

Comptes Rendus de l'Académie des sciences

1873-7234 (electronic)

Mécanique



Numéro thématique / *Thematic issue*

L'abbé Bertholon : sa vie, son œuvre et ses successeurs au XXI^e siècle / *Abbé Bertholon: his life, his work and his successors in the 21st century*

Rédacteur en chef invité / *Guest editor*

Bruno Chanetz



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE



Comptes Rendus

Mécanique

Objective of the journal

Comptes Rendus Mécanique is an international peer-reviewed electronic journal, covering all areas of mechanics and engineering science.

It publishes original research articles, review articles, historical perspectives, pedagogical texts or conference proceedings, of unlimited length, in English or in French and in as flexible a format as necessary (figures, associated data, etc.).

Comptes Rendus Mécanique has been published since 2020 with the centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte (Mersenne Center for open scientific publishing), according to a virtuous Diamond Open Access policy, free for authors (no author processing charges nor publishing fees) as well as for readers (immediate and permanent open access).

Editorial director: Étienne Ghys.

Editors-in-chief: Samuel Forest.

Associate editors: Olga Budenkova, Francisco Chinesta, Francisco dell'Isola, Florian Gosselin, Jean-Baptiste Leblond, Éric Lemarchand, Bruno Lombard, Nicolas Moës, Léo Morin, Benoît Perthame, Guillaume Ribert, Géry de Saxcé, Emmanuel Villermaux.

Editorial secretary: Adenise Lopes.

About the journal

All journal's information, including the text of published articles, which is fully open access, is available from the journal website at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Author enquiries

For enquiries relating to the submission of articles, please visit this journal's homepage at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Contact

Académie des sciences
23, quai de Conti, 75006 Paris, France
Tel: (+33) (0)1 44 41 43 72
cr-mecanique@academie-sciences.fr

To cite this issue:

Bruno Chanetz (ed.). L'abbé Bertholon : sa vie, son œuvre et ses successeurs au XXI^e siècle.
Comptes Rendus Mécanique, 2026. <https://doi.org/10.5802/crmeca.sp.3>.



The articles in this journal are published under the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>



Éditorial / Editorial

En hommage à l'abbé Bertholon

In tribute to Father Bertholon

Bruno Chanetz

Courriel : bruno.chanetz@gmail.com

En hommage à l'abbé Bertholon (1741–1800)

Ce fascicule des comptes rendus de Mécanique est dédié au « savant abbé Bertholon », prêtre de saint Lazare, et titulaire de la chaire de physique expérimentale des États généraux de Languedoc à Montpellier. Illustre, Bertholon le fut incontestablement dans les dernières décennies du XVIII^e siècle, à l'apogée du siècle des Lumières. Il fut l'un des « électriciens » les plus en vue, à l'époque où s'affirmait la physique de l'électricité statique. Il était membre de nombreuses Académies de province, dont celles de Montpellier et de Béziers et il était considéré comme une autorité. Il rassembla l'essentiel de son œuvre dans trois livres : *De l'électricité du corps humain dans l'état de santé et de maladie* (1780) ; *De l'électricité des végétaux* (1783) ; *De l'électricité des météores* (1787).

Le « Franklin du Languedoc » fut le promoteur des paratonnerres ; il établit les premiers dans plusieurs villes de France, dont Paris. Le grand mathématicien Monge lui demanda d'éditer à sa place le premier tome du *Dictionnaire de physique* de l'*Encyclopédie méthodique*, dont une grande partie des articles est de sa plume.

Mais, inconnu, Bertholon l'est, sans aucun doute, aujourd'hui, et n'est plus mentionné qu'en passant dans de rares ouvrages érudits, à propos des paratonnerres.

Le colloque du 4 octobre 2024, qui s'est déroulé au Jardin des Plantes de Montpellier, grâce au professeur François Henn de l'université de Montpellier, entendait rappeler la vie et l'œuvre de l'abbé Bertholon, le milieu intellectuel dans lequel il vécut à Montpellier, ainsi que les traces qu'il a laissées au cours des siècles. Ce colloque fut également l'occasion d'évoquer l'actualité scientifique dans les domaines de la physique qui furent les siens : champs électriques, foudre, plasma avec des exposés de Sorbonne université, du laboratoire d'aérodynamique de Toulouse, de l'université de Montpellier et de l'ONERA.

Synthèse du colloque de Montpellier le 4 octobre 2024

Lors de la clôture du colloque Denis Papin à Saumur en 2023, Pierre Léna avait commenté cette phrase, issue de la correspondance de cet inventeur de génie : « *Les princes ont tant de sortes d'occupations qu'ils ne pensent guère aux sciences* » [1]. Quel contraste avec l'époque où vécut l'abbé Bertholon, lequel écrivit dans la préface au roi de son ouvrage *de l'électricité des végétaux* qu'on « *était redevable à la sagesse éclairée des principes qui dirigent Votre Majesté (de) la création des chaires de physiques expérimentales* », dont celle bien sûr occupée par lui-même à Montpellier.

