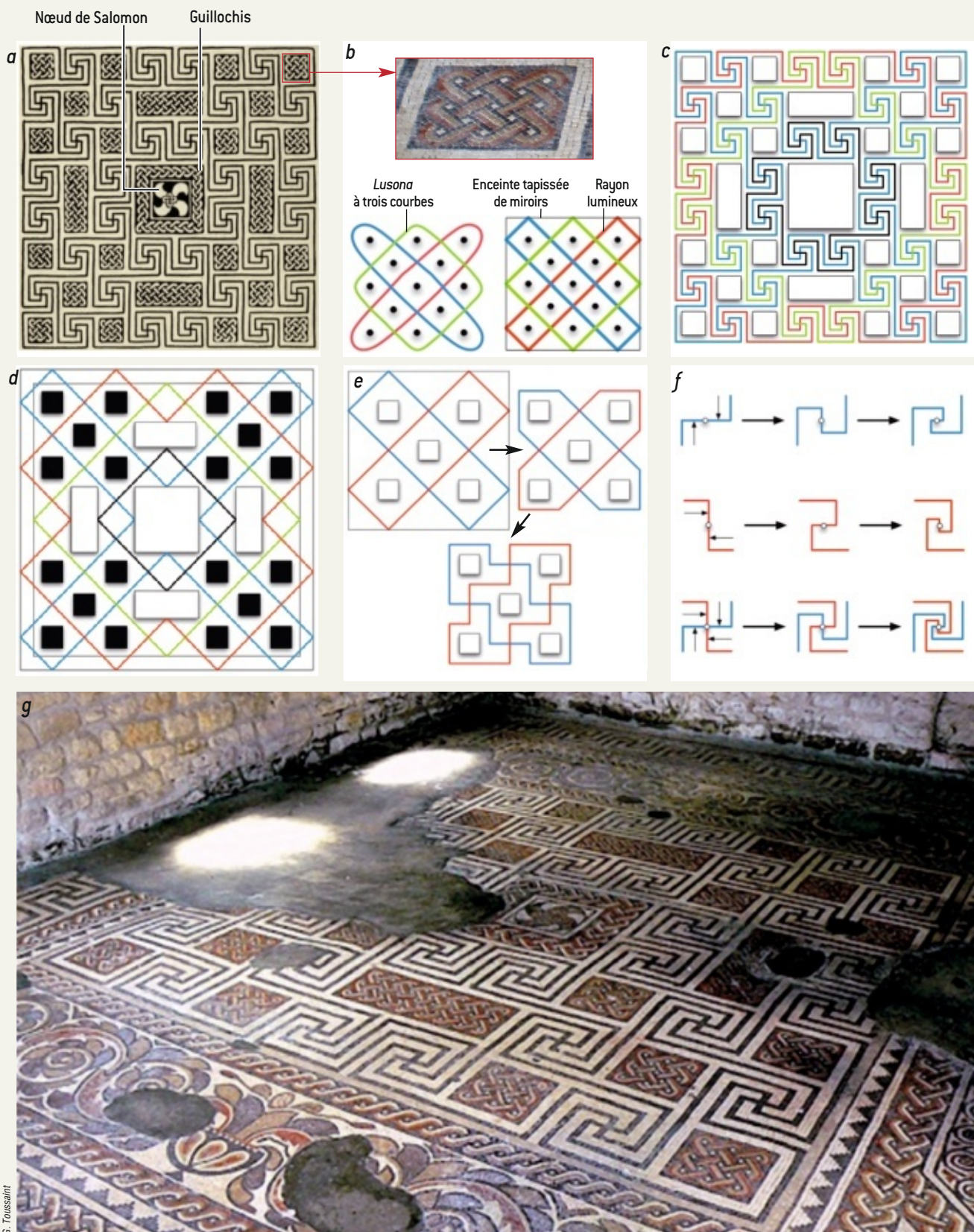




G. Troussaint

IDÉES DE PHYSIQUE

Comment éviter le coup de foudre

On ne peut empêcher la foudre de tomber, mais il existe un dispositif simple qui permet de guider en partie les éclairs : le paratonnerre.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

La foudre est un phénomène naturel qu'il est impossible de prévenir. Ces décharges électriques intenses peuvent tuer et occasionner des dommages considérables. Pour s'en protéger, on utilise de longues tiges métalliques reliées au sol : les paratonnerres. Ils sont censés attirer la foudre et canaliser le courant hors de la zone à protéger. Comment fonctionnent ces dispositifs ? Quelle zone protègent-ils ?

