



Etude du foudroiement du Pic du Midi de Bigorre

Charly Sigogne

► To cite this version:

Charly Sigogne. Etude du foudroiement du Pic du Midi de Bigorre. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083924

HAL Id: hal-01083924

<https://hal.science/hal-01083924>

Submitted on 18 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du foudrolement du Pic du Midi de Bigorre

Charly SIGOGNE

Laboratoire SIAME – Equipe Génie Electrique

Université de Pau, 64000 PAU, FRANCE

charly.sigogne@univ-pau.fr

RESUME – L’objectif du travail est l’étude du phénomène d’attachement de la foudre en altitude. A cet effet, une station d’instrumentation a été installée au sommet du Pic du Midi de Bigorre pour observer l’attachement de la foudre à un paratonnerre instrumenté et réaliser des mesures directes du courant de foudre et du champ électrique atmosphérique. En particulier, un ensemble de caméras vidéo est utilisé pour l’analyse de la propagation des éclairs. Parallèlement, un modèle électrogeométrique en 3-dimensions a été développé pour permettre d’évaluer des probabilités d’impact sur le site.

ABSTRACT – The aim of this work is the study of the attachment phenomenon of lightning in mountain. To this end, an instrumentation station was installed at the top of the Pic du Midi de Bigorre to observe the lightning attachment to a lightning rod instrumented and make direct measurements of the lightning current and the atmospheric electric field. In particular, a set of video cameras is used for analyzing the lightning propagation. Meanwhile, a 3-dimensional electrogeometric model was developed to allow assessment of the impact probabilities on the site.

MOTS-CLES – Foudre, structures élevées, modèle électrogeométrique, probabilités d’impact.

1. Introduction

Un coup de foudre débute toujours par la formation d’une pré-décharge peu lumineuse, appelée traceur. Cette pré-décharge s’initie, soit au sein du nuage et se propage vers le sol, soit au niveau de protubérances au sol et se propage vers le nuage. Dans les deux cas, tout se passe comme si le canal ainsi formait, créait un court-circuit entre le nuage et le sol, permettant ainsi l’écoulement d’un courant de forte intensité : c’est l’arc en retour. Plusieurs décharges peuvent ensuite se développer dans ce canal : on parle alors d’arcs subséquents. Le phénomène composé de l’arc en retour et des arcs subséquents est appelé flash [1].

La foudre peut être étudiée à travers différents types d’expérimentations, allant des tests en laboratoire haute tension à des observations et des mesures dans la nature. Bien que longues et difficiles, seules les études en conditions naturelles permettent d’appréhender tous les phénomènes liés à un coup de foudre. En France, la densité de foudrolement est généralement faible. Cependant, une analyse globale des données fournies par Météorage, l’opérateur du réseau de détection foudre français, a mis en avant un site intéressant au Pic du Midi de Bigorre, situé dans les Pyrénées [2]. Ce site, à une altitude d’environ 3000m, est occupé par un observatoire astronomique, une antenne de Télé Diffusion de France (TDF) d’une hauteur de 100m et de plusieurs bâtiments intermédiaires (Figure 1).

Afin d’étudier le phénomène de capture de la foudre par un dispositif de protection, un paratonnerre instrumenté et divers moyens de diagnostic y ont été installés. Le paratonnerre d’une hauteur de 5 mètres a été installé sur une plateforme expérimentale nommée la plate-forme DIMM, elle-même située à environ à 150 m de l’antenne TDF. Parallèlement, plusieurs caméras ont été placées sur le site pour y localiser les divers coups de foudre. Sur la prise de vue aérienne du Pic du Midi présentée à la Figure 1, sont ainsi indiqués les deux sites accueillant l’expérimentation : le local TDF à gauche et la plateforme DIMM à droite.

2. Présentation des moyens expérimentaux

L’ensemble des instruments de mesure installés sur le site permet d’enregistrer simultanément les principaux paramètres caractéristiques d’un flash, tels que le courant de foudre écoulé par le paratonnerre, les variations des champs électriques statique et dynamique au sol et le développement spatial des éclairs obtenu grâce à des enregistrements vidéo. L’ensemble du système est illustré avec ces connections par la Figure 2.

2.1 Mesure du courant de foudre

Bien que l’on ait déjà observé de par le monde des courants de foudre pouvant atteindre quelques centaines de kA. D’après les données Météorage, les courants détectés au Pic du Midi et donc susceptibles d’être capturés par le paratonnerre ne sont que de l’ordre de la dizaine de kA. Le temps de montée d’une impulsion de courant de foudre est typiquement de l’ordre de quelques microsecondes et sa durée de l’ordre de quelques centaines de microsecondes.

Le courant de foudre écoulé par le paratonnerre est donc mesuré en utilisant une sonde de Rogowski placée à la base du paratonnerre. Cette sonde supporte un courant maximum de ± 200 kA, avec des fronts de montée allant jusqu'à 100 ns. Le rapport de division de la chaîne de mesure est de 0,5 mV/A. Par ailleurs, lorsqu'un orage frappe le site et notamment l'antenne TDF, des leaders ascendants peuvent être émis par le paratonnerre de la plate-forme DIMM. Dans ce cas, les courants en jeu sont de l'ordre de quelques dizaines d'ampères ou même de l'ordre du kA [3]. La sonde décrite précédemment n'est donc plus adaptée pour cette gamme d'impulsions. Pour cette raison, une seconde chaîne de mesure a été installée autour du paratonnerre. Cette sonde, de Rogowski possède un rapport de transformation de 10 mV/A et une bande passante allant de 0,25 Hz à 4 MHz. La tension d'entrée de la chaîne d'acquisition étant limitée à ± 10 V, le courant maximum qui peut être mesurée est ± 1 kA. Au-delà de cette valeur, la mesure est enregistrée par la première sonde de courant (± 200 kA max). Par sécurité et pour empêcher l'écoulement d'un courant de foudre à l'intérieur des bâtiments, les signaux issus de ces chaînes de mesure sont transmis au système d'acquisition par l'intermédiaire d'une fibre optique.