Bertholon rappelait également dans cette préface qu'il avait eu l'honneur de présenter au roi Louis XVI son ouvrage *l'électricité du corps humain*. Si Louis XVI fut le plus féru de sciences de nos rois, il n'était pas le seul souverain de son époque à s'y intéresser. Bertholon rapporte dans ce même ouvrage que le prince-électeur de Bavière était fervent électricien et qualifiait les récalcitrants de sa cour « *d'hérétiques en électricité* ».

Nous avons pu apprécier une nouvelle fois les qualités de conteur de **Jean-Paul Poirier**, membre de l'Académie des Sciences, qui était déjà intervenu à Hendaye à propos de l'astronome Antoine d'Abbadie [2]. Le titre de son livre « *l'abbé Bertholon, un électricien des lumières en province* » a fourni celui de notre colloque. Jean-Paul Poirier nous a notamment instruits des espoirs que Bertholon fondait sur l'aérostation naissante pour la recherche scientifique et de fait l'après-midi, Philippe Lalande a présenté des études sur la foudre, à partir d'observations contemporaines obtenues au moyen de ballons.

Thierry Lavabre-Bertrand a replacé Bertholon dans le contexte de son époque, brossant avec grand talent le Montpellier scientifique dans lequel il évolua. Le rayonnement de la faculté de Montpellier sous l'ancien régime fut sans équivalent. On se rappelle, lors du colloque sur l'astronome Boulliau [3] à Loudun en 2022, que son compatriote l'illustre Théophraste Renaudot, inventeur de la presse, avait accompli ses études de médecine à Montpellier — et non à Paris — pourtant située à une distance plus de deux fois moindre de Loudun que la capitale du Languedoc. Il en était de même pour son confrère Rabelais, originaire de Chinon et de qui nous pouvons apprécier la très belle statue érigée dans le Jardin des Plantes.

Marie-Claire Coët, a ensuite évoqué la personnalité de Benjamin Franklin, venu en France, porté par un vent d'Amérique qui allait avoir des conséquences politiques incalculables pour notre pays en portant au premier rang de la politique :

- Robespierre, qui fut l'avocat de la défense dans le célèbre procès de Saint-Omer sur le paratonnerre;
- Marat, qui deviendra sous la Révolution le fougueux journaliste de « *l'Ami du Peuple* », mais qui à l'époque du procès de Saint-Omer était un physicien peu reconnu, mais non dénué d'un véritable esprit scientifique. Il attaqua notamment avec d'excellentes raisons — que détaille Jean-Paul Poirier dans son ouvrage — le para-tremblement de terre et l'électricité médicale de Bertholon.

Conor Maguire a produit son exposé récurrent, ici sur « *les traces de l'abbé Bertholon dans la poussière de l'histoire* ». En commentaire à cet exposé, Jean-Paul Poirier, a une nouvelle fois invalidé le portrait présumé de Bertholon de Saint-Lazare qu'on trouve — trop — facilement sur internet et que plusieurs, parmi les intervenants, avaient retenu pour illustrer leurs planches. Nous avons d'ailleurs également proposé ce portrait pour illustrer le flyer du colloque, avant d'y renoncer sous l'autorité de Jean-Paul Poirier. En revanche le conseil scientifique — sous l'influence de l'université — avait tenu à titrer le colloque « Pierre Bertholon » et non « L'Abbé Bertholon ». Jean-Paul Poirier a maintenu que c'était une erreur, car les prénoms n'étaient pas utilisés à l'époque. Nous aurions dû laisser figurer le titre d'« abbé » auquel nous avons renoncé par excès de laïcisme ! Le Dr Conor Maguire avait promis de revoir ses recherches en fonction de ces éléments pour son article devant figurer dans les actes du colloque. Malheureusement son décès, intervenu en avril 2025, est venu mettre un terme à ses recherches.

Au cours de l'après-midi, nous avons vu les avancées de notre siècle dans différents domaines qu'avait étudiés Bertholon.

Philippe Lalande, chargé de mission à l'ONERA, a traité le problème du foudroiement. Nous avons vu au cours de la matinée que la conquête du ciel est contemporaine de Bertholon avec le

vol des premiers ballons en 1783 et on mesure combien cet exposé scientifique aurait intéressé le principal propagateur des paratonnerres en France.

Paul-Quentin Elias, directeur de recherche à l'ONERA et membre d'Alumni-ONERA, de qui j'ai eu le plaisir d'encadrer la thèse de doctorat sur « les plasmas pour l'aérodynamique », a présenté « *les apports du fluide électrique sur les systèmes aérospatiaux* ». Un titre qui aurait également fort intéressé notre abbé Bertholon ! Paul-Quentin Elias a montré combien le quatrième état de la matière constituait un large champ d'investigation pour la recherche aérospatiale, notamment pour le contrôle d'écoulement ou la propulsion.

L'exposé de **Thierry Dufour**, maître de conférence au Laboratoire de Physique des Plasmas, à Sorbonne université, intitulé « *de l'électro-culture aux plasmas froids; trois siècles de découvertes en agriculture* » aurait véritablement passionné l'abbé Bertholon, tant il est une prolongation magnifique de son propre traité sur « *l'électricité des végétaux* », ouvrage qui est encore réédité de nos jours avec le sous-titre « *le livre que tous les jardiniers devraient avoir lu* ». Thierry Dufour a débuté son exposé par la présentation de l'électro-végétomètre représenté sur le flyer du colloque.