Répondre à ces questions suppose de comprendre comment se forment les éclairs. Les éclairs sont de nature électrique, avait deviné Benjamin Franklin. Le naturaliste français Thomas-François Dalibard fut le premier à confirmer cette hypothèse, en 1752, grâce à l'observation des étincelles créées par temps d'orage par un mât métallique de dix mètres, relié à un condensateur électrique.

En fait, ni le mât de Dalibard ni plus tard le cerf-volant de Franklin n'étaient touchés par la foudre, mais ils captaient les charges électriques de l'air environnant. Franklin eut ainsi l'idée brillante des paratonnerres, dispositifs qui étaient censés décharger les nuages et empêcher la foudre de tomber. Mais les paratonnerres ne font pas exactement cela. Il est impossible de capter sans violence l'électricité des nuages et, aujourd'hui comme hier, rien ne semble empêcher la formation des éclairs. Il est en revanche possible, grâce aux paratonnerres, d'orienter partiellement leurs frappes.

La formation d'un éclair demande d'abord un nuage orageux, c'est-à-dire un nuage de grande taille où, à la suite de divers processus pas toujours bien élucidés, la partie supérieure du nuage se charge positivement tandis que sa base se charge négativement.

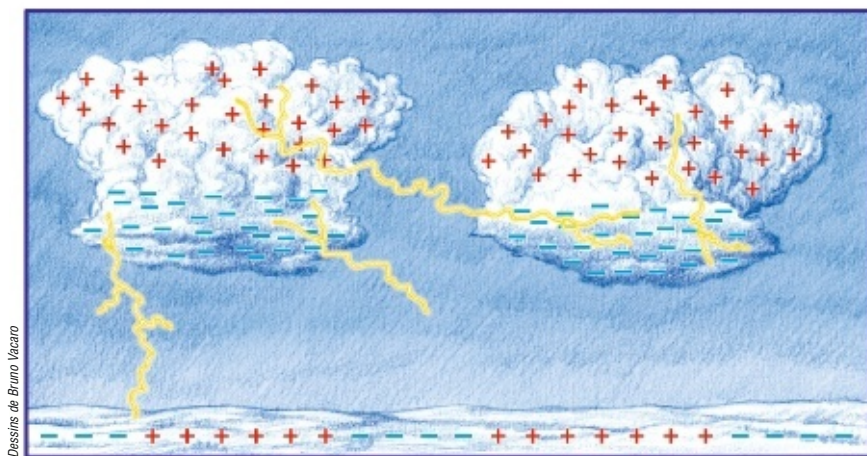
Par influence électrostatique, cette dernière attire au niveau du sol, qui est légèrement conducteur, des charges positives (voir la figure 1). Il se forme ainsi une sorte de condensateur géant où règnent des différences de potentiel de plusieurs dizaines de millions de volts. Avec une différence de potentiel de 100 millions de volts et le bas du nuage situé à 1 000 mètres d'altitude, on obtient des champs électriques de près de 100 000 volts par mètre.

Nuage-sol : un condensateur géant

Ce champ est 1 000 fois plus intense que par temps calme, mais reste très inférieur au champ disruptif de l'air (3,6 millions de volts par mètre, seuil au-delà duquel des arcs électriques naissent). Néanmoins, en raison des instabilités atmosphériques à la base du nuage, les charges peuvent former localement des structures conductrices courbes qui, par effet de pointe, créent des champs électriques bien supérieurs : l'air peut s'ioniser et une décharge s'amorce.

La décharge prend la forme d'un filament hautement conducteur, porteur d'une charge électrique élevée, suffisante pour entretenir l'ionisation. Environ neuf fois sur dix, ce « traceur » se perd dans un nuage voisin ; sinon, il descend vers le sol. Comme le vent chasse l'air ionisé, le traceur s'arrête quand les ions viennent à manquer, puis repart lorsque l'ionisation reprend : il avance par bonds, en zigzags, à une vitesse de quelque 200 kilomètres par seconde.