2.2 Mesure des variations de champ électrique

Parallèlement à la mesure de courant qui est très localisée, l'enregistrement du champ électrique local est un paramètre qui fournit des informations complémentaires pour une meilleure compréhension du mécanisme d'attachement de la foudre. Ainsi, plusieurs capteurs de champ électrique, ont été déployés sur le site.

Par beau temps, la valeur du champ électrique statique est de l'ordre de la centaine de V/m. A l'approche d'un orage, cette grandeur s'inverse et les variations peuvent atteindre plusieurs dizaines de kV/m [4]. Sur le site, les variations du champ électrique statique sont mesurées à l'aide d'un moulin à champ installé sur la plate-forme DIMM. Cet appareil mesure en continu les variations lentes du champ électrique liées à l'approche des charges contenues dans un nuage orageux. Il informe ainsi de l'arrivée d'un orage. Cependant, avec un échantillonnage de 1 Hz, cet appareil ne permet pas d'enregistrer les variations rapides du champ électrique liées à des impacts de foudre. Pour étudier ces variations rapides, deux antennes capacitives ont donc dû être conçues et installées sur le site.

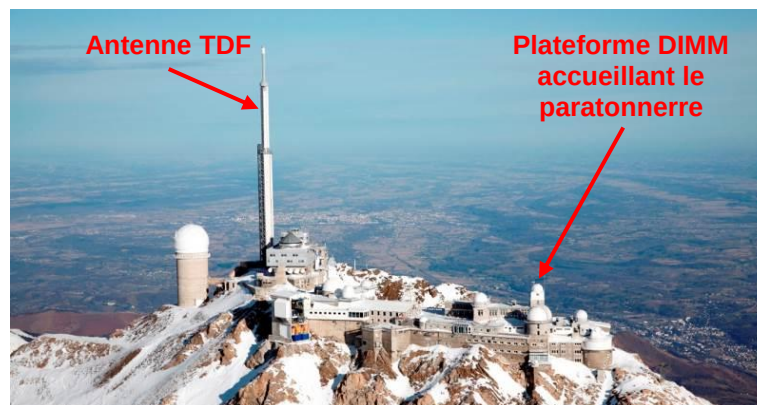


Figure 1 : Vue aérienne du sommet du Pic du Midi de Bigorre

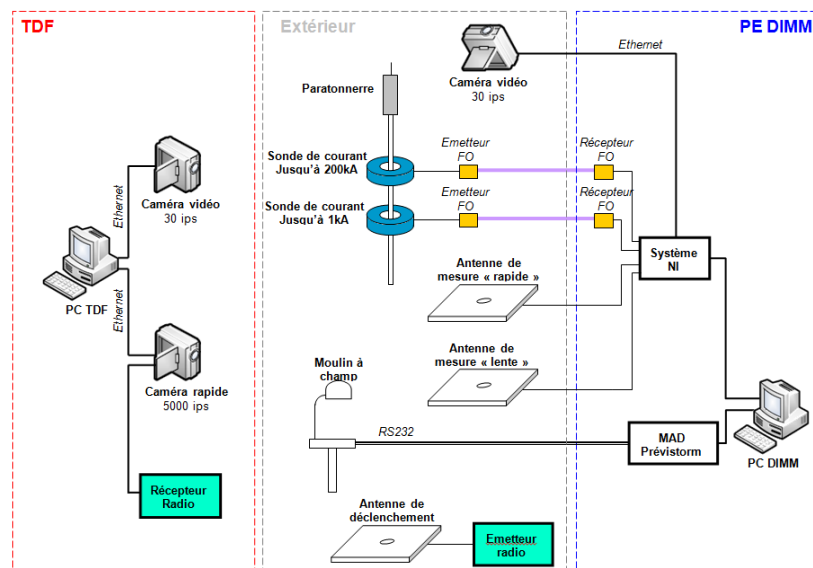


Figure 2 : Schéma des équipements composant l'expérimentation

Le principe de fonctionnement d'une antenne capacitive est basé sur la capture de charges électriques par une électrode. A partir de la densité de courant écoulee à travers cette électrode, il est possible d'en déduire les variations rapides du champ électrique. Une électronique de mise en forme adaptée peut fournir une réponse électrique $V_S(t)$ qui est directement proportionnelle à la composante normale du champ électrique $E_n(t)$, de telle sorte que:

$$V_S(t) = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{C_I} E_n(t) \quad [V] \quad (1)$$

Où A est la surface de l'électrode en m^2 et C_I la capacité d'intégration en Farad.

Le circuit électronique de mise en forme, connecté à l'antenne et présenté à la Figure 3, permet de régler le gain et les fréquences de coupure du dispositif de mesure du champ. Le dimensionnement de ce circuit est détaillé dans [5].

Comme évoqué précédemment, deux antennes capacitatives ont été installées sur le site. L'antenne dite « rapide » a été calibrée de manière à mesurer les variations du champ électrique associées à la propagation de leaders et au développement d'arcs en retour et dont la bande passante est comprise entre 500 Hz et 500 kHz et l'antenne dite « lente » a été développée afin de faire le lien entre l'antenne « rapide » et le moulin à champ. Sa bande passante est donc comprise entre 1 Hz et 500 Hz. Elle permet ainsi de mesurer les variations du champ électrique précédant l'arc en retour. Lors d'un orage, les variations de champ peuvent atteindre plusieurs dizaines de kV/m [6]. Les deux antennes capacitatives fournissent une tension de sortie de 1V pour une variation d'amplitude de champ de 10 kV/m, soit un gain de -80 dB.