Nous avons également eu le privilège de bénéficier d'une conférence, sur « *les radiations naturelles et leurs effets indésirables sur les dispositifs électroniques* » qui nous a replacés dans le contexte aérospatial, déjà évoqué par Paul-Quentin Elias. L'auteur, **Frédéric Wrobel**, est professeur à l'université de Montpellier. Sa conférence fut une preuve — s'il en fallait — que cette université compte au XXI^e siècle, comme au XVIII^e siècle, des professeurs de grand talent.

Enfin la dernière conférence de la journée, par **Serge Soula**, chercheur au Laboratoire d'aérodynamique de Toulouse, a traité « *des décharges électriques au-dessus des nuages* », abordant des phénomènes insoupçonnés de Bertholon : les jets géants.

S'il était naturel de tenir ce colloque à Montpellier, dans la cité où Bertholon exerça son magistère, notons que celui-ci était né et mort à Lyon. Or quand il mourut en 1800, un jeune lyonnais de 25 ans commençait une carrière professorale. Il s'agissait de Pierre-Marie Ampère, mathématicien qui allait révolutionner l'électricité. Pour commémorer les 250 ans de sa naissance en 1775, le prochain colloque « histoire et science » se déroulera à Lyon les 11 et 12 décembre 2025.

Bruno Chanetz
Directeur de recherche à l'ONERA
Président d'honneur d'Alumni-ONERA
France
bruno.chanetz@gmail.com

Références

- [1] P. LÉNA, « Clôture du colloque Denis Papin », *C. R. Méc.* **352** (2024), no. S1, p. 69-70. Hommage à Denis Papin.
- [2] J.-P. POIRIER, *Antoine d'Abbadie, Voyageur et physicien du globe au XIX^e siècle*, Hermann - Histoire des sciences, 2009.
- [3] P. LÉNA, « Quelques réflexions pour conclure », *C. R. Méc.* **351** (2023), no. S4, p. 91-93. Hommage à Ismaël Boulliau.



Histoire des sciences et des idées / *History of Sciences and Ideas*

L'abbé Bertholon, un électricien des Lumières à Montpellier

An electrician in the age of Enlightenment in the provinces: Abbe Bertholon

Jean-Paul Poirier ^a

^a Académie des sciences, Paris, France
Courriel : jean-paul.poirier@noos.fr

Résumé. Cet article est la synthèse de la biographie : *Un électricien des Lumières en province : L'abbé Bertholon*, publié par les Éditions Hermann dans la collection « Histoire des sciences » en 2008, sous la plume de l'auteur.

Il fut l'un des « électriciens » les plus en vue, à l'époque où s'affirmait la physique de l'électricité statique. Celui qu'on appela le « Franklin du Languedoc », fut un ardent promoteur des paratonnerres dont il établit les premiers à Paris et dans plusieurs villes de France. Bertholon promut l'utilisation de l'électricité sur le corps humain. Il préconisa également son utilisation sur les végétaux en dans le but de favoriser leur culture. Il fut aussi l'un des premiers à percevoir l'intérêt scientifique et technique des ballons. Célèbre au XVIII^e siècle, Bertholon est à peu près inconnu aujourd'hui. Il a plus été un « passeur » qu'un physicien créatif.

Abstract. This article is a summary of the biography: *An electrician at the age of Enlightenment in the provinces: Abbe Bertholon*, published by Editions Hermann in the "History of Science" collection in 2008, written by the author.

He was one of the most prominent "electricians" at a time when the physics of static electricity was gaining ground. The man known as the "Franklin of Languedoc" was an ardent promoter of lightning rods, the first of which he established in Paris and several other French cities. Bertholon promoted the use of electricity on the human body. He also advocated its use on plants to promote their cultivation. He was also one of the first to perceive the scientific and technical benefits of balloons. Famous in the 18th century, Bertholon is virtually unknown today. He was more of a "ferryman" than a creative physicist.

Mots-clés. Électricité statique, Électricité médicale, Aérostation, Paratonnerres.

Keywords. Static electricity, Medical electricity, Balloons, Lightning rods.

Manuscrit reçu le 22 février 2025, accepté le 5 juillet 2025.

Né à Lyon en 1741, le « savant abbé Bertholon », prêtre de saint Lazare, devint professeur de théologie au séminaire de Béziers en 1770. En 1782, il obtint la chaire de physique expérimentale des Etats-Généraux de Languedoc à Montpellier, créée pour lui (Chaptal eut la chaire de Chimie).

Bertholon fut l'un des « électriciens » les plus en vue, à l'époque où s'affirmait la physique de l'électricité statique [1]. S'il ne fut pas membre de l'Académie Royale des sciences de Paris, il le fut de celle de Montpellier qui, on le sait, ne constituait qu'un seul et même corps avec elle. Les pages de titre de ses ouvrages portent qu'il était membre des Académies de Montpellier, Béziers, Lyon, Marseille, Nîmes, Dijon, Rouen, Toulouse, Bordeaux, Villefranche, Lausanne, Florence, Rome,

Madrid, Hesse-Hombourg, etc. Au cours des années, il fut très souvent lauréat de nombre de ces académies sur des sujets mis au concours. *Bientôt je vais faire ma récolte*, disait-il en parlant des prix qu'il recevait d'ordinaire dans le mois d'août.

