

La foudre en France : enjeux et solutions

ELYSABETH BENALI¹, MICHAEL TROUBAT²

PRÉSIDENTE DE FRANCE PARATONNERRES, PRÉSIDENTE DE LA DIVISION D84 DU GIMELEC¹,
RESPONSABLE R&D DE FRANCE PARATONNERRES²

ABSTRACT

This paper discusses the risks and challenges connected to the lightning phenomenon and proposes solutions for protection. After a brief history of the lightning and the associated risks, the paper describes the various systems of protection available and discusses the various laboratory or in situ tests available to validate their proper functioning. Then these Lightning Protection Systems are compared with standards and regulations in force in France.

Some typical lightning protection installations set up on sites around the world are briefly described.

Finally, in view of global warming and depletion of raw material resources, a reflection on future developments of lightning protection is proposed.

RÉSUMÉ

Cet article traite des risques et enjeux liés à la foudre et propose des solutions de protection.

Après un bref historique de la foudre et des risques associés, l'article aborde les différents systèmes de protection à disposition et évoque les différents tests en laboratoire ou in situ disponibles pour valider leur bon fonctionnement. Par la suite, ces systèmes de protection foudre sont rapprochés des normes les encadrant et de la réglementation en vigueur en France.

Quelques installations de protections foudre originales mises en place sur des sites à travers le monde sont brièvement décrites.

Pour terminer, compte tenu du réchauffement climatique et de l'épuisement des ressources de matières premières, une réflexion sur les évolutions à venir de la protection foudre est proposée.

Introduction

La foudre est un phénomène étudié depuis l'origine de l'homme sur Terre et les premières solutions pour s'en protéger sont apparues il y a plus de 200 ans maintenant.

La foudre est en fait le phénomène le plus fréquent et le plus étudié de notre planète mais, malgré cela, nous ne savons que très peu à son sujet. L'étude de la foudre nous renvoie vers les frontières de nos sciences actuelles. C'est une force destructrice mais qui est indispensable à la vie sur Terre. Elle fait en effet partie de l'équilibre électrique et électrostatique de la planète. Plus les années passent et plus les découvertes sur la foudre sont mystérieuses et étonnantes. Il faudra encore de nombreuses années avant que ce phénomène ne soit véritablement compris et que tous les mystères de la foudre ne soient levés.

Pour répondre à ces problématiques, les professionnels de la foudre se sont structurés et mettent leur expertise au service des personnes et des biens de façon à assurer leur protection. Néanmoins, il est important de rappeler que le risque zéro n'existe pas.

La foudre et son histoire ancienne

Bref historique

Depuis la nuit des temps, l'électricité a toujours été présente. Elle s'est donc souvent manifestée auprès des hommes sous diverses formes comme par exemple les éclairs. La foudre a naturellement attiré et fasciné les hommes, car pendant la préhistoire, elle apportait aux hommes de la lumière et de la chaleur bien avant qu'ils ne sachent fabriquer par eux-mêmes du feu.

Durant l'Antiquité, les hommes ont attribué le pouvoir de la foudre à leurs divinités les plus respectées comme Zeus pour les Grecs ou Thor pour les Scandinaves.

Au Moyen Âge, les orages et différents phénomènes complémentaires étaient interprétés comme des manifestations divines. Par exemple « les feux de Saint-Elme » (lumières bleutées apparaissant autour d'un objet), phénomènes précurseurs d'un orage, intriguaient et effrayaient les hommes de l'époque. Ce nom vient d'une croyance très répandue parmi les marins qui voyaient dans ces feux un signe de la protection de Saint-Elme.

La nature électrique de la foudre fut découverte au XVIII^e siècle. Cette découverte fut l'objet d'une grande controverse scientifique entre le Français, l'abbé Nollet, et l'Américain, Benjamin Franklin.

L'abbé Nollet est le premier à avoir fait le rapprochement entre la foudre et l'électricité en 1748 alors que Benjamin Franklin et sa fameuse expérience du cerf-volant datent de 1752. L'histoire raconte que Benjamin Franklin attachait une clef à son cerf-volant lors d'un orage. De nombreuses étincelles se produisirent lorsqu'un éclair frappa la clef. Franklin fit alors le lien entre la foudre et l'électricité. Il est considéré aujourd'hui que cette expérience n'a jamais eu lieu car Franklin n'y aurait pas survécu.