Les bandes passantes et le gain de ces antennes ont été validés par des essais en laboratoire. Pour cela, des impulsions de champ électrique de quelques kV/m d'amplitude avec des temps de montée variables ont été générées et appliquées aux antennes. Pour ces essais, les fronts d'impulsion variaient de 150 ns à 3,8 s, pour balayer une gamme de fréquence allant de 0,092 Hz à 2,3 MHz et permettre de caractériser le comportement des deux antennes. Ainsi sur la Figure 4, les diagrammes de Bode expérimentaux des deux antennes sont comparés avec les simulations numériques obtenues à partir de circuits électroniques équivalents. La comparaison de ces diagrammes montre que, au-delà des fréquences de coupures, l'atténuation est plus importante expérimentalement qu'en simulation. Cet écart vient, probablement, du fait que le spectre fréquentiel des impulsions utilisées couvre une large bande de fréquences et non une fréquence unique (type Dirac). Hors bande passante des antennes, les fréquences composant l'impulsion sont donc plus ou moins atténuées par rapport à la fréquence caractéristique du front de l'impulsion. L'atténuation globale de l'impulsion s'en retrouve ainsi augmentée, ce qui a pour effet de resserrer la bande passante des antennes.

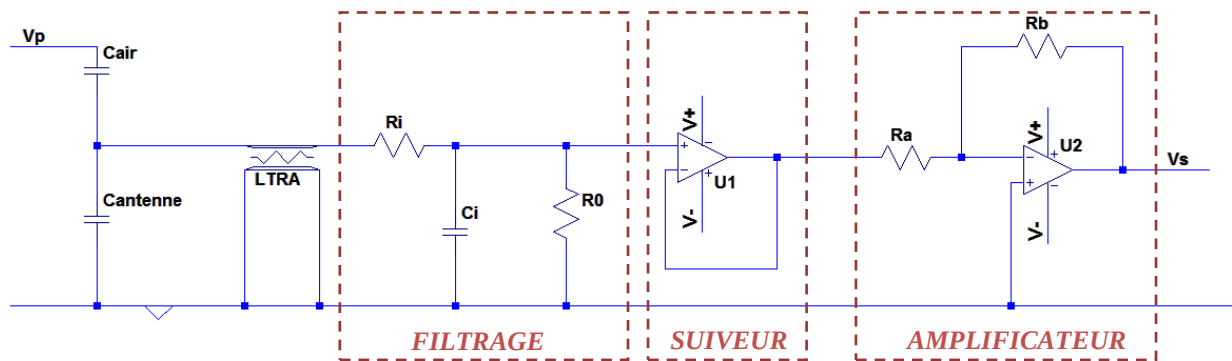


Figure 3 : Schéma électrique du circuit de mise en forme

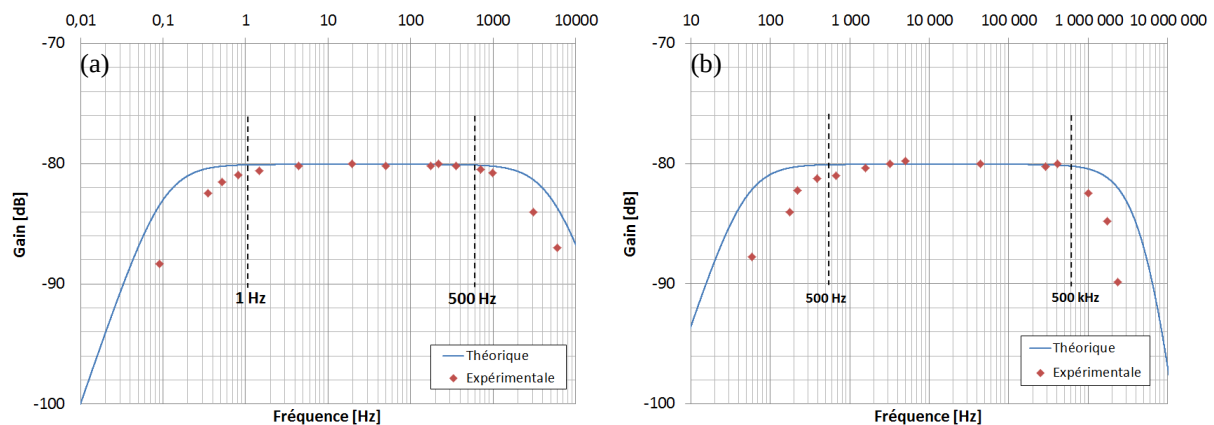


Figure 4 : Diagrammes de Bode théoriques et expérimentaux des antennes lente (a) et rapide (b)

2.3 Enregistrement vidéo

Afin de localiser les impacts frappant le Pic du Midi et d'étudier les phénomènes de capture de la foudre en altitude, un ensemble de caméras vidéo est installé sur le site. Cet ensemble comprend notamment : une caméra rapide et des caméras de vidéosurveillance.

La caméra rapide (Photron SA4) installée au pied de l'antenne TDF filme le paratonnerre et la zone de la plateforme DIMM. Grâce à sa vitesse d'acquisition élevée, cette caméra permet d'enregistrer le développement des traceurs, ascendant ou descendant, qui précèdent le phénomène d'interception et l'arc en retour. La vitesse d'acquisition de cette caméra est de 5000 images par seconde à la résolution maximale de 1024 x 800. Sa mémoire (32 Go) est suffisamment importante pour être en mesure d'enregistrer six flashes différents sans transfert de données. Une unité GPS connectée à la caméra fournit la référence de temps.