Il écrivit de nombreux articles et mémoires. Trois ouvrages importants rassemblent l'essentiel de son œuvre :

De l'Électricité du corps humain dans l'état de santé et de maladie (1780)

De l'Électricité des végétaux (1783)

De l'Électricité des météores (1787).

Mais, célèbre au XVIII^e siècle, Bertholon est à peu près inconnu aujourd'hui. À cela, plusieurs raisons, sans doute. Certes, comme on l'a dit, l'abbé Bertholon « n'a rien laissé de bien saillant en physique ». Il n'y a pas de « loi de Bertholon » ou d'« effet Bertholon » et il a plus été un « passeur » qu'un physicien créatif, mais peut-être aussi, faut-il tenir compte du fait que Bertholon, plus ou moins autodidacte en physique, a passé toute sa carrière en province, principalement à Béziers et à Montpellier, et n'était pas protégé par un académicien parisien, comme l'était par exemple l'abbé Nollet, qui n'a guère davantage marqué la physique.

Jetons un coup d'œil sur son œuvre.

L'électricité était à la mode dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle, à la fois chez les savants et dans les salons où l'on tirait des étincelles des machines électriques. En 1752 Franklin avait montré que l'électricité « artificielle » et l'électricité de la foudre, étaient identiques. Non seulement le « pouvoir des pointes » donnait l'espoir de « soutirer » l'électricité des nuages, mais encore des « conducteurs électriques », les paratonnerres, pouvaient protéger les édifices de la foudre.

Bertholon, qu'on appela le « Franklin du Languedoc » fut un ardent promoteur des paratonnerres dont il établit les premiers à Paris et dans plusieurs villes de France. Son expertise fut recherchée lors du fameux « procès du paratonnerre » à Saint-Omer, qui opposait un propriétaire qui avait établi un paratonnerre sur sa demeure aux échevins de la ville qui avaient ordonné son enlèvement, par principe de précaution. Le procès, au Conseil d'Artois à Arras, en 1782, fut gagné par le jeune avocat du plaignant, Maximilien de Robespierre, dont ce fut le début de la carrière.

Au XVIII^e siècle on pensait encore, à la suite d'Aristote, que les tremblements de terre étaient des orages souterrains. Il était donc logique de penser que si les orages atmosphériques étaient électriques, les orages souterrains l'étaient aussi. Comme dit Bertholon,

Les tremblements de terre ne sont donc que des tonnerres souterrains, comme Pline l'a anciennement reconnu; et puisqu'il est démontré que le tonnerre est un effet d'électricité, on ne peut s'empêcher de reconnaître que la cause des tremblements de terre n'est autre chose que la matière électrique.

Dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, beaucoup de savants embrassèrent la théorie des tremblements de terre électriques.

Comme on pouvait se préserver de la foudre par des paratonnerres, Bertholon pensa logiquement que l'on pouvait se préserver des séismes des « para-tremblements de terre ».

Dans un mémoire publié dans le *Journal de Physique* en 1779, Bertholon explique le principe de son procédé qui consiste à « soutirer » le fluide électrique de la Terre :

Pour soutirer le plus loin qu'on pourra la matière fulminante de la terre, il faut enfoncer dans la terre, le plus avant qu'il sera possible, de très grandes verges de fer dont les deux extrémités, celle qui est cachée & celle qui se trouve au-dessus de la superficie, seront armées de plusieurs verticilles ou pointes divergentes très aigües. Les verticilles inférieurs [...] serviront à soutirer la matière électrique surabondante dans le sein de la terre. Ce fluide électrique sera transmis par toute la longueur de cette substance métallique, & il sera ensuite déchargé dans l'air de l'atmosphère, sous la forme d'aigrettes, par les pointes ou verticilles supérieurs.

L'intérêt pour la théorie électrique des tremblements de terre fut avivé par le grand séisme qui frappa le royaume des Deux-Siciles en février et mars 1783. Messine fut détruite et il y eut environ trente mille victimes en Calabre et en Sicile orientale.

Giovanni Vivenzio, premier médecin du Roi de Naples, publia, l'année même du séisme, « Histoire et théorie des tremblements de terre en général et en particulier de ceux de la Calabre et de Messine en 1783 ». Dans sa dédicace à la reine Marie-Caroline, il avertit : « Je n'ai pas cru pouvoir mieux accomplir une si grande œuvre, qu'en présentant à Votre Majesté, dans la première partie, une production d'un savant Français qui expose la théorie des tremblements de terre et la façon de s'en préserver. » De fait, la première partie est la traduction, mot pour mot, du mémoire de 1779 de Bertholon.

Dans son ouvrage « L'électricité des météores », Bertholon cite Buffon :

Je suis aussi parfaitement de votre avis, au sujet des tremblemens de terre, m'écrivait M. de Buffon en 1781, le 5 juin. L'Electricité en est la cause principale [...] Si l'on était bien avisé à Naples, à Catane, à Lisbonne, on y établirait vos para-tremblement de terre : mais quand les hommes seront-ils assez éclairés pour devenir sages & prudents?