Il n'y pas eu de découverte majeure sur la foudre avant la deuxième partie du XX^e siècle car les scientifiques ne disposaient pas encore d'instruments détaillés pour l'étudier précisément.

Statistiques de foudroiement

Sur Terre, nous recensons environ 20 millions d'orages par an (soit 55 000 par jour). Ils sont moins fréquents aux latitudes septentrionales. La majorité de l'ac-

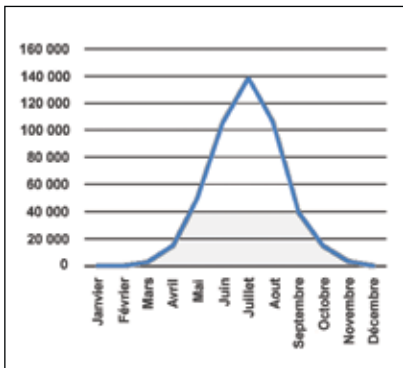


Figure 1: Répartition annuelle de l'activité foudre.

tivité foudre se situe entre les tropiques. À chaque instant, 100 coups de foudre frappent la Terre, soit un total annuel mondial de 32 millions de coups de foudre.

En France par exemple, on enregistre en moyenne environ 500 000 éclairs nuage-sol par an. Les mois de plus grande activité sont les mois d'été. Cette période estivale représente habituellement plus de la moitié du foudroiement annuel. L'activité suit une courbe gaussienne le long d'une année (figure 1).

Typologies d'impact foudre

Un impact de foudre peut se localiser à plusieurs endroits différents (figure 2) :

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

Effets de la foudre

En fonction de la localisation de l'impact (source), les effets de la foudre sont variables et engendrent des conséquences différentes (figure 2).

Impact sur une structure (S1)

- **effets mécaniques** induits lors d'un impact foudre (déformations, arrachements, destructions) ;
- **effets thermiques (ou effet Joule)** engendrant au point d'impact la fusion, voire la destruction par explosion des matériaux, ou encore des départs d'incendie.

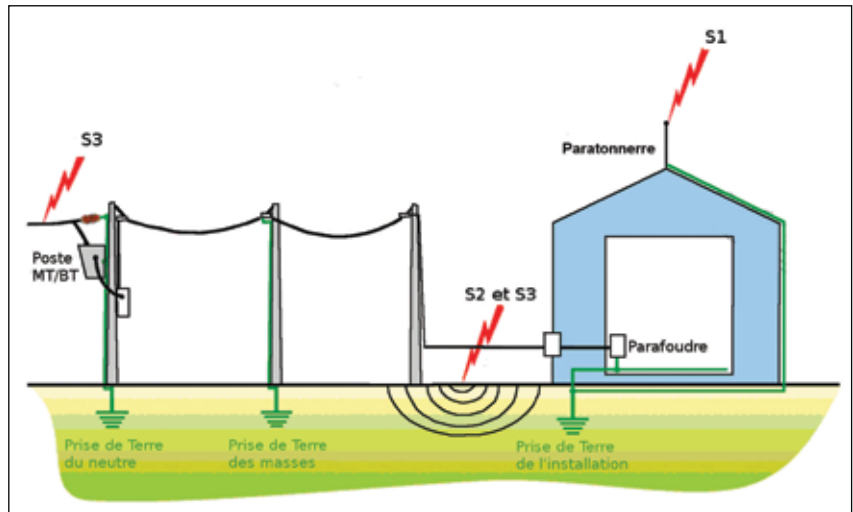


Figure 2 : Différentes localisations possibles des impacts de foudre.

Impact à proximité d'une structure (S2)

- **surtensions induites** par le rayonnement électromagnétique du courant de foudre sur tous les éléments métalliques proches. Des surtensions apparaissent ainsi sur tous les équipements qui leur sont reliés (les effets sont proportionnels à la puissance et à la proximité de l'impact) ;
- **montées en potentiel** de la terre de l'installation, au moment de la dispersion du courant dans le sol, provoquant des différences de potentiels destructrices entre les masses des équipements et les réseaux auxquels ils sont reliés ;
- **tensions de pas**¹ pouvant provoquer sur les personnes ou les animaux, des brûlures ou des arrêts respiratoires et cardiaques lors de la dispersion du courant de foudre dans le sol.

Impact sur un service (S3)

- **surtensions conduites** lors d'un coup de foudre direct sur une ligne électrique ou un pylône. Le courant se propage et atteint toutes les installations dis-

tribuées par ligne, même localisées à plusieurs kilomètres du point d'impact.

Impact à proximité d'un service (S4)

- **surtensions induites** (voir précédemment) ;
- **tensions de pas** (voir précédemment).

Dégâts et couts engendrés

En France, le coût annuel des dommages causés par la foudre se chiffrent en milliards d'euros :

- 1 000 000 de coups de foudre par an ;
- 100 personnes touchées par la foudre par an :
 - 10 % décèdent (10 foudroyés) ;
 - 90 % survivent (90 fulgurés) dont 70 % ont des problèmes médicaux à long terme ;
 - 30 % souffrent de confusion mentale.
- 10 000 animaux foudroyés ;
- 20 000 sinistres dus à la foudre dont 15 000 incendies ;
- 50 000 compteurs électriques détruits.

Chaque année plusieurs cas de foudroiement sur des personnes sont à déplorer. Bien que commun, l'orage reste un phénomène météorologique violent capable d'engendrer des dégâts considérables et de porter atteinte à l'intégrité physique des êtres humains.

¹ La tension de pas est la tension générée lors d'un impact de foudre entre deux points du sol séparés d'une distance appelée « pas » (par exemple entre les deux pieds d'une personne).

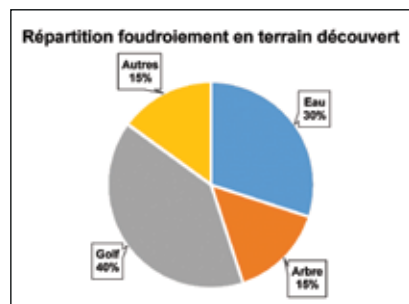
On rappelle, que par temps d'orage, la mise à l'abri dans un local en dur reste la mesure la plus efficace et le meilleur réflexe.

En effet, la foudre cherche le chemin le plus facile pour atteindre le sol. Le courant peut alors se propager dans le sol jusqu'à 20 à 30 m autour du point d'impact. Une personne à proximité d'un objet frappé par la foudre peut ainsi être blessée ou tuée.

Une étude réalisée en 2008 [1] indique que la 20^e cause de mortalité (1 sur 81 701) est d'être frappé par la foudre.

Une statistique américaine portant sur la période 1950-1990 fait apparaître que 40 % des foudroiements ont lieu en terrain découvert dont :

- 30 % sur l'eau ;
- 15 % sous les arbres ;
- 40% sur des parcours de golf ;
- 15% pour les autres types de terrains.



En complément d'information, il est à préciser que le site le plus impacté de la planète est le lac Maracaïbo au Venezuela avec au moins 297 jours d'orage par an (figure 3). Ce point est confirmé par une étude américaine [2] menée en 2016.

Les différents systèmes de protection

La protection contre la foudre est soumise à une réglementation importante au travers d'arrêtés, décrets et circulaires ministérielles, qui s'appuient notamment sur les textes de normalisation.

En France par exemple, les professionnels de la protection contre la foudre



Figure 3 : Orage sur le lac Maracaïbo (Vénézuéla).

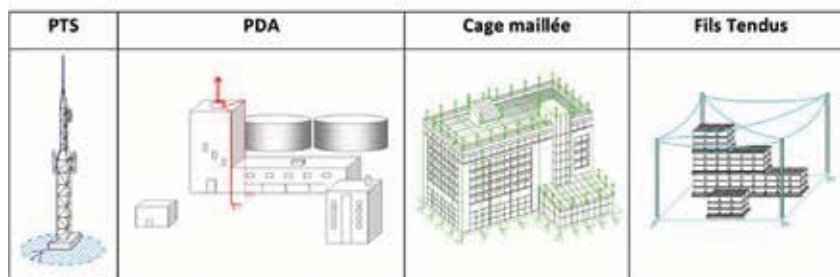


Figure 4 : Différents types de systèmes paratonnerres.

sont réunis au sein d'une représentation des acteurs de la filière industrielle, le syndicat GIMELEC (www.paratonnerre-pda.com) qui est l'organe privilégié dans le dialogue avec les instances réglementaires et normatives (Afnor, Ineris...).

A titre d'information, nous donnons ci-après une liste non exhaustive des techniques courantes de protection contre la foudre.

Systèmes paratonnerres (protection des bâtiments)

Le paratonnerre situé sur le sommet d'un bâtiment permet de capter la foudre, de la canaliser et d'évacuer l'énergie vers la terre. On distingue quatre principaux types de paratonnerres (figure 4) :

a) paratonnerres à tige simple (PTS) : tige métallique placée en partie supérieure du bâtiment ; l'énergie sera écoulee vers la terre le long d'une descente verticale ;

b) paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA) : paratonnerre moderne qui dans les mêmes conditions qu'un paratonnerre à tige simple, va générer un traceur ascendant précoce permettant de capter la foudre plus haut et ainsi protéger sur une plus grande surface ;

c) paratonnerres à cages maillées : dispositif consistant à réaliser un maillage autour du volume du bâtiment. Les conducteurs peuvent être équipés de pointes courtes sur les parties situées au sommet du bâtiment. Chaque conducteur de descente est relié à une prise de terre ;

d) paratonnerres à fils tendus : systèmes constitués d'un ou plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger. Cette méthode est utilisée en particulier pour la protection des lignes à haute tension des réseaux électriques.

La prise de terre permet dans le cadre d'un maillage des masses de fixer un potentiel invariable des appareils ou des éléments conducteurs, d'une manière générale d'écouler à la terre l'énergie.

Système parafoudres (protection des réseaux internes)

La condition nécessaire à l'obtention d'une bonne protection contre la foudre est l'*équipotentialité*, qui est un moyen fiable pour éviter les amorçages ou les destructions de matériels. Pour cela il est nécessaire de procéder à un maillage des masses, toutes les structures métalliques étant interconnectées grâce à ce maillage.

Cheminement des câbles : séparation des câbles protégés de ceux qui ne le sont pas.

Réduction des surfaces de boucle : malgré une bonne équipotentialité, il subsiste un risque de surtension du fait des champs magnétiques qui induisent des tensions dans toute boucle de conducteur électrique.

Le regroupement des équipements sensibles a son intérêt dans la gestion du risque.

Parafoudres : leur rôle est de limiter les surtensions transitoires à des valeurs non dangereuses pour le matériel et d'évacuer les courants de décharge vers la terre.

Protection associée aux risques de surtensions amenées par les réseaux externes

Les réseaux externes conducteurs ne véhiculant pas de l'énergie (tuyauteries métalliques) doivent être reliés au réseau de masse afin d'éviter les risques liés aux différences de potentiel.

Un retour d'expérience mondial

Expérimentations en laboratoire

Le développement des systèmes de protection foudre est validé par de nombreuses expérimentations en laboratoire.

Bien qu'il soit impossible de reproduire à l'identique l'ensemble du phénomène foudre, la combinaison de plusieurs laboratoires, de plusieurs générateurs et de différents modes opératoires permet d'approcher le phénomène et ainsi de soumettre les produits de protection aux contraintes de la foudre.

Ces expérimentations sont réalisées à l'aide :

- de générateurs de Marx délivrant de la très haute tension (jusqu'à 1MV) ;
- de générateurs de courant délivrant de très forts courants (jusqu'à 200 kA) ;
- de différentes plates-formes pouvant simuler le vent, les vibrations, la pluie, etc.

Les progrès de la science permettent de proposer des équipements de plus en plus puissants et adaptés à la reproduction du phénomène foudre. Les tests ainsi menés sont de plus en plus pertinents et leur éventuelle remise en cause du fait qu'ils seraient trop éloignés de la réalité du phénomène foudre n'est plus justifiée.

Tests in situ

Les professionnels de la foudre ont depuis de nombreuses années mis en place des tests in situ sur l'ensemble du globe. Ces tests permettent de confronter les paratonnerres à des sites exposés à la foudre dans diverses conditions climatiques et environnementales.

La filière foudre française s'est même organisée de façon à proposer un protocole de test commun permettant de démontrer l'efficacité de sa technologie de produits. Plusieurs sites expérimentaux sont ainsi implantés à des endroits fortement impactés par les décharges nuage-sol. Les résultats obtenus devraient être publiés prochainement.

La législation française

La normalisation

En France, la protection foudre est régie par différentes normes et guides.

L'organisme officiel s'occupant de la normalisation est l'AFNOR.

Les documents disponibles sont classés selon différentes rubriques :

- normes d'analyse du risque foudre ;
- normes « produits », définissant les exigences du matériel de protection foudre ;
- normes d'installation, définissant les règles de mise en œuvre des protections ;
- guides pratiques.

Les normes d'analyses du risque sont au nombre de deux :

- NFC 17-102 : systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage ;
- NF EN 62305-2 : protection contre la foudre (partie 2) : évaluation des risques.

Les normes d'installation applicables en France sont au nombre de trois :

- NFC 17-102 : systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage ;
- NF EN 62305-3 : protection contre la foudre (partie 3) : dommages physiques sur les structures et risques humains ;
- NFC 15-100 : installations électriques à basse tension.

Les normes produits applicables pour les industriels concepteurs de solutions sont les suivantes :

- NFC 17-102 ;
- série des NF EN 62561 (sept volumes) ;
- série des NF 61643 ;
- norme IEC 62593.

Quelques guides pratiques existent également permettant de décrire à l'aide d'exemples certaines normes d'installation ou d'analyse de risque.

Certifications et exigences

La France a été parmi les premières nations dans le monde à structurer et imposer des exigences et un système de certification pour les professionnels de la foudre. C'est ainsi qu'en 2001, la certification Qualifoudre a été validée par le ministère chargé de l'environnement.

ment au travers de la mise en œuvre d'un référentiel par l'INERIS.

Cette certification a permis une professionnalisation du métier et permet de garantir une expertise et un savoir-faire des entreprises certifiées, sur la base d'un référentiel en maintenance continue.

La réglementation française

Divers arrêtés obligent à la mise en place de protections foudre ou la réalisation d'une étude de vulnérabilité du site.

Les sites industriels classés ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement), soumis à l'arrêté du 4 Octobre 2010 modifié, ont l'obligation de réaliser :

- une analyse du risque foudre (ARF) pour évaluer la vulnérabilité à la foudre ;
- une étude technique foudre (ETF) si le site est vulnérable au sens de l'ARF ;
- l'installation des systèmes de protections foudre prescrits par l'ETF ;
- la vérification de l'installation par un organisme indépendant.

L'arrêté du 30 décembre 2011 concernant les immeubles de grande hauteur (IGH) impose la mise d'une protection par paratonnerre sur ce type de bâtiment.

L'arrêté ERP (établissement recevant du public) du 21 juin 1980 modifié, impose la mise en place de protection paratonnerre sur certains sites :

- les refuges d'altitude ;
- les restaurants d'altitude.

La circulaire interministérielle du 22 février 2016 confirme et clarifie ces différents arrêtés, élargissant la prescription du PDA, et les rassemble en un seul document.

Réalisations originales françaises

En tant que leaders mondiaux dans la protection foudre, les produits français protègent de nombreux sites dans

le monde. L'expertise et le savoir-faire français contribuent à la protection des biens et des personnes et cela dans des domaines très variés tels que :

- transports (aéroports, ponts, bateaux...);
- loisirs et zones ouvertes (golf, parcs d'attraction, stades, ...);
- protection civile ou militaire (dépôts de munition, armées, gendarmeries...);
- énergies, environnement (centrales nucléaires, installations photovoltaïques, éoliennes...);
- télécommunications, transmissions de données (tours télécom, data centers...);
- industries, sites miniers, aérospatial, collectivités, hôtelleries et refuges ;
- monuments historiques (cathédrales, châteaux, temples...).