En se rapprochant du sol, les charges négatives situées à l'extrémité du traceur



Dessins de Bruno Vacaro

1. LES ÉCLAIRS SONT DUS À DE FORTES DIFFÉRENCES DE CHARGE ÉLECTRIQUE qui apparaissent entre le haut et le bas d'un nuage, sous l'effet de processus complexes. La plupart des éclairs sont internes au nuage ou atteignent un nuage voisin, mais quelques-uns atteignent le sol.

accroissent le champ électrique. Lorsque la distance atteint quelques dizaines de mètres, ce champ est assez intense pour amorcer la formation de décharges ascendantes, depuis le sol jusqu'au traceur (voir la figure 2). Qu'un tel filament atteigne son but et voilà la base du nuage, à 100 millions de volts, reliée au sol par un conducteur : une puissante décharge électrique se développe, atteignant en une dizaine de microsecondes une intensité de 30 000 ampères. Cette intensité décroît ensuite en quelque 500 millisecondes. C'est le coup de foudre, qui engendre lumière intense et tonnerre. Et puisque le canal de décharge est ouvert entre le nuage et le sol, il peut être suivi d'autres coups.

Une méthode simple pour placer les mâts

On comprend alors que la foudre frappe préférentiellement les endroits les plus hauts, potentiellement les plus proches du traceur descendant. C'est pourquoi on dispose les paratonnerres en haut des structures. Il faut cependant évaluer la zone protégée et, pour ce faire, essayer de déterminer où des traceurs ascendants peuvent naître. La question est difficile en toute rigueur, mais une loi phénoménologique permet de résoudre le problème.

Plus la charge du traceur descendant est grande, plus la distance à partir de laquelle cette charge provoque la formation de traceurs ascendants est élevée. Cette distance est de 20 mètres pour un éclair d'un courant maximal de 3 000 ampères, de 44 mètres pour 10 000 ampères, de 200 mètres pour 100 000 ampères. C'est sur cette propriété que repose la méthode pour déterminer le placement des paratonnerres, méthode dite de la sphère roulante.

En quoi consiste cette méthode ? Imaginons une sphère dont le centre est au bout du traceur descendant et dont le rayon est égal à la distance de naissance des traceurs ascendants pour une intensité donnée (voir la figure 3). L'éclair se produira dès que cette sphère touchera le sol ou un élément relié au sol. Pour connaître les points potentiellement atteints par un éclair d'intensité donnée, il suffit donc de faire rouler une sphère

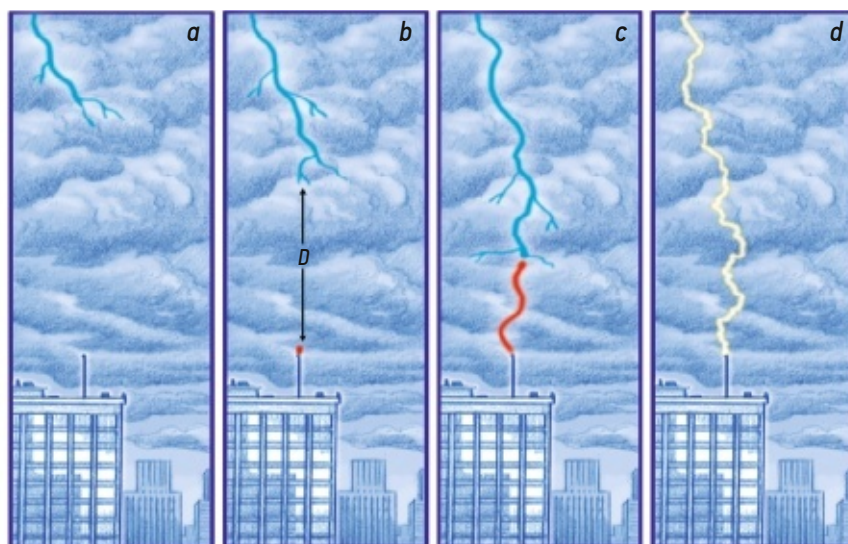
sur le sol et les obstacles présents. Tous les points que touche la sphère peuvent être atteints par la foudre, tandis que tous les autres sont dans des zones protégées.