Jean-Paul Marat ne partageait pas l'enthousiasme de Buffon. À la fin de ses *Recherches physiques sur l'électricité*, un chapitre intitulé *Examen des prétendus para-tremblemens de terre et para-volcans*, est une critique raisonnée du mémoire de 1779. Il démolit en particulier un des arguments clés de Bertholon :

Il est faux qu'il n'y ait que la commotion électrique qui se propage en un instant à des distances prodigieuses ; & l'Auteur est certainement trop instruit pour ignorer que l'impulsion imprimée à l'extrémité d'un solide continu se fait, au moment même, sentir à l'autre extrémité, quelle que soit leur distance. Toute cause capable de produire une violente percussion sur quelque partie de ces masses énormes, qu'on appelle les ossemens du globe, produira donc le phénomène en question.

Marat fut, semble-t-il, le seul à l'époque à avoir compris que les séismes émettaient des ondes qui se propageaient à la vitesse du son.

Le 5 juin 1783, les frères Montgolfier firent s'élever un ballon de toile doublée de papier auquel de l'air chaud communiquait une force ascensionnelle. Moins de six mois plus tard eut lieu le premier vol habité, suivi rapidement de beaucoup d'autres. Les ballons devinrent à la mode.

Bertholon fut, sans doute, l'un des premiers à percevoir l'intérêt scientifique et technique des ballons. En effet, lors de la séance en l'honneur de Joseph de Montgolfier, organisée par la Société royale de Montpellier, le 4 mars 1784, Bertholon parla des applications des aérostats aux diverses branches de la science et de l'industrie, et la même année, il publia à Montpellier un opuscule intitulé *Des Avantages que la Physique et les Arts qui en dépendent peuvent retirer des Globes aërostatiques*. Il explique en détail ces avantages, en particulier la possibilité de mesurer la température et de prélever des échantillons d'air en altitude, ce que firent, vingt ans plus tard Biot et Gay-Lussac. On pourra aussi, en s'élevant dans la région des orages, étudier comment se forment les éclairs. Bertholon prédit la photographie aérienne et son utilisation pour la cartographie :

Quelle satisfaction surtout s'il porte une chambre obscure, ou d'autres machines de ce genre faites avec des verres convenables, il pourra, à une hauteur proportionnée, voir une plus grande étendue de terrain qu'on n'en voit communément.

Enfin, dit Bertholon,

Le Globe Aërostatique sera très utile dans une armée pour découvrir la position de celle de l'Ennemi, ses manœuvres, ses marches, ses dispositions & les annoncer par des signaux [...] On peut encore très facilement faire sortir d'une Place assiégée des Personnages importants, soit pour éviter qu'ils ne soient prisonniers, soit pour donner des avis essentiels à leurs Alliés.

Le 26 juin 1794, l'observation des troupes depuis le ballon captif *L'entrepreneur* participa à la victoire de Fleurus, et, le 7 octobre 1870, Gambetta quitta Paris assiégée en ballon, dans le but d'aller organiser la résistance à Tours.

Mais il n'était pas sans danger de s'élever dans les airs, et c'est à Montpellier que, vers la fin de 1783, le physicien Lenormand et Bertholon firent des essais de « parachute » en laissant tomber, du haut de la tour de l'Observatoire (tour de la Babote), des animaux munis de parasols de taille proportionnée à leur poids, et Lenormand, lui-même, armé de son parachute, sauta sans mal, du haut de la tour.

En 1746, l'abbé Nollet avait eu l'idée que la secousse procurée par la bouteille de Leyde que Musschenbroek avait découverte l'année précédente *pourroit bien ressusciter le mouvement plus ou moins interdit dans une partie malade*, et fit quelques expériences sur des paralytiques, mais c'est le Genevois Jallabert (membre de la Société royale de Montpellier) qui mit à la mode l'électricité médicale par sa cure d'un serrurier paralysé du bras droit, en lui tirant des étincelles des muscles. Presque tous les « physiciens électrisans » rapportèrent des succès dans le traitement, non seulement des paralysies, mais d'un grand nombre de maladies.

L'abbé Bertholon fut, en 1770 et 1771, l'un des premiers à s'engager dans cette voie, peu après son arrivée à Béziers, il envoya un article au *Journal des Savants*, faisant état de l'usage de l'électricité pour soigner les maux de dents, en s'excusant :

J'étois bien éloigné de faire connaître au Public un essai en ce genre : mais ayant lu ce Mémoire dans une séance de l'Académie de Béziers, on m'a engagé à vaincre ma répugnance, en me faisant entrevoir que ce serait un crime de lèze-humanité, que d'en agir autrement. [...]

Par la suite, Bertholon, soucieux de ne pas commettre de crime contre l'humanité, vainquit aisément sa répugnance à faire connaître ses expériences au public.

En 1779, l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon proposa au concours le sujet suivant : *Quelles sont les maladies qui dépendent de la plus ou moins grande quantité de fluide électrique dans le corps humain, & quels sont les moyens de remédier aux unes & aux autres ?* Le prix fut attribué conjointement à un médecin piémontais et à l'abbé Bertholon. Le mémoire de Bertholon, publié en 1780 sous le titre *De l'Electricité du corps humain dans l'état de santé et de maladie*, obtint un succès considérable, fut réédité en 1786, et traduit en plusieurs langues. Les éditeurs citaient un nombre de savants illustres qui avaient honoré l'ouvrage de leurs suffrages, parmi lesquels Buffon, d'Alembert, Lacépède, etc.

