

COUP DE FOUDRE AU SÄNTIS

INSTALLÉ AU SOMMET D'UNE MONTAGNE DEPUIS LE MOIS DE JUILLET, UN RAYON LASER SUPERPUISSANT VISE LES NUAGES DANS LE BUT DE DÉCLENCHER ET DE GUIDER DES ÉCLAIRS. OBJECTIF : TESTER **UN PARATONNERRE ÉPHÉMÈRE** D'UN OU PLUSIEURS KILOMÈTRES DE HAUT QUI POURRAIT PROTÉGER DE LA FOUDRE DES SITES SENSIBLES DE GRANDE TAILLE.

Le premier tir a eu lieu le 19 juillet au soir, depuis le sommet du Säntis, à 2500 mètres d'altitude. Dans la lumière du crépuscule appenzellois, un rayon laser vert, digne de *Star Wars*, a illuminé le ciel, frôlant la pointe du mât de 123 mètres de haut qui sert d'émetteur radio/TV pour presque tout le Nord-est du pays. Ce n'était qu'un tir de démonstration. Il n'y avait pas le moindre orage à l'horizon ce soir-là. Aucune chance, donc, de déclencher et de guider la foudre directement sur le mât, ce qui est précisément l'objectif de l'opération baptisée *Laser Lightning Rod* (LLR) et dirigée par Jean-Pierre Wolf, professeur au Département de physique appliquée (Faculté des sciences). L'expérience consiste en effet à tester un paratonnerre éphémère aussi long que possible grâce au chemin ionisé et chauffé tracé dans l'atmosphère par un laser superpuissant, appelé laser Terawatt.

Depuis ce tir d'essai, plusieurs orages ont éclaté sur le Säntis et de nombreux éclairs ont touché le mât. Cependant, pour savoir si le laser a effectivement joué son rôle de paratonnerre et avec quelle efficacité, il faudra attendre l'analyse statistique des masses de données récoltées lors de la multitude de tempêtes que les chercheurs et les chercheuses ont essayées durant la campagne

qui doit se prolonger jusqu'à fin septembre. Un travail qui devrait prendre plusieurs semaines supplémentaires.

L'enjeu du projet est simple : un paratonnerre classique protège de la foudre une surface dont le rayon est en gros égal à sa hauteur. Par conséquent, si on pouvait concevoir un dispositif d'un kilomètre de haut (ou

« LES DÉGÂTS OCCASIONNÉS PAR LA FOUDRE COÛTENT DES MILLIARDS D'EUROS PAR AN À L'ÉCONOMIE MONDIALE »

plus), il pourrait sécuriser une zone suffisamment grande pour contenir une centrale nucléaire, un aéroport (en tout cas en grande partie), un pas de lancement de fusées, des parcs d'éoliennes, des centrales de distribution d'électricité ou encore de stations de télécommunication.

« Les dégâts occasionnés par la foudre sur de tels sites coûtent des milliards d'euros par an à l'économie mondiale, précise Jean-Pierre Wolf. Même si le laser que nous utilisons est cher, notre solution pourrait permettre d'économiser bien plus d'argent. L'avantage de notre appareil, c'est qu'il est flexible. On peut l'allumer et l'éteindre à volonté et, potentiellement, le transporter par camion là où on en aurait besoin. »

Sous le radôme En attendant, l'engin fait ses preuves dans les Préalpes appenzelloises. Avec ses 8 mètres de long et son poids de plus de 3 tonnes, il occupe presque tout l'espace couvert par le radôme. Cette « bulle », qui domine la plateforme construite au sommet du Säntis, renferme essentiellement les antennes de l'opérateur Swisscom. Le laser est protégé de la poussière et des changements de température par une tente isolante. On y entre après avoir enfilé des surchaussures, une blouse et une charlotte pour les cheveux. Un petit chauffage électrique contrebalance le froid vif de la nuit et une climatisation atténuée autant que possible la chaleur quand le soleil brille.