Nous venons de raisonner sur un éclair d'intensité donnée. Cependant, puisque les éclairs d'intensité supérieure ont une distance d'action supérieure, la méthode de la sphère roulante montre que la zone que nous venons de déterminer est aussi protégée de ces éclairs plus intenses. En revanche, un éclair moins intense ayant une distance d'action plus faible, il peut atteindre

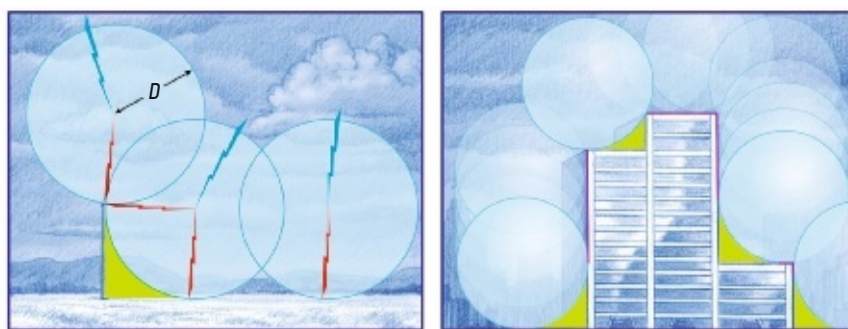
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. UN TRACEUR DESCENDANT (en bleu) provoque la formation d'un filament ascendant (en rouge) lorsque son extrémité parvient à une certaine distance D d'un objet conducteur (a, b), la valeur de D dépendant de la charge transportée. Quand le traceur descendant, chargé négativement, et le filament ascendant, chargé positivement, se rejoignent (c), un courant électrique bref et très intense circule le long du chemin frayé par les filaments de charges : c'est l'éclair (d).



3. LE FILAMENT DE CHARGES DESCENDANT (en bleu) peut faire naître un filament ascendant (en rouge) en tout point situé à moins d'une distance D de son extrémité, c'est-à-dire situé dans une sphère de rayon D et centrée sur l'extrémité du filament. Les régions (en vert) hors de portée d'une telle sphère d'influence sont donc protégées des éclairs correspondant à la valeur D ainsi que des éclairs plus puissants. Pour déterminer les régions non protégées, il suffit de faire rouler virtuellement la sphère sur toutes les surfaces et de repérer les endroits touchés par la sphère (en violet).

✓ BIBLIOGRAPHIE

Eretech Lightning Protection Handbook, 2009 :
<http://www.erico.com/public/library/fep/strike/LT30373.pdf>

V. A. Rakov et M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003.

M. A. Uman et V. A. Rakov, A critical review of nonconventional approaches to lightning protection, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, pp. 1809-1820, 2002.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

des endroits qui étaient protégés pour l'intensité initiale (une petite sphère se faufile mieux qu'une grande). Autrement dit, en extérieur, on n'est jamais totalement protégé de la foudre. Tout ce que l'on peut faire est d'estimer la probabilité des éclairs en fonction de leur intensité, puis de s'assurer que l'on ne sera pas touché par des éclairs d'intensité supérieure à un certain seuil. Cela permet de dimensionner les équipements de protection en fonction du risque encouru.

Puisque le rôle des dispositifs de protection tels que les paratonnerres est d'offrir à la foudre des endroits où frapper, de nombreuses idées ont fleuri pour rendre ces endroits encore plus attractifs pour les éclairs. Le principe est d'ioniser l'air au sommet de la pointe afin de favoriser l'apparition de décharges ascendantes. Entre le début du

XX^e siècle et les années 1980, des milliers de paratonnerres à pointe radioactive ont ainsi été installés. Ils sont interdits depuis 1987, à cause du danger des radioéléments et du risque de leur dissémination (après usure des matériaux). D'ailleurs, chacun peut participer au « safari radium » qui vise à identifier tous les paratonnerres radioactifs encore présents sur les toits.

Ces mâts radioactifs sont aujourd'hui remplacés par des dispositifs électroniques qui produisent de fortes tensions électriques, avec le même espoir d'attirer les coups de foudre. Mais le filtre magique n'existe pas : les études menées jusqu'à présent sur ces dispositifs s'accordent à dire que, s'ils ont le grand mérite d'être bien moins dangereux que les pointes radioactives, ils ne sont pas plus efficaces qu'une simple pointe.



SCIENCE & GASTRONOMIE

L'eau et le feu des piments

Ce n'est pas en buvant de l'eau que l'on éteint le feu du piment. Pis, c'est quand il pleut beaucoup que les piments sont piquants !