Dans une première partie, Bertholon donne les principes de *l'hygiène électrique*, c'est-à-dire de la façon de rester en bonne santé au moyen d'électrifications judicieuses. Il énumère ensuite les différentes maladies, et tous les traitements possibles de celles-ci par l'électricité positive ou négative. Ainsi les maladies inflammatoires, comme la petite vérole, causées par une surabondance de feu électrique, doivent être traitées par l'électricité négative. C'est aussi le cas des maladies spasmodiques, comme la danse de Saint Guy. Par contre, les paralysies dépendent d'un déficit de fluide électrique, identifiable au fluide nerveux, comme le prouve le fait qu'elles sont guéries par l'électricité positive. Bertholon garde une réserve de bon goût au sujet de *l'anaphrodisie* et mentionne seulement, en termes choisis, que « la vertu électrique ranime les sens flétris, inspire une nouvelle vigueur, & semble donner du ressort aux organes. »

En 1783, Bertholon publia *De l'Electricité des Végétaux*, un

ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, [...] & principalement des moyens de l'appliquer utilement à l'agriculture, avec l'invention d'un électrovégétomètre.

Si le fluide électrique est surabondant dans l'atmosphère et en défaut dans la terre, ou vice-versa, il faut tenter de rétablir l'équilibre. L'abbé déclare modestement :

C'est par l'invention de l'électro-végétomètre que j'en suis venu à bout ; découverte, si j'en crois des amis éclairés, qu'on peut regarder comme une des plus utiles qui ait encore été faite en Physique.

Bertholon considère d'abord l'influence de l'électricité atmosphérique sur les végétaux :

J'ai toujours remarqué que les années les plus orageuses, les plus électriques, étaient les plus fertiles. Ceux qui cultivent le houblon, ont constamment éprouvé que les années où il y a peu de tonnerres, le houblon ne réussit pas, qu'il est rare & par conséquent cher ; & qu'au contraire, la récolte est très abondante dans les tems où ce météore est plus fréquent.

De même « L'influence de la pluie sur les plantes vient de l'électricité de l'atmosphère, qui leur est transmise par l'eau pluviale ». Il s'attache ensuite à l'influence de l'électricité sur les différentes fonctions végétales : germination, croissance, floraison, fructification, respiration, etc.

Il rapporte les expériences sur la germination de l'abbé Nollet, qui avait cultivé des graines de moutarde dans deux pots identiques, en électrisant l'un plusieurs heures par jour pendant huit jours. Au bout de ce temps

les graines électrisées étoient toutes levées & avoient des tiges de 15 à 16 lignes de hauteur, tandis qu'il y en avoit à peine deux ou trois des autres hors de terre, avec des tiges de 3 ou 4 lignes au plus.

Bertholon, répétant l'expérience, obtint le même résultat. L'électricité, poursuit-il, a des effets bénéfiques sur l'accroissement des végétaux, la production et la multiplication des tiges, des rameaux et des feuilles, ainsi que des fleurs et des fruits. La végétation est plus vigoureuse dans les lieux qu'on regarde comme sujets à une électricité plus abondante, comme par exemple les terrains volcaniques de Sicile et des environs de Naples, qu'il pense évidemment chargés d'électricité.

La dernière partie de l'ouvrage est essentiellement consacrée à l'électro-végétomètre. Il déclare :

Pour remédier au défaut de la quantité de fluide électrique qui est nuisible à la végétation, il faut élever dans le terrain qu'on veut féconder un appareil nouveau que j'ai imaginé, qui a tout le succès possible, & qu'on peut nommer électro-végétomètre ; il est aussi simple dans sa construction qu'efficace dans sa manière d'agir, & je ne doute point qu'il ne soit adopté par tous ceux qui sont instruits des grands principes de la nature.

Le principe en est simple : une verge de fer terminée par plusieurs pointes aigües de fer doré, en haut d'un mât isolant, soutire l'électricité de l'air, qui est conduite vers d'autres pointes de fer orientées vers la terre, au moyen desquelles le fluide électrique est conduit sur les plantes à traiter.

De cette façon, on aura un excellent engrais, qu'on aura, pour ainsi dire, été chercher dans le ciel, & cet engrais ne sera nullement dispendieux ; car après la construction de cet instrument, il n'en coûtera rien pour l'entretien. [...] Cet appareil ayant été élevé par mes soins au milieu d'un jardin, on a vu les plantes diverses, les herbages, les fruits plus hâtifs, plus multipliés et de meilleure qualité.

Un électro-végétomètre fut-il installé au Jardin des plantes de Montpellier ?

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que son organisme de recherche.

Références

- [1] J.-P. Poirier, *Un électricien des Lumières en province : L'abbé Bertholon*, Histoire des sciences, Éditions Hermann : Paris, 2008.