Deux caméras de vidéosurveillance fonctionnant en continu à une vitesse de 30 images par secondes, surveillent la totalité des bâtiments du Pic du Midi. Leurs enregistrements permettent de dater et de localiser précisément les impacts frappant l'ensemble du site. Elles permettent également de corréliser dans le temps les enregistrements de la caméra rapide. La première est installée dans le bâtiment TDF à proximité de la caméra rapide. Elle permet de surveiller la zone sud-est du site, et en particulier la plate-forme DIMM. L'autre caméra est fixée à la rambarde de cette plate-forme et balaye le nord-ouest du site afin de filmer les impacts frappant l'antenne TDF.

3. Mesures expérimentales

Bien que la saison orageuse ait commencé très tardivement [7], l'année 2013 a connu un taux de foudroiement très supérieur à la moyenne grâce notamment à un mois de Juillet exceptionnel [8][9] (près de 42000 événements relevés par Météorage dans un rayon de 50 km autour du Pic du Midi en 2013, pour une moyenne d'environ 24000 événements sur une période allant de janvier 2002 à octobre 2013). Sur le Pic du Midi, le nombre d'événement a plus que triplé en 2013 par rapport à la moyenne des douze dernières années (Données basées sur les relevés Météorage dans un rayon de 1 km autour du Pic du Midi sur une la même période). Grâce à une activité orageuse importante, un certain nombre d'enregistrements a été réalisé sur le site durant la campagne 2013. En particulier l'ensemble des relevés de mesure effectués le 7 septembre 2013, a permis d'obtenir les premiers éléments d'investigation expérimentale concernant un impact qui a frappé le Pic du Midi à 08:50:29. Ces résultats sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

3.1 Données du réseau de détection

Tout d'abord, pour chaque arc, Météorage fournit un certain nombre de données telles que la localisation (latitude, longitude), la datation (à la nanoseconde), l'intensité et la polarité du courant de l'arc, le front de montée et la durée d'impulsion ou encore le type de décharge (nuage-sol ou intra-nuages). D'après ces données, le flash du 7 septembre était composé de 9 arcs dont 6 nuage-sol et 3 intra-nuages (Figure 5).

3.2 Enregistrements vidéo

Grâce à l'enregistrement de la caméra de vidéo-surveillance installée sur la plateforme DIMM, le point d'impact de ce flash est clairement identifié sur le sommet de l'antenne TDF. Sur la première image de l'enregistrement (Figure 6.a), un traceur ascendant est émis à partir de la pointe de l'antenne. Sur les images suivantes (Figure 6.b, Figure 6.c, et Figure 6.d), différents canaux apparaissent et disparaissent successivement pendant plus de 300ms (arcs subséquents).

L'impact ayant frappé l'antenne TDF, aucune mesure de courant n'a été réalisée. En revanche, plusieurs mesures de champ électrique ont pu être enregistrées.

3.3 Mesures du champ électrique

Tout d'abord, le champ électrique statique a été enregistré par le moulin à champ. L'enregistrement sur 24h (Figure 7.a) montre le passage de trois cellules orageuses au cours de la journée. L'impact de 08:50:29 engendre une forte variation du champ électrique statique (Figure 7.b).

Une analyse plus fine des variations du champ électrique au moment de l'impact est possible grâce aux mesures des antennes capacitives. Les enregistrements de l'antenne « lente » et de l'antenne « rapide » sont présentés à la Figure 8. Sur ces deux graphiques, plusieurs pics « rapides » se succèdent pendant une durée de 500ms. Chaque pic correspond à un arc subséquent de l'impact.

3.4 Bilan de la campagne 2013

D'après les données Météorage, une centaine d'arcs ont été détectés dans un rayon d'un kilomètre autour du Pic du Midi durant cette campagne. Parmi ces événements, 15 impacts ont clairement été filmés sur l'antenne TDF grâce aux caméras de vidéosurveillance. D'autre part, plus d'un millier d'enregistrements ont été réalisés par les antennes capacitives pour des impacts allant jusqu'à 30km autour du site. En revanche, aucune mesure de courant n'a été effectuée.

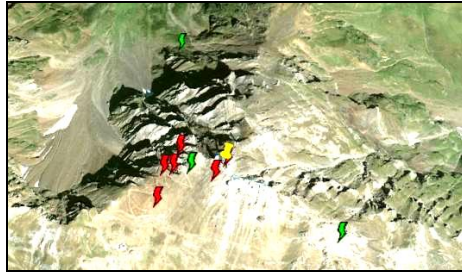


Figure 5 : Localisation par Météorage des différents arcs composant le flash du 07/09/2013

