

Protection contre la foudre des structures et zones urbanisées

Mon étude porte sur le comportement de la foudre et des différents dispositifs de protection existants. J'ai été séduit par ce sujet car la compréhension des phénomènes liés à la foudre donne lieu à des problématiques très concrètes comme la protection de zones urbaines face aux dangers de la foudre.

La foudre constitue une réelle menace dont il est impossible de s'affranchir, mais dont les risques peuvent être considérablement réduits. En effet, l'étude approfondie du phénomène et le développement de paratonnerre permettent à ce jour d'assurer la protection de bâtiments dans divers contextes, notamment dans le cadre de la ville.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Paratonnerre à tige simple (PTS)</i>	<i>Lightning rod</i>
<i>Paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA)</i>	<i>Early streamer lightning rod</i>
<i>Effet de Pointe</i>	<i>Lightning rod effect</i>
<i>Traceur</i>	<i>Lightning leader</i>
<i>Rayon de protection</i>	<i>Lightning protective radius</i>

Bibliographie commentée

Durant la formation d'un nuage d'orage, de grandes quantités de charges électriques sont produites et tendent à polariser le nuage. La base du nuage se retrouve la plupart du temps chargée négativement et la terre chargée positivement par influence [1].

La formation d'un coup de foudre naît d'un premier canal d'air ionisé appelé précurseur, se formant directement à la base du nuage. Suivant l'apparition du précurseur, on observe sa ramification progressive en différents **traceurs** descendants se propageant vers le sol [2]. La présence de ces traceurs provoque lors des dernières centaines de mètres une forte augmentation du champ électrique au sol. On observe alors l'ionisation de l'air au niveau des proéminences du sol [3] puis le développement de traceurs ascendants.

Une compétition entre ces traceurs s'engage alors, en direction du traceur descendant. Lorsque la liaison s'établit entre deux traceurs, une partie des charges du nuage s'écoule dans la terre, c'est le coup de foudre.

Bien que la durée d'un coup de foudre soit courte, son énergie est suffisante pour provoquer un incendie, endommager des structures à risques ou tuer un homme [4]. L'observation du phénomène et le retour d'expérience ont permis de noter que les lieux d'impacts privilégiés sont les proéminences plus ou moins pointues (*arbre, clocher d'église, etc*).

Cette prédisposition des objets effilés à être frappés par la foudre s'explique par l'**effet de pointe** [5], phénomène à la base des paratonnerres. Ces observations ont permis de développer des dispositifs de protections qui reposent sur le principe de capter et canaliser la foudre plutôt que de vouloir s'y soustraire. Le principe est donc de favoriser un lieu d'impact et canaliser le courant à l'extérieur de la zone à protéger, la solution la plus répandue étant de le diffuser dans le sol à l'aide d'un raccordement à la terre.

Il existe deux types de paratonnerres : les premiers appelés **PTS** (*Paratonnerre à Tige Simple*) sont des dispositifs passifs composés d'une simple pointe métallique effilée. Leur architecture favorise l'effet de pointe et augmente fortement le développement de traceurs ascendants.

L'étude de la foudre révèle cependant l'existence de phénomènes précurseurs annonçant un coup de foudre imminent. En effet, l'accroissement brutal du champ électrique et l'ionisation de l'air autour des objets au sol font partie des signes annonciateurs d'un coup de foudre. Ces observations conduisent alors à développer un modèle de paratonnerre capable de détecter ces phénomènes et donc de générer un traceur ascendant plus rapidement qu'un simple paratonnerre.

Ces paratonnerres actifs sont appelés **PDA** [6] (*Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage*). Ils possèdent les mêmes caractéristiques qu'un PTS à l'exception de la partie active qui permet une augmentation artificielle du champ électrique au niveau de la pointe lors d'un orage. Ce dispositif permet de générer un traceur ascendant avant les objets à proximité et donc de capter la foudre sur une plus grande distance.

Vient alors la question de l'évaluation de la protection fournie par un PTS ou un PDA contre la foudre [7]. Il faut garder à l'esprit que ce phénomène naturel n'est que partiellement maîtrisé. Il y a plusieurs raisons à cela, en particulier : la complexité du phénomène, son caractère aléatoire et l'importante quantité d'énergie mise en jeu pendant un temps très court.

Néanmoins, il est possible de donner une estimation de l'efficacité d'un dispositif de capture, notamment grâce au modèle électrogéométrique [8]. Dans le cadre de ce modèle, tout se passe comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive de rayon D nommée « distance d'amorçage » dont le premier contact avec un objet ou un traceur ascendant établit

la jonction nuage-sol et détermine le point d'impact de la foudre.

On est alors capable de délimiter une région dans laquelle le paratonnerre est théoriquement le point d'impact de n'importe quel coup de foudre et l'estimation de cette zone fournit une caractéristique importante du paratonnerre qu'on appelle son **rayon de protection**.

Problématique retenue

L'étude traitera les problématiques suivantes :

- Comment modéliser numériquement les principaux phénomènes qui régissent le phénomène de foudre ?
- Comment utiliser ce modèle pour évaluer la protection fournie par un paratonnerre sur un bâtiment à géométrie simple ?
- Quelles applications concrètes du modèle peut-on proposer ?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif est de développer une modélisation numérique du phénomène de foudre capable d'évaluer le rayon de protection d'un PDA.

Les étapes permettant d'atteindre cet objectif sont les suivantes :

- détermination du cadre de la simulation et des modèles physiques utilisés
- simulation d'un coup de foudre
- application au cas d'une structure munie d'un PTS
- élaboration d'un dispositif expérimental permettant de vérifier les rayons de protection fournis par notre modèle
- dimensionnement et construction de la maquette
- validation expérimentale
- application au cas d'un PDA en implémentant le principe d'avance à l'amorçage
- application concrète du modèle

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] VINCENT PIRCHER ET JEAN-LUC CHÈZE : Electricité atmosphérique et systèmes orageux : DOI : [10.4267/2042/53376](https://doi.org/10.4267/2042/53376)

[2] US NATIONAL WEATHER SERVICE : Understanding Lightning : Initiation of a Stepped Leader : <https://www.weather.gov/safety/lightning-science-initiation-stepped-leader>

[3] EPFL : Effet couronne : <https://auditoires-physique.epfl.ch/experiment/535/effet-corona>

[4] INERIS - P.GRUET - BERNARD PIQUETTE : Protection contre la foudre : <https://www.ineris.fr/fr/omega-3-protection-contre-foudre-installations-classees-protection-environnement>

[5] EPFL : Effet de pointe : <https://auditoires-physique.epfl.ch/experiment/484/effet-de-pointe-flamme#wrapper>

[6] INERIS - OLIVIER HYVERNAGE - DOMINIQUE CHARPENTIER : Evaluation des technologies des paratonnerres à dispositif d'amorçage : <https://www.ineris.fr/fr/evaluation-technologies-paratonnerres-dispositif-amorçage>

[7] AFNOR : Protection contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage : *NF C 17 102*

[8] BENOÎT DE METZ-NOBLAT : La foudre et les installations électriques HT : *Cahier Technique Merlin Gerin n° 168*

Références bibliographiques (ÉTAPE 2)

[1] GUO, J., ET AL. : A three-dimensional direct lightning strike model for lightning protection of the substation : *IET Gener. Transm. Distrib.* 15, 2760–2772 (2021). <https://doi.org/10.1049/gtd2.12213>

[2] RIOUSSET, J.A., PASKO, V.P., KREHBIEL, P.R., THOMAS, R.J., RISON, W. : Three-Dimensional Fractal Modeling of Intracloud Lightning Discharge in a New Mexico Thunderstorm and Comparison With Lightning Mapping Observations : https://www.researchgate.net/publication/234347524_Three-Dimensional_Fractal_Modeling_of_Intracloud_Lightning_Discharge_in_a_New_Mexico_Thu

[3] ALEXIOS I. IOANNIDIS, ZACHARIAS G. DATSIOS, GEORGIOS A. TSAOUSAKIS, THOMAS E. TSOVILIS : Analysis of the Fractal Dimension of Lightning Discharges based on a Stochastic Lightning Attachment Simulation Model : https://www.researchgate.net/publication/364587069_Analysis_of_the_Fractal_Dimension_of_Lightning_Discharges_based_on_a_Sto

[4] SIGOGNE CHARLY : Contribution à l'analyse de l'évaluation du risque de foudroiement d'un site. Application au pic du midi de Bigorre : <https://www.theses.fr/2014PAUU3039>

DOT

[1] : Février-Mars 2022 : Recherches bibliographiques sur l'effet de pointe, la foudre et les paratonnerres. Appropriation des notions relatives à l'étude de la foudre. Choix de la problématique et délimitation du cadre du TIPE.

[2] : Avril-Mai 2022 : Mise en équations du problème et première implémentation Python, calcul du potentiel électrique par résolution de l'équation de Laplace à l'aide de la méthode de JACOBI et détermination du champ électrique grâce à une approximation discrète du gradient.

[3] : Juin-Août 2022 : Recherches complémentaires et appropriation de la norme AFNOR NFC 17 102 portant sur les paratonnerres et le modèle de la sphère fictive. Lecture de thèses et d'études sur la propagation de la foudre qui s'avère être difficile à modéliser par un modèle déterministe. Choix d'un modèle fractal de foudre bidimensionnel qui reproduit la tortuosité et la ramification naturelle de la foudre afin de prendre en considération le caractère aléatoire du processus de propagation de la foudre.

[4] : Août 2022 : Premier contact avec le laboratoire Ampère à Écully (Mr Eric Vagnon), matériels nécessaires, temps disponible, faisabilité des expériences et validation du protocole permettant de vérifier la cohérence du futur modèle.

[5] : *Septembre-Novembre 2022 : Implémentation sous Python du modèle bidimensionnel de coup de foudre qui permet la simulation de la propagation d'un traceur ascendant et donc l'estimation du rayon de protection d'un paratonnerre grâce à la simulation d'un grand nombre de coups de foudre.*

[6] : *Décembre-Janvier 2022/2023 : L'augmentation de la résolution de la simulation pose des problèmes de complexité temporelle qui ont pu être réglés grâce au raffinement de la méthode de convergence, à l'implémentation de la méthode de GAUSS SEIDEL plutôt que celle de JACOBI et à la conversion du code initialement écrit en Python vers le langage informatique Cython.*

[7] : *Février-Avril 2023 : Construction de la maquette, présentation de la maquette et premier test au laboratoire. Expérience au Laboratoire Ampère : mise en place du protocole expérimentale qui repose sur une estimation de la densité de foudroiement autour de la maquette. Confrontation des résultats de la modélisation avec ceux obtenus au laboratoire qui mène à une première validation de la cohérence du modèle. Recherche de structures simples déjà protégées par un paratonnerre dont les caractéristiques sont connues afin de pouvoir tester la pertinence du modèle en situation réelle.*

[8] : *Mai-Juin 2023 : Modification du programme réalisé précédemment pour l'adapter à la simulation d'un PDA. Application au PDA présent sur le gymnase du lycée. Contact avec la société INDELEC qui est en charge du projet de protection contre la foudre de la cathédrale de GAP. Simulation du PDA présent au sommet de la cathédrale. Comparaison des rayons de protection estimés par ma simulation et ceux fournis par les constructeurs.*