Silencieux, l'instrument génère un rayon laser ultra-puissant qui est guidé de miroir en



Vue du sommet du Sântis (2502 mètres d'altitude) avec le mât de 120 mètres de haut qui abrite un émetteur radio/TV.

TRUMPF

miroir vers l'extérieur du radôme jusque dans le « télescope ». Installé dans deux conteneurs superposés sur la terrasse juste en dessous, ce dispositif permet d'élargir le faisceau avant de l'envoyer vers le ciel presque à la verticale à travers une trappe aménagée dans le plafond. À l'intérieur, un gros ventilateur souffle en permanence pour éviter que la pluie ne tombe sur les miroirs en dessous. Les deux conteneurs sont lestés à l'aide de blocs de béton de 18 tonnes. L'ensemble doit résister à des coups de vent de 200 km/h. Jusqu'à présent, ça tient. Tout au plus faut-il aménager quelques pauses pour nettoyer les miroirs mouillés par les averses.

« Pour monter notre expérience, nous avons dû acheminer près de 30 tonnes de matériel, en partie par hélicoptère, précise Jean-Pierre Wolf. C'était une opération très impressionnante à cette altitude et avec le vent. »

Depuis juillet, trois personnes sont présentes tous les jours sur les lieux pour entretenir le dispositif, l'améliorer et piloter les tirs lorsqu'éclatent des orages.

Bien qu'assez éloigné de toute ville, le sommet du Sântis n'est pas à proprement parler isolé. Près de 400 000 touristes le visitent en effet chaque année grâce à un téléphérique spacieux et à une vue splendide qui porte jusqu'au lac de Constance quand les conditions le permettent.

« Nous avons loué un bed & breakfast à Urnäsch, un village situé à une douzaine de kilomètres plus bas dans la vallée, et nous faisons le trajet tous les jours en voiture (parfois en car postal) et en téléphérique, explique Jérôme Kasparian, professeur associé au Département de physique appliquée (Faculté des sciences) et à l'Institut des sciences de l'environnement. En haut, nous disposons d'un petit lieu de vie, juste sous le radôme. C'est bien pratique. Mis à part le stress habituel lié à notre activité scientifique, la vie est assez confortable. Notre principale contrainte vient du téléphérique. La dernière cabine descend à 18 heures. Si on la rate, on reste tout seul et on est bon pour passer la nuit en haut. Nous avons d'ailleurs acheté des lits de camp pour parer à cette éventualité. »

Une éventualité qui s'est présentée plusieurs fois tant il est vrai que la nature ne suit pas les mêmes horaires que ceux de la compagnie Sântis-Schwebbahn AG, qui exploite le téléphérique, l'hôtel au pied de la montagne et le restaurant panoramique au sommet.

Bien-être des vaches La conduite de l'expérience proprement dite obéit à un certain nombre de règles. Quand des conditions favorables au déclenchement de la foudre se présentent, les scientifiques commencent par déposer 24 heures à l'avance une demande



Sântis

Ce sommet des Alpes suisse abrite une station météorologique depuis 1882 et un émetteur de radio/TV.

Altitude: 2502 mètres.

Situation: Le Sântis est situé à cheval sur les cantons d'Appenzel Rhodes-Intérieures, d'Appenzel Rhodes-Extérieures et de Saint-Gall. Très isolé et exposé, il connaît des conditions météorologiques extrêmes qu'on ne trouve d'habitude qu'en haute montagne.



SCIENTIFY / UNIGE

UN SUCCÈS LONG À VENIR

Déclencher et guider la foudre avec un rayon laser, Jean-Pierre Wolf, professeur au Département de physique appliquée (Faculté des sciences), en rêve depuis vingt ans. En 1999, alors que les premiers lasers térawatts arrivent sur le marché, lui et des collègues français et allemands ont l'idée de monter un tel engin sur un camion afin de le déplacer à volonté. L'équipe présente son projet, baptisé TéraMobile, dans la revue *Science* en 2003. Elle y détaille les phénomènes non conventionnels créés par la propagation de ces impulsions lumineuses très puissantes dans l'atmosphère : ionisation, « filamentation », changements locaux d'indice de réfraction de l'air transformant la couleur rouge ou infrarouge initiale de la lumière en un blanc laiteux,

etc. Ces propriétés pourraient servir à la détection de composés rares dans l'atmosphère ou le contrôle de la foudre.

Au cours des années suivantes, le TéraMobile est testé dans des campagnes menées près des centrales à haute tension, des observatoires météorologiques et astronomiques. La plus importante d'entre elles a lieu au Nouveau-Mexique en 2004, sur le Mount South Baldy, connu pour la fréquence élevée de ses orages. « Malheureusement, cette campagne s'est en grande partie soldée par un échec, précise Jean-Pierre Wolf. D'abord parce que nous n'avons presque pas eu d'orages cette année-là. Ensuite parce que notre laser d'alors, bien qu'il avait déjà une puissance de crête d'1 térawatt, ne générât que

dix impulsions ultracourtes par seconde, soit cent fois moins que notre appareil actuel (lire article principal). Ce que nous avons appris des maigres données récoltées durant cette campagne et de celles obtenues par la suite grâce à des expériences en laboratoire, c'est que l'intervalle qui sépare chaque impulsion (100 millisecondes) est en fait trop long et l'air transformé par le passage du laser a le temps de retrouver son état normal. Avec un tel instrument, nous ne pouvions pas entretenir assez longtemps un « chemin » ionisé et chauffé pour déclencher et guider la foudre. Il faut préciser également que le phénomène des éclairs est beaucoup plus complexe qu'on ne le pense. Les physiciens ne sont toujours pas tous d'accord

sur les modèles théoriques censés l'expliquer.»

Après plusieurs années de recherches supplémentaires, Jean-Pierre Wolf et ses collègues lancent finalement en 2017 le projet *Laser Lightning Rod* (LLR) en partenariat avec l'EPFL, le Laboratoire d'optique appliquée de l'École polytechnique de Paris (LOA), la compagnie Trumpf Scientific Lasers et Arianespace. Entièrement financé par l'Union européenne et dirigé par Aurélien Houard du LOA, le projet bénéficie d'un financement à hauteur de 4,5 millions d'euros sur quatre ans. La campagne du Sântis devait initialement avoir lieu durant l'été 2020 mais la pandémie de covid en a décidé autrement. Elle a été décalée d'un an, aux frais des institutions participantes. AV

Le radôme au sommet du Sântis abrite le laser térawatt de l'Université de Genève. Le conteneur qui est en cours d'installation renfermera le « télescope » chargé d'élargir le faisceau laser avant de l'envoyer vers les nuages.

de fermeture de l'espace aérien au-dessus du Sântis. Une précaution utile quand on sait que le laser est fabriqué par la compagnie allemande Trumpf, leader dans la découpe de métaux, et qu'il développe une puissance de crête (maximale) dépassant le térawatt (1000 milliards de watts).