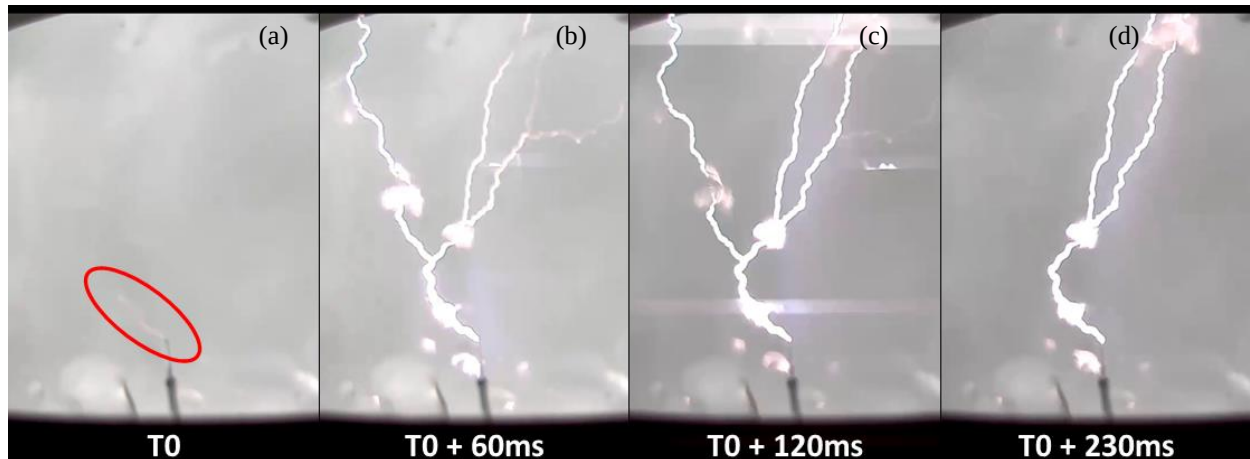


Figure 6 : Images de l'impact du 07/09/2013 sur l'antenne TDF, filmé par l'une des caméras de vidéosurveillance (30fps)

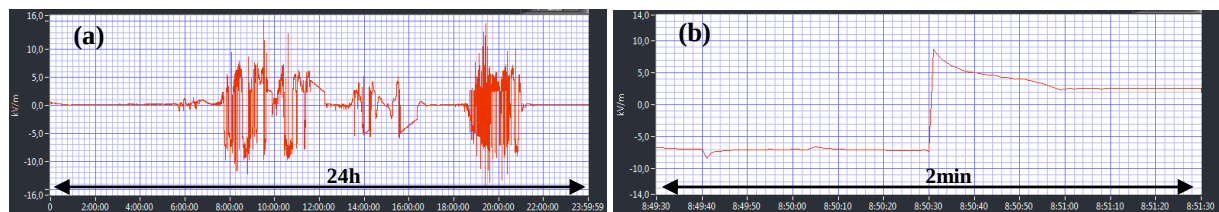


Figure 7 : Enregistrements par le moulin à champ du champ statique (a) de la journée du 07/09/2013 et (b) au moment de l'impact de 08:50:29

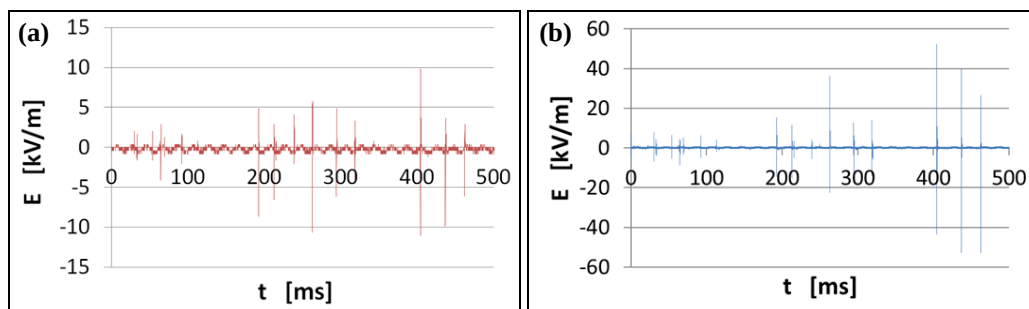


Figure 8 : Enregistrement de l'impact du 07/09/2013 par (a) l'antenne « lente » et (b) l'antenne « rapide »

Ces résultats semblent montrer qu'aucun coup de foudre ne s'est produit sur le paratonnerre. Cependant, des traces ont tout de même été observées sur la pointe du paratonnerre installé sur la plateforme DIMM. De telles traces nécessitant un courant important, le paratonnerre a certainement été frappé par un ou plusieurs arcs, bien qu'ils n'aient pas été détectés.

Concernant les enregistrements des antennes capacitatives, la synchronisation GPS du système d'acquisition permet de corréler précisément chaque arc apparaissant sur un enregistrement avec les données fournies par Météorage. En revanche, l'analyse des variations de champ au moment de l'arc est à améliorer. En effet, du fait que les mesures soient réalisées en champ proche, des parasites apparaissent sur les enregistrements. Pour pallier à ce problème, des

modifications vont être apportées à la chaîne de mesure, avec notamment l'installation de transmissions par fibre-optique entre les antennes et le système d'acquisition.

Par ailleurs, afin d'affiner les mesures expérimentales durant les prochaines campagnes, d'autres évolutions vont être apportées à l'ensemble de l'instrumentation. Tout d'abord, une nouvelle caméra rapide sera dirigée vers l'antenne TDF afin d'obtenir des enregistrements vidéo plus détaillés. Ensuite, une sonde de courant pourrait être placée autour de l'antenne TDF pour récupérer une image des courants qui sont écoulés par cette antenne. Enfin, une antenne « lente » sera installée à une dizaine de kilomètres du Pic du Midi dans le but d'enregistrer les variations du champ électrique correspondant à des impacts sur le site.

4. Evaluation de probabilités d'impact sur le site du Pic du Midi

Afin d'évaluer les probabilités d'impacts sur une structure, une méthode numérique, basée sur le modèle électrostatique, a été développée.