Il est à noter, que certains sites protégés sont remarquables et que certains systèmes de protection mis en place sont originaux et en marge des installations classiques.



Tour Eiffel

La Tour Eiffel est protégée contre les impacts de la foudre par un dispositif allant au-delà des exigences des normes.

Il est tout d'abord composé de plusieurs types de paratonnerres :

- 1 paratonnerre (PDA) au sommet ;
- 8 paratonnerres (PTS) en ceinture autour du 3^e étage ;

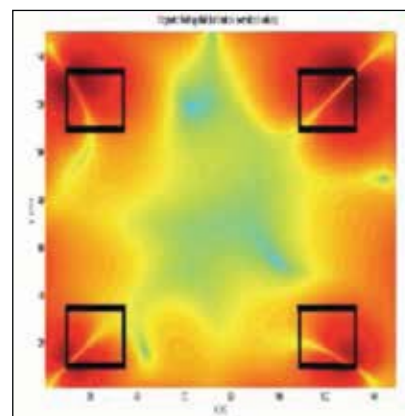


Figure 5 : Cartographie magnétique de la Tour Eiffel.

- la structure métallique en fer puddlé qui fait office de cage de Faraday.

Trois feuillards en cuivre de section supérieure à 200 mm² (bien au-delà des exigences normatives) sont installés dans trois des quatre arêtes de la Tour. Ces feuillards font office de conducteurs de descente. Leur très bonne conductivité ($\sigma = 9,93 \cdot 10^6$ S/m) permet d'écouler la très grande majorité du courant à la terre.

De plus, la structure et les conducteurs de descente sont reliés à quatre prises de terre au niveau des quatre piliers. Des liaisons équipotentielles relient les piliers entre eux et permettent ainsi d'éviter toute différence de potentiel et d'éventuelles remontées de terre parasites. Des parafoudres installés dans les différents TGBT viennent compléter la protection foudre.

Une étude numérique [4] sur la Tour Eiffel, via un logiciel en différence finie (FDTD), a permis de confirmer que la protection actuellement en place permet :

- un écoulement optimisé du courant de foudre ;
- une maîtrise du champ électromagnétique rayonné à l'intérieur de la Tour Eiffel.

La cartographie de la figure 5 montre le champ magnétique au niveau du sol entre les quatre piliers de la tour.

Pas de tir de Kourou

Les pas de tir de fusées à Kourou sont protégés de la foudre par des systèmes



Figure 6 : Protection anti-foudre du pas de tir de Kourou.

de fils tendus [3] permettant de couvrir la fusée contre les impacts sans être un obstacle à son décollage. A Kourou le choix s'est porté sur quatre poteaux formant un carré d'environ 30 mètres de côté (figure 6). Les quatre poteaux sont reliés entre eux à leur sommet via un câble tendu en acier, métal choisi en raison de sa bonne rigidité.

Afin de minimiser le champ magnétique rayonné et ainsi préserver l'intégrité du lanceur et l'électronique sensible présente sur le site, une attention particulière a été mise sur :

- la géométrie et la distance entre les pylônes ;
- l'impédance de connexion des fils entre les pylônes ;

- l'impédance des systèmes de prises de terre des pylônes.

Un système de prises de terre maillé est mis en place au niveau du sol (figure 7) de façon à parfaitement diffuser les surtensions dans le sol et participer ainsi à la réduction et la maîtrise des champs rayonnés entre le pas des mailles du réseau de terre.

Sites miniers au Pérou

Les risques liés à la foudre dans une mine sont d'une part les tensions de contact auxquelles sont exposés les travailleurs, d'autre part le phénomène d'ignition du méthane, ou coup de grisou, qui peut provoquer une explosion. C'est pourquoi la protection foudre des mines requiert une prise en compte particulière des différences de potentiel pouvant être générées, ainsi que du chemin d'évacuation du courant de foudre (figure 8).