Histoire des sciences et des idées / *History of Sciences and Ideas*

Le Montpellier scientifique du XVIII^e siècle

Scientific Montpellier in the 18th century

Thierry Lavabre-Bertrand ^a

^a Faculté de médecine, 2 rue École de médecine, F-34000 Montpellier, France

Courriel : thierry.lavabre-bertrand@umontpellier.fr

Résumé. La vie scientifique montpelliéraine du XVIII^e siècle est très active, dominée par l'antique université de médecine fondée en 1220 qui inclut le Jardin des plantes fondé en 1593 et qui se complète dans le courant du siècle d'un Collège royal de chirurgie d'une part et de la Société royale des sciences fondée en 1706 d'autre part.

L'université de médecine outre ses travaux proprement médicaux fait faire d'importantes avancées en botanique, et tient une place capitale dans la systématisation du vitalisme, philosophie médicale dominante en Europe à la fin du siècle.

La Société royale des sciences s'intéresse en lien avec l'université aux sciences naturalistes, mais aussi aux mathématiques, à la physique et à l'astronomie. Elle va inclure une chaire de chimie pour J.A. Chaptal et de physique pour l'abbé Bertholon.

Ces acteurs scientifiques sont partie prenante d'une vie sociale dense impliquant États du Languedoc, salons, loges maçonniques et confréries de Pénitents.

Le milieu scientifique montpelliérain du XVIII^e siècle se marque à la fois par sa tradition universitaire médicale conçue de façon extrêmement large et par sa pleine insertion dans le mouvement des Lumières.

Abstract. Scientific life in 18th-century Montpellier was very active, dominated by the ancient medical university founded in 1220, which included the Jardin des Plantes (Botanical Garden) founded in 1593 and which was supplemented during the century by a Royal College of Surgery, on the one hand, and by the Royal Society of Sciences, founded in 1706, on the other.

In addition to its strictly medical work, the medical university made important advances in botany and played a key role in the systematization of vitalism, the dominant medical philosophy in Europe at the end of the century.

The Royal Society of Sciences, in conjunction with the university, was interested in the natural sciences, but also in mathematics, physics, and astronomy. It would include a chair of chemistry for J.A. Chaptal and of physics for Abbé Bertholon. These scientific institutions were part of a vibrant social life involving the Estates of Languedoc, salons, Masonic lodges, and brotherhoods of Penitents.

The 18th-century scientific community in Montpellier was characterized by both its extremely broadly conceived medical academic tradition and its full involvement in the Enlightenment movement.

Mots-clés. Histoire de la médecine à Montpellier, Jardin des plantes de Montpellier, Société royale des sciences de Montpellier, Histoire des sciences au XVIII^e siècle.

Keywords. History of medicine in Montpellier, Botanic garden of Montpellier, Royal society of sciences of Montpellier, History of sciences during 18th century.

Manuscrit reçu le 3 mars 2025, accepté le 7 juillet 2025.

La fondation de l'université de médecine de Montpellier par le cardinal Conrad d'Urach le 17 août 1220 [1] avait permis à Montpellier de se placer au premier rang de la médecine européenne. L'université ayant été créée comme purement médicale, ses maîtres se voyaient d'emblée investis de la charge d'explorer les différents aspects des sciences de la Nature en relation avec l'Homme,

ce qui se concrétisait dans les siècles suivants par leur implication en anatomie, en botanique, en zoologie, en histoire des sciences, bien au-delà de la simple médecine. Jalouse de son indépendance, malgré la création par le pape Nicolas IV en 1289 du *Studium generale* montpelliérain auquel elle ne contribuait que nominale, l'université de médecine reste au XVIII^e siècle un centre scientifique très actif, associé à des entités universitaires plus récentes, tel le Collège royal de chirurgie, et va s'imbriquer avec les acteurs plus caractéristiques de l'époque que sont les sociétés savantes pour former un microcosme original et fécond. Il est donc logique d'envisager successivement le monde universitaire montpelliérain, la Société royale des sciences et les lieux de sociabilité en lien avec la vie intellectuelle.

1. L'université montpelliéraine

Implantée dans des locaux modestes, correspondant au Collège royal de médecine dans le centre de la ville, l'université de médecine est souvent dénommée *Ludovicée* à la fin du siècle, par flatterie pour Louis XV [2]. Sa réputation est immense, elle forme nombre de médecins du roi et des grands, mais n'échappe pas aux vices des institutions d'Ancien Régime et au premier chef au principe de la « survivance », permettant au titulaire d'une régence d'obtenir du roi une promesse de succession pour un héritier désigné. Elle est depuis 1220 placée sous l'autorité de l'un de ses maîtres portant le titre de chancelier-juge. Depuis Martin Richer de Belleval (1599-1664), cette fonction est associée à celle de titulaire de la « régence » d'anatomie et botanique et d'Intendant du Jardin des plantes que celui-ci avait héritées de son oncle, Pierre Richer de Belleval (1564?-1632). Martin Richer transmettra sa triple fonction à son neveu, Michel Chicoyneau (1626-1701), à qui succèdent le fils de celui-ci François (1672-1752), qui sera premier médecin de Louis XV, puis son arrière-petit-fils Jean-François (1738-1759), qui clôt la dynastie en 1759, mourant célibataire à l'âge de vingt et un ans !