En réalité, le faisceau n'est pas continu. Il est composé de 1000 impulsions lumineuses par seconde et chacune d'entre elles ne dure que quelques picosecondes (milliardièmes de seconde). Comme elles sont espacées les unes des autres par une milliseconde, la puissance moyenne du laser n'est finalement que d'un kilowatt (1000 watts). Mais cette combinaison d'1 térawatt de crête et d'un kilowatt de moyenne est ce qui se fait de mieux au monde à l'heure actuelle. Ce qui explique aussi pourquoi il n'est pas question de faire voler des avions dans un secteur lorsque l'appareil est allumé. *« Pour obtenir le droit de fermer l'espace aérien au-dessus du Sântis, il a fallu deux ans de négociations avec l'Office fédéral de l'aviation civile et les autres partenaires touchés par une telle mesure : l'armée, l'aéroport de Kloten, la Rega (la garde aérienne suisse de sauvetage), les parapentistes de la région, etc., souligne Jean-Pierre Wolf. En fait, si notre projet a pu se réaliser, c'est en grande partie grâce aux responsables de plusieurs administrations qui ont été convaincus, voire même passionnés, par notre expérience et ses possibles applications. Ces personnes, à l'OFAC notamment mais aussi à Swisscom qui nous prête ses locaux, ont permis d'arrondir les angles, d'organiser des réunions, de surmonter les obstacles – nous avons même dû rassurer certains éleveurs de la région soucieux des effets que pourrait avoir notre rayon laser sur le bien-être de leurs vaches. »*

Parapentistes importunés Une fois l'espace aérien fermé, les scientifiques attendent que les éléments se déchaînent (les orages en haute

« SI ON RATE LA DERNIÈRE CABINE, ON EST BON POUR PASSER LA NUIT EN HAUT. NOUS AVONS D'AILLEURS ACHETÉ DES LITS DE CAMPS POUR PARER À CETTE ÉVENTUALITÉ »

montagne sont toujours assez impressionnants). Leur première précaution consiste à basculer l'alimentation du laser sur un groupe électrogène. Les physiciens se sont en effet aperçus que les tempêtes entraînent à chaque fois l'extinction abrupte de l'appareil, probablement à cause des dispositifs de sécurité du circuit électrique de la station du Sântis.

À ce stade, même s'ils ont l'autorisation de procéder à des tirs, les scientifiques n'ont pas pour autant les coudées totalement franches. L'OFAC se réserve en effet le droit de reprendre la main à tout moment et de rouvrir l'espace aérien en cas de besoin impérieux. L'équipe genevoise est ainsi en contact direct avec un numéro d'urgence de Kloten et s'est engagée à couper immédiatement le rayon laser si l'aéroport devait le lui demander. De plus, pour être sûr qu'aucun avion ne pénètre dans l'espace fermé malgré l'interdiction, les opérateurs du laser disposent d'un dispositif permettant de localiser en direct tous les aéronefs civils, des plus grands aux plus petits,

volant dans les environs immédiats. Si une intrusion imprévue a lieu, le système coupe automatiquement le laser.

« C'est arrivé à plusieurs reprises, constate Jérôme Kasparian. Nous sommes frappés par le nombre de fois où la fermeture de l'espace aérien est violée. » Des tensions sont également apparues avec le club de parapentistes voisin, qui n'apprécie manifestement pas la fréquence des demandes. Mais ces problèmes sont réglés directement par l'OFAC.

Quant aux tirs de laser, lorsqu'ils peuvent enfin avoir lieu, ils obéissent eux aussi à un protocole précis. Le faisceau est en effet allumé durant quelques dizaines de secondes puis éteint durant un laps de temps équivalent et ainsi de suite durant tout l'épisode orageux.

Chaque fenêtre de tir – et même chaque impulsion ultracourte – est très précisément horodatée grâce à une horloge GPS. Par ailleurs, l'École polytechnique fédérale de Lausanne a installé depuis une dizaine d'années des instruments à l'Observatoire de Sântis afin d'observer les orages. L'un d'eux est un interféromètre radiofréquence, synchronisé avec le laser Térawatt, qui enregistre tous les éclairs qui éclatent aux alentours.

Étant donné les circonstances (météo extrême, quantité de travail à effectuer durant les tirs...), il n'a pas été possible de vérifier de visu si des éclairs empruntaient effectivement le chemin du laser. C'est donc un traitement statistique des données – celles du laser et de l'interféromètre – qui permettra de savoir dans quelle mesure les périodes de tirs, voire même les impulsions du laser, sont corrélées avec les décharges de la foudre. Et donc d'évaluer le succès de l'expérience.

Anton Vos