D'un point de vue historique, un modèle de foudroiement avait, à l'origine, été étudié pour la protection des lignes électriques, et notamment des lignes à très hautes tensions. Ce modèle, définissant en fonction du courant, une distance d'amorçage entre la tête du traceur descendant et le point d'impact, est appelé modèle électrostatique. Aujourd'hui, ce modèle est mis en œuvre pour la protection contre la foudre de structures diverses, par la méthode dite « méthode de la sphère roulante » [1]. Elle sert notamment de référence dans les normes de protection contre la foudre.

Cette méthode a été appliquée à une représentation en 3-dimensions du Pic du Midi. Le but est de mettre en évidence les zones vulnérables ou susceptibles de déclencher des traceurs ascendants ainsi que d'établir des probabilités d'impacts sur l'ensemble du site.

4.1 Modèle électrostatique et méthode de la sphère fictive

La description communément admise d'un flash descendant négatif est de considérer que la charge négative à la base du nuage induit un champ électrique entre le nuage et le sol suffisamment important pour initier le développement d'un leader descendant. En raison de la propagation de ce leader vers la terre, le champ électrique entre eux est amplifié. En approchant de la terre, le champ électrique devient si élevé que des leaders ascendants peuvent être générés à partir des protubérances au sol. Cette approche considère que la jonction entre les leaders descendant et ascendant se produit lorsque le champ atteint la valeur critique de 500 kV/m [1]. A cet instant, la distance entre la tête du leader descendant et le sol est définie comme la distance d'amorçage. La distance d'amorçage D est généralement déduite de résultats expérimentaux et obtenue à partir de la formule empirique suivante [10] :

$$D = A \times I_p^b \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Où D est exprimé en mètres, I_p est la valeur crête du courant du premier arc en retour en kiloampères et A et b sont des constantes. Pour ces deux constantes, la norme internationale de protection contre la foudre IEC62305 - 1 : 2006 recommande les valeurs suivantes : $A = 10$ et $b = 0,65$ [10].

Pour la protection de structures contre la foudre, le modèle électrostatique est mis en œuvre par la méthode de la sphère fictive. Une première hypothèse consiste à supposer les surfaces équipotentielles autour de la pointe du leader comme sphérique et non déformable. En second lieu, il est considéré que la distance d'amorçage est la même quelle que soit la nature et la forme de la structure au sol. Par conséquent, les points d'impact sont déterminés pour chaque objet de la structure à la distance d'amorçage D de la pointe du leader descendant, comme si elle était entourée par une sphère imaginaire de rayon $r_s = D$. Dans le cas d'une structure telle qu'un groupe de bâtiments, cette méthode est appliquée en faisant rouler la sphère sur le profil de la structure (Figure 9). Tous les points de cette structure en contact avec la sphère peuvent être frappés par la foudre. Inversement, les objets qui n'entrent pas en contact avec la sphère sont considérés comme protégés contre les flashes descendants négatifs dont l'intensité du courant est supérieure à I_p . En termes de protection contre la foudre, si la sphère est en contact avec un dispositif de protection sans toucher les objets, ceux-ci sont considérés comme protégés.

4.2 Méthode d'évaluation de probabilités d'impact

A partir de l'application de la méthode de la sphère fictive sur une structure, Lalande a calculé une surface effective de captation et déduit de la surface balayée par le centre de la sphère, la probabilité d'impact de foudre sur un aéronef [11]. Nous proposons d'appliquer la même méthode sur le profil relativement complexe de la structure de l'observatoire du Pic du Midi de Bigorre. L'objectif est de mettre en évidence les zones qui pourraient être frappées par la foudre et d'évaluer leur probabilité d'être frappé par rapport aux autres points de la structure.

Dans un problème 3D, la surface balayée par le centre de la sphère est construite par déplacement de la sphère roulante sur la structure dans les deux directions horizontales. Cette surface notée A_s correspond aux différentes positions de la pointe du leader négatif qui peuvent s'attacher à la structure, juste avant la jonction. Chaque point $C_s(i)$ de cette surface A_s correspond à une position "i" du centre de la sphère roulante $C_s(i)$ lorsque la sphère est en contact avec la structure.

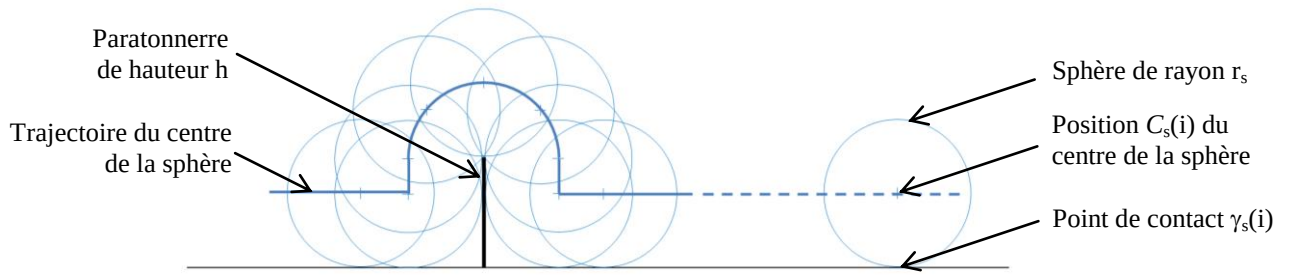


Figure 9 : Application de la méthode de la sphère roulante (Rayon r_s) à une pointe de hauteur h

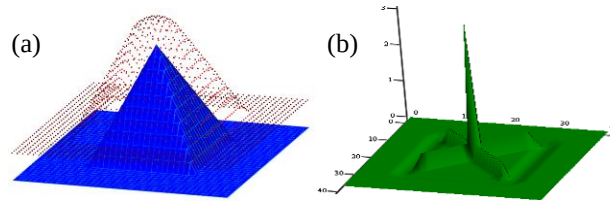


Figure 10 : Détermination de probabilités d'impact à partir de la méthode de la sphère roulante sur un profil pyramidale