Hervé THIS



Le piment est le fruit de plantes du genre *Capsicum* (famille des Solanacées) dont le bassin semble être la Bolivie. Le composé principal de son piquant est la capsaïcine, isolée au début du XIX^e siècle par les chimistes Bucholz et Braconnot. Boire de l'eau pour faire cesser la brûlure du piment est inutile. La capsaïcine n'est en effet pas soluble dans l'eau, mais dans les graisses : mieux vaut se rincer la bouche avec de l'huile ou du lait, qui contient de la matière grasse émulsionnée.

Les biologistes viennent de découvrir que l'eau est responsable du piquant des piments ! L'histoire commence avec des questions de biologie de l'évolution. L'hétérogénéité de l'environnement détermine-t-elle des variations persistantes de certains traits ? Pour tester cette hypothèse, les biologistes recherchent des populations naturelles d'organismes vivants pour lesquels la variation des traits est clairement liée à un changement environnemental.

Les variations de l'expression de défenses chimiques des plantes ont été considérées comme un modèle intéressant, car le bénéfice écologique se mesure facilement et le coût physiologique apparaît nettement. David Haak et Joshua Tewksbury, à Seattle, et leurs collègues ont examiné diverses espèces de piments dont les gènes codent la production de composés capsinoïdes dans les fruits.

Certains piments (*Capsicum chilli*) n'ont aucun piquant, alors que d'autres (*Capsicum annuum*) ont des fruits tous brûlants. Les biologistes américains ont exploré le Sud-Est de la Bolivie, qui est le centre de la diversité des piments sauvages. Trois espèces de *Capsicum* y coexistent et présentent un poly-

morphisme du piquant : deux plants voisins de la même espèce peuvent produire soit des fruits piquants, soit des fruits non piquants.

Or les plantes produisant des capsinoïdes résistent aux attaques de champignons microscopiques de type *Fusarium*. Les biologistes américains se sont alors demandé pourquoi tous les piments ne sont pas piquants. Ils ont examiné les variations de piquant dans 21 populations réparties sur une distance de 300 kilomètres, où s'établit un gradient d'humidité du climat. Dans le Nord-Est sec, 15 à 20 pour cent des plants de *Capsicum* produisent des fruits piquants, et la proportion d'« individus piquants » augmente vers le Sud-Ouest, plus humide, où 100 pour cent produisent des piments piquants.

Au cours des sept années de l'étude, avec récolte de fruits et de semences, et culture en serre des semences recueillies (avec peu ou beaucoup d'eau), les biologistes ont ainsi relié les proportions de fruits piquants et la quantité d'eau dont disposent les plantes.

Les variations annuelles des pluies modifient les proportions d'individus piquants ou non dans chaque population. La proportion d'individus piquants reste partout corrélée à l'humidité. Selon que les individus sont piquants ou non, la densité de stomates (pores dans les feuilles, qui règlent notamment les échanges d'eau) varie. Les piments non piquants, qui ont moins de stomates sur les feuilles et qui produisent deux fois plus de graines, se trouvent surtout dans les parties sèches du domaine étudié. La présence de capsinoïdes y est moins utile, le *Fusarium* étant moins présent.

Ainsi, les variations environnementales se sont accompagnées d'un polymorphisme

du piquant dans les populations naturelles de piment sauvage *Capsicum chacoense*, parce que les particularités physiologiques relatives à l'utilisation de l'eau sont mêlées à celles qui commandent le piquant, à savoir la production de capsinoïdes.

Dans les environnements les plus humides, le piquant est utile aux plantes, les capsinoïdes protégeant les fruits des champignons qui les attaqueraient. L'adaptation n'est pas coûteuse : les piments piquants et non piquants cultivés dans ces conditions produisent autant de graines (où les capsinoïdes sont présents). Dans les environnements plus secs, le piquant est moins utile, le risque d'attaque par des champignons étant inférieur, et la production de composés piquants est coûteuse, car la production de graines est réduite de 50 pour cent. L'hypothèse biologique est ainsi avérée pour ce cas particulier, et les agriculteurs savent maintenant comment nous faire ou non brûler la bouche : en réglant la quantité d'eau donnée aux plantes.

Simultanément, le cuisinier sait comment éviter les contaminations par des champignons : utiliser des piments piquants... et pourquoi pas des capsinoïdes purs, en solution dans l'huile ? Imitons la nature, où l'évolution a travaillé pour nous. ■



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr