installations industrielles contre les effets de la foudre' »
- [15] Institution national de l'Environnement industriel et des risques « Le risque foudre et les Installations Classées pour la Protection de Environnement ». Direction des Risques Accidentels, Septembre 2001
- [16] Protection-foudre-egis.fr/moyens-protection-foudre/
- [17] **le site** : (<http://www.ineris.fr/centredoc/ipsos.pdf>).
- [18] (ANDRA <http://www.andra.fr/producteurs/download/andra-producteur-fr/document/liste-regroupeurs-paraton-nerres.pdf> Juillet 2013)

Bibliographie

- [19] C. Libbrecht ; Analyse Risque Foudre Etude Technique (ALPES ASSAINISSEMENT) 28/07/2016
- [20] A.KHECHKHOUCHE, Modélisation numérique de la protection primaire contre la foudre dans le cas des terres hétérogènes. Thèse de doctorat, université de Biskra 2017
- [21] **protection contre les efftes directs et indirects de la foudre,pole foudre soulé et hélita.2016**
- [22] P. Duquerroy, P. Gruet « Lightning risk analysis : Guidance for method évaluation » 29th ICLP june 2008 Uppsala (Sweden)
- [23] M. Aoudia, Etude Des Protections Du Poste Source FREHA 60/30kV Contre Les Surtensions Atmosphériques. Mémoire de master, Université de Tizi ouzou, 2011
- [24] Ce document a été établi par 3L Foudre à partir de ETF-MOD-V10)
- [25] Rédaction : Bernard PIQUETTE, INERIS - Direction des risques accidentels Pierre GRUET - Direction de la certification Parc Alata, BP2, 60550 VERNEUIL EN HALATTE - www.ineris.fr
- [26] S. Lounis, Etudes Des Protections Contre Les Surtensions De Foudre, Mémoire de master Université de Tizi ouzou, 2017.
- [27] Protection-foudre-egis.fr/moyens-protection-foudre/
- [28] Philippe Dunand, protection des installations électrique contre la foudre, Dunand, paris 2003.
- [29] **D.DIB , l'impact de la foudre sur le réseaux électrique étude et analyse et modélisation, thèse de docttorat-university Bordji Mokhtar, Annaba 2007.**
- [30] **le site** GALLIN, L.-J. 2010. Campagne d'étude in situ du foudroiement d'un bâtiment complexe pour une meilleure compréhension des écueils liés à la protection foudre. Rapport de stage.
- [31] GARY, C. 1994. La foudre : des mythologies antiques à la recherche moderne. Masson.
- [32] voir site internet de l'association Protection Foudre, <http://www.apfoudre.com/>
- [33] CEI 61000-4-5:1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-5: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux ondes de choc*
- [34] HUSSEIN, A. 2009. CN Tower Lightning Paramètres. Proc. 10th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA).
- [35] CEI 60664-1:1992, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 1: Principes, prescriptions et essais*
- [36] CEI 61643-1:1998, *Parafoudres basse tension – Partie 1: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Partie 1: Exigences et essais et méthodes d'essai*
- [37] UIT-T Recommandation K.20:2003, *Tenue aux surtensions et aux surintensités des matériels de communication installés dans les centres de communication*