Pour le design des protections, il faut tenir compte des points d'entrée possibles du courant de foudre dans la mine :

- conduction via le sol ;
- transfert direct par des conducteurs (enveloppe des puits de forage par exemple) ;
- décharge corona d'un conducteur ;
- couplage magnétique résultant de surtensions induites.

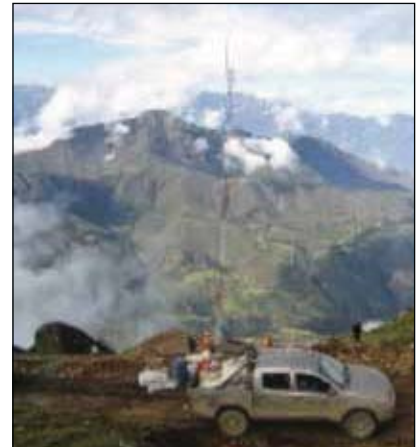


Figure 8 : Protection foudre d'un site minier au Pérou.

La protection foudre des mines de cuivre d'Arequipa au Pérou est réalisée de façon à limiter les courants conduits et induits dans les puits de forage, dans les souterrains et en particulier dans les galeries d'extraction.

Pour cela, la protection mise en place repose sur le positionnement des paratonnerres, la zone d'écoulement du courant et le contrôle des différences de potentiel. L'ossature métallique de soutènement des galeries est reliée mais de façon indirecte (via des éclateurs d'équipotentialité) aux réseaux des terres foudre.

Navire câblier

Le navire câblier Deep Pioneer est protégé contre les impacts directs de la foudre via un paratonnerre de type

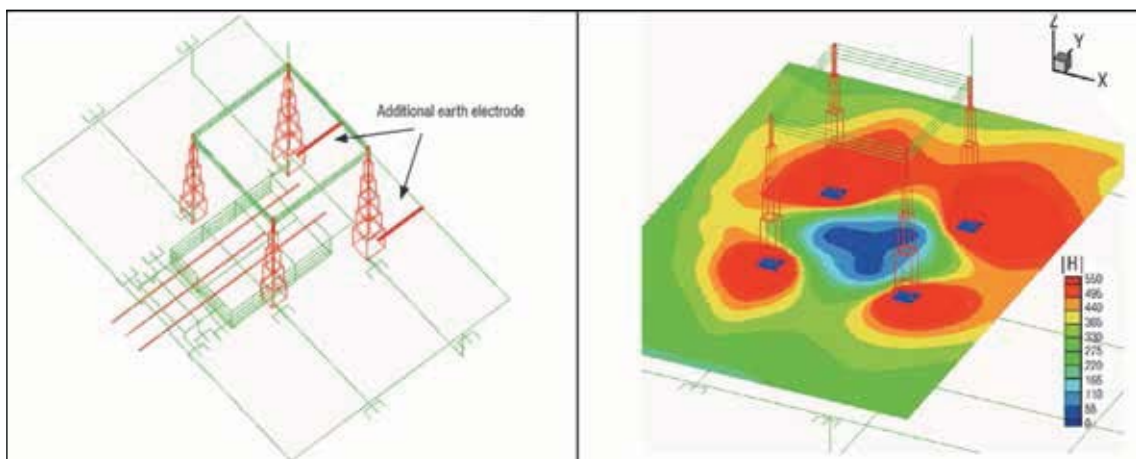


Figure 7 : Système de maillage des prises de terre et cartographie magnétique associée.



Figure 9 : Protection anti-foudre d'un navire câblé.

PDA installé sur la tour et relié à la quille métallique permettant d'évacuer le courant dans l'eau (figure 9). Afin de localiser le courant majoritairement sur un chemin, un conducteur de descente en cuivre assure cette liaison. La différence de conductivité entre l'acier ($\sigma = 9,93 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) et le cuivre ($\sigma = 59,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) permet une répartition en pourcentage du courant de foudre de l'ordre de 80/20.