Pour chaque position «i» de la sphère, ses points de contact $\gamma_s(i)$ peuvent être associés à son centre situé au point $C_s(i)$. Lorsque la sphère roulante se déplace sur une partie plate de la structure (par exemple le sol ou le toit plat d'un bâtiment), une position unique $C_s(i)$ du centre de la sphère roulante correspond seulement à un point de contact unique $\gamma_s(i)$. En revanche, dans le cas d'un point saillant (une pointe de paratonnerre ou un coin de bâtiment), lorsque la sphère roulante est en mouvement, la position de son centre $C_s(i)$ tourne autour de ce point saillant et dessine une portion de sphère $\alpha_s(i)$ autour de ce même point de contact $\gamma_s(i)$. Ainsi, pour un incrément donné utilisé pour balayer la zone de la structure, chaque point de contact $\gamma_s(i)$ peut être associé à un certain nombre $N_s(i)$ de différentes positions du centre de la sphère, avec laquelle il est en contact. En normalisant $N_s(i)$ (correspondant à la surface partielle $\alpha_s(i)$) associé à chaque point de contact $\gamma_s(i)$ par le nombre total de points N_{Ts} formant la surface totale A_s , il est possible d'établir une probabilité d'impact $P(i)$ pour chaque point de contact $\gamma_s(i)$, telle que :

$$P(i) = 100 \cdot \frac{N_s(i)}{N_{Ts}} = 100 \cdot \frac{\alpha_s(i)}{A_s} \quad [\%] \quad (3)$$

Dans le cas de la Figure 10, le profil testé correspond à une représentation 3D d'une forme pyramidale (Figure 10.a) auquel est appliquée la méthode de la sphère roulante. La trajectoire du centre de la sphère T_s est représentée par la surface pointillée. Le nombre $N_s(i)$ de positions du centre de la sphère fictive associé à chaque point de profil $\gamma_s(i)$ est représenté par la courbe de la Figure 10.b. Ainsi, on peut noter que le plus grand nombre de points associés N_{sMAX} correspond à la partie supérieure de la forme pyramidale. A l'inverse, une bande autour de la base de cette forme n'est associée à aucun point de la trajectoire. En effet, ici, le profil géométrique implique que la sphère roulante ne peut pas être en contact avec cette bande. Par conséquent, il correspond au volume protégé.

4.3 Application au Pic du Midi

Afin d'appliquer le modèle au site du Pic du Midi, un profil 3D a été réalisé (Fig.8.a). Il est composé d'une matrice de 520*250 cellules dont les dimensions représentent un carré de 50 cm de côté. La valeur de chaque cellule représente l'élévation de la structure.

La Figure 11 illustre les résultats obtenus par l'application de la méthode de la sphère roulante au profil du Pic du Midi. Une sphère dont le rayon est donné pour un pic de courant donné par l'équation (2), fournit la surface balayée par son centre (Figure 11.b). De cette surface sont déduites les probabilités d'impact sur l'ensemble du site (Figure 11.c). Comme l'on pouvait s'y attendre, la distribution de probabilité (Figure 11.c), présente deux pics principaux : le plus important correspond à la probabilité d'impact sur l'antenne TDF, le second correspond à celle sur le paratonnerre. En appliquant cette méthode au profil pour différentes valeurs de courant, une distribution de probabilité d'impact en fonction du courant peut être obtenue pour chaque point de ce profil.

Dans le cas du Pic du Midi, deux points de la structure sont spécifiquement étudiés : le sommet de l'antenne TDF et la pointe du paratonnerre de la plate-forme de DIMM. La Figure 12 donne les distributions de probabilités de ces deux protubérances pour des courants compris entre -2 kA et -50 kA. Il est à noter que les probabilités sont tracées pour des courants négatifs puisque la méthode de la sphère fictive, basée sur le modèle électrostatique, est définie essentiellement pour des coups descendants négatifs.

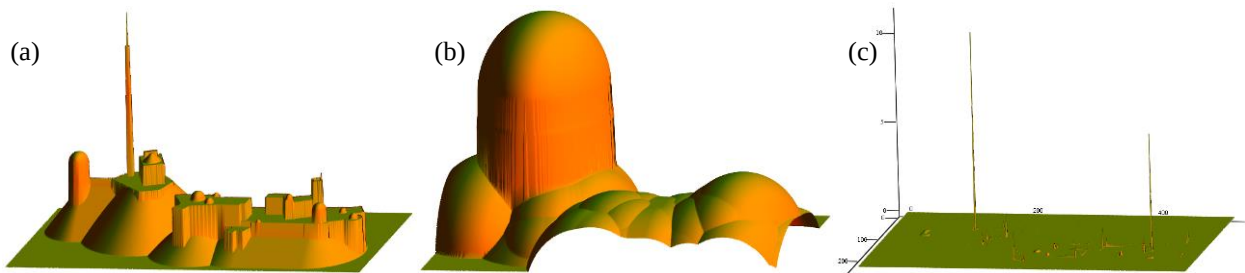


Figure 11 : Application de la méthode de la sphère roulante pour $I_p=10\text{kA}$: (a) représentation 3D du Pic du Midi, (b) surface balayée par le centre de la sphère roulante, (c) probabilités d'impact de chaque point du profil.