Tendances et évolution de la protection foudre

Impact du réchauffement climatique

Des études récentes [5] prévoient une accentuation du phénomène foudre d'ici la fin du siècle. En effet, la fréquence des orages va augmenter en raison du réchauffement climatique. Ces orages feront plus de victimes et occasionneront davantage de dégâts ou de feux de forêt. Le réchauffement climatique implique une augmentation du taux de vapeur d'eau dans l'atmosphère alimentant le mouvement des courants d'air chaud. L'augmentation de ces courants d'air chaud vers les masses d'air froides piégées dans les nuages va provoquer un accroissement de la quantité de charges électriques dans les cumulo-nimbus. Les chercheurs ayant réalisé cette étude, estiment que pour un degré de réchauffement climatique, la Terre sera frappée par 12 % d'éclairs nuage-sol en plus. Il est ainsi estimé que d'ici la fin du siècle, il se produira environ 50 % d'éclairs en plus sur Terre.

Épuisement des matières premières (quid des ressources ?)

Les systèmes de protection foudre sont consommateurs d'énergies fossiles et de matières premières telles que le cuivre ou le fer. L'épuisement des ressources doit amener les professionnels de la foudre et les exploitants de sites à protéger à privilégier des systèmes de protection écologiques et moins consommateurs en ressources. A ce jour, les systèmes de protection par PDA sont reconnus comme des systèmes plus respectueux de l'environnement car moins consommateurs de matières premières.

Quel est le futur du phénomène foudre et comment y répond-on ?

Le réchauffement climatique et l'épuisement des matières premières amènent à se poser de façon urgente la question fondamentale de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et donc du choix de la technologie la moins carbonée, lorsque cela est possible.

Si plusieurs solutions, comme mentionné ci-dessus, sont envisageables, la technologie PDA recouvre une bonne majorité d'entre elles et s'inscrit dans le schéma de réduction des GES avec un niveau de création de gaz très faible. Les professionnels de la foudre qui n'ont pas déjà pris une orientation de politique économe en énergies fossiles et en matières premières, vont devoir s'y pencher.

De plus, le développement de nouveaux produits ou systèmes de protec-

LES AUTEURS

De formation Essec et Droit international, conférencière à l'IHEDN et Conseillère nationale du commerce extérieur, au terme d'une expérience de 20 ans dans l'industrie technique, **ELYSABETH BÉNALI-LÉONARD** est par ailleurs membre expert de l'UF 81 (thématique foudre) et présidente de France Paratonnerres. Membre du Groupe de travail sur le référentiel Qualifoudre, présidente de la Division D 84 au GIMELEC, coordonnant le sujet stratégique foudre pour la filière industrielle française.

MICHAEL TROUBAT est docteur en électronique des hautes fréquences de l'université de Limoges. A la suite de son doctorat, il a réalisé une spécialisation postdoctorale dans la thématique de la foudre et en particulier dans la protection. Il travaille actuellement chez France Paratonnerres en tant que responsable R&D où il développe des produits innovants. Il est expert dans le domaine de la foudre et participe au sein des commissions normatives aux évolutions des normes de protection. Son expérience et son expertise lui permettent de solutionner des problématiques complexes de protection contre la foudre tout en adaptant la solution aux particularités.

tion foudre plus robustes semble être un enjeu en raison de l'accroissement annoncé du nombre d'éclairs nuage-sol dans les années à venir.

Références

- [1] Etude annuelle (2010) du National Safety Council américain intitulée Injury Facts
- [2] R. I. Albrecht et al., Where Are the Lightning Hotspots on Earth, BAMS Journal, November 2016, pp. 2051-2068.
- [3] F. Isaac et al., Space Launching Site Protection against Lightning Hazards, Journal Aerospacelab, Issue 5, December 2012.
- [4] M. Troubat and E. Perrin, From the importance of equipotentiality in a lightning protection system, 2nd ISLP, Aurillac, 10-11 Mai 2017.
- [5] D. M. Roms et al., Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming, Science 14 Nov 2014: Vol. 346, Issue 6211, pp. 851-854.