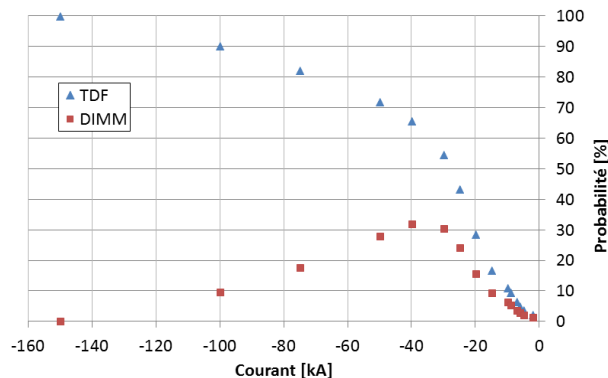


Figure 12 : Distribution des probabilités d'impact sur l'antenne TDF et le paratonnerre de la plateforme DIMM

D'après ces distributions, la probabilité d'impact sur l'antenne TDF et sur le paratonnerre est de quelques % pour de faibles valeurs de courant (respectivement 2,2 % et 1,5 % pour un courant de -2 kA). Sur l'antenne TDF, la probabilité augmente régulièrement avec le courant et atteint environ 70 % à -60 kA (triangles sur la Figure 12). Dans le cas du paratonnerre, jusqu'à -40 kA, la probabilité augmente également avec le courant (carrés). Au-delà de cette valeur, la probabilité diminue.

4.4 Discussion

Bien que nous nous soyons concentrés sur l'antenne TDF et le paratonnerre de la plateforme DIMM, la méthode présentée ici fournie, dans le cas de flashes descendants négatifs, une distribution de probabilités d'impact en fonction du courant (Figure 12), et pour n'importe quel point du site.

Cependant, pour des structures élevées en altitude (telles que le Pic du Midi), la part de flashes ascendants est bien souvent majoritaire devant celle des descendants. Une étude est donc en cours afin, d'une part, d'évaluer la proportion de flashes ascendants se produisant au Pic du Midi, et d'autre part, d'intégrer ce paramètre aux calculs de probabilités.

Un premier calcul, basée sur l'estimation de la hauteur effective de la structure [12], donne un pourcentage de 70% d'ascendants sur le nombre total de flashes se produisant sur le site. Ainsi, avec la prise en compte de cette valeur, une probabilité d'impact, indépendante du sens de propagation et de l'intensité du courant, est déduite. Pour l'antenne TDF, cette probabilité est de 75%. Dans le cas du paratonnerre de la plateforme DIMM, elle est de 3%. Ces premiers résultats semblent être en accord avec les observations réalisées sur le site puisque la majorité d'entre elles concernent des impacts sur l'antenne TDF.

5. Conclusion

Les travaux présentés dans ce papier visent à étudier le phénomène de capture de la foudre par un paratonnerre en conditions naturelles. A cet effet, sur le site du Pic du Midi de Bigorre, un ensemble de dispositifs expérimentaux a été mis en place. Les données recueillies, durant la campagne 2013, mettent en avant que l'antenne TDF capture une grande majorité des flashes se produisant sur le site. Toutefois, les observations montrent également que le foudroiement n'est pas nul sur le reste du site. Pour la prochaine campagne, de nouveaux instruments seront installés comme une seconde caméra rapide, une sonde de courant au pied de l'antenne TDF ou encore une antenne de mesure à une dizaine de kilomètres du site.

Le modèle développé parallèlement à cette expérimentation fournit des probabilités d'impact sur chacun des points du site en fonction du courant. Les travaux concernant cette approche doivent encore être précisés, notamment en y intégrant des paramètres tels que la proportion de flashes ascendants, la multiplicité ou encore l'émission de traceurs ascendants dans le cas de flashes descendants.

Références

- [1] C. Gary, "La foudre: des mythologies antiques à la recherche moderne". Masson, 1994.
- [2] G. Berger, G. Lafon, G. Serrie, et S. Pédeboy, "New lightning experiment at the Pic du Midi", in Proc. 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, 2010.
- [3] G. M. Corrêa, A. M. N. Teixeira, L. C. Pereira, C. R. Mesquita, S. Visacro, H. R. L. Almeida, A. L. Senna, L. Ruhnke, et V. Mazur, "Improvements of the facilities for lightning research at Morro do Cachimbo station", in Proc. 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 2008.
- [4] A. Haddad et D. F. Warne, "Advances in high voltage engineering", vol. 40. IET, 2004.
- [5] C. Sigogne, P. Pignolet, T. Reess, G. Berger, G. Lafon, et G. Serrie, "New Results At The Pic du Midi Lightning Station", in Proc. 12th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, 2013.
- [6] V. A. Rakov, "Lightning electromagnetic environment: from continuing-current fields to x-rays", in International Conference on Grounding and Earthing, Florianopolis - Brazil, 2008, p. 6.
- [7] Météorage, "Bilan de foudroiement 1er semestre 2013", Météorage, 15-juill-2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteorage.fr/actualites/bilan-de-foudroiement-1er-semestre-2013>. [Consulté le: 19-juill-2013].
- [8] Météorage, "Un mois de juillet très foudroyé". [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteorage.fr/actualites/un-mois-de-juillet-tres-foudroye>. [Consulté le: 27-sept-2013].
- [9] Météorage, "Bilan de foudroiement annuel de 2013", 27-janv-2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteorage.fr/actualites/une-annee-atypique-et-contrastee-avec-un-mois-de-juillet-record>. [Consulté le: 28-févr-2014].
- [10] M. A. Uman, "The art and science of lightning protection". Cambridge University Press, 2008.
- [11] P. Lalande et A. Delannoy, "Numerical Methods for Zoning Computation", J. Aerosp. Lab, p. 10, déc. 2012.
- [12] V. A. Rakov et M. A. Uman, "Lightning: Physics and Effects". Cambridge University Press, 2007.