Le corps professoral n'est pas très nombreux : la dernière régence ou chaire, celle de « médecine des pauvres », créée en 1715 est la huitième. Ces chaires sont en principe attribuées au concours, mais la nomination de survivanciers limite les carrières au mérite. Le petit monde universitaire ne manque pas de surcroît de rivalités, de jalousies, de disputes. La répartition des enseignements ne se calque que de façon lointaine sur l'intitulé des chaires, et les rotations sont fréquentes, ce qui aboutit à un enseignement peu cohérent, comme le souligne Chaptal en ses *Souvenirs* [3] : « Venel, habile chimiste, y professait l'hygiène, et René nous récitait quelques pages de Macquer pour toute chimie ; Barthez y enseignait l'anatomie et Gouan faisait des leçons sur la matière médicale, en sorte que personne n'était à sa place. » Et pourtant le rayonnement de l'École ne fait pas de doute. Les premiers médecins de Louis XV sont de façon ininterrompue de 1730 à 1770 (le poste restant vacant de 1770 à 1774) issus de Montpellier : Pierre Chirac (1650-1732), François Chicoyneau, déjà cité, Jean-Baptiste Sénac (1693-1770). Paul-Joseph Barthez (1734-1806) est premier médecin du duc d'Orléans....

Cette présence institutionnelle se double d'une activité scientifique de premier plan. En médecine *stricto sensu*, les auteurs montpelliérains sont très présents, tant par des monographies tel l'ouvrage de Pierre Chirac sur les maladies des équipages de vaisseaux [4] entre bien d'autres, que des recueils de *Consultations*. À porter aussi au crédit de cette activité médicale le début de formalisation d'une conception moderne de la clinique, auquel s'attache notamment le nom d'Henri Fouquet (1727-1806) qui va synthétiser son œuvre en 1802 dans un célèbre *Discours sur la clinique* [5] et dont l'importance dans l'évolution des idées en médecine a été soulignée par Michel Foucault [6].

Au-delà de la pratique médicale, l'École, dans la fidélité à sa tradition universaliste, tient une place capitale dans l'histoire de la botanique. Fondé en 1593 par Henri IV, plus ancien jardin botanique officiel de France, le Jardin de Montpellier reste dans le giron de l'université



FIGURE 1. Pierre Magnol, Toile de la faculté de médecine Montpellier.



FIGURE 2. François Boissier de Sauvages, Toile de la faculté de médecine Montpellier.

de médecine. Au-delà de son rôle pédagogique, tant pour les étudiants en médecine que pour les élèves apothicaires ou les parfumeurs, il va être le lieu d'avancées importantes dans l'histoire de la botanique, dues à des médecins passionnés par la « science aimable ». On ne peut que citer le nom de Pierre Magnol (1638-1715), qui, avant même de devenir titulaire de l'une des régence de médecine, œuvre au Jardin des plantes et introduit le concept fondamental de famille de plantes dans son *Prodromus* [7]. Magnol (Figure 1) va être le maître de botanistes appelés à un grand avenir sur la scène parisienne, tels Joseph Pitton de Tournefort (1656-1708) et Antoine de Jussieu (1686-1758) puis son frère Bernard (1699-1777). La grande réputation de Magnol lui vaudra de voir son nom donné au Magnolia par l'abbé Plumier (1646-1704), ce que reprendra Linné dans sa nomenclature devenue officielle (*Magnolia grandiflora* L.). Autre grand nom (Figure 2), celui de François Boissier de Sauvages (1706-1767), titulaire de la chaire de médecine des pauvres, mais qui est chargé pendant plusieurs années de l'administration du Jardin (notamment lors de la minorité de Jean-François Chicoyneau). Il propose une méthode de classification basée sur les feuilles, mais est surtout un correspondant assidu de Linné, qui va donner à de nombreux taxons un nom en lien avec Montpellier (*Acer monspessulanus* L., *Cistus monspeliensis* L...). Boissier va en outre lier botanique et médecine d'une façon originale en devenant l'un des fondateurs

de la nosologie, ou science de classification des maladies « à la manière des botanistes » [8,9]. Il s'intéressera d'ailleurs aussi aux applications médicales de l'électricité [10], à la théorie de la circulation, aux fontaines du Languedoc..., éclectisme que l'on retrouve chez nombre de ses collègues. Dans un autre domaine, Gabriel-François Venel (1723-1775) se fait un nom en chimie.

Le monde universitaire ne se limite pas aux titulaires de chaire. Nombre de simples docteurs participent au rayonnement de Montpellier, parfois en tant que démonstrateurs de botanique ou d'anatomie et plusieurs des personnages cités plus haut, Magnol, Boissier de Sauvages, Gouan, Broussonet se sont déjà fait une réputation avant d'accéder au titre professoral. Certains de ces naturalistes vont avoir à prendre en charge le Jardin après la Révolution, tels Antoine Gouan (1733-1821) et Pierre-Marie-Auguste Broussonet (1761-1807). Certains ne seront jamais professeurs, tel l'illustre anatomiste Raymond Vieussens (1641-1715) médecin-chef de l'Hôtel-Dieu Saint Éloi.

Au total, l'université de médecine de Montpellier au XVIII^e siècle reste fidèle à sa tradition universaliste présente en germe dès sa création. Rien ne la résume mieux que le discours que Jean-Antoine Chaptal (1756-1832), docteur en médecine de l'ancienne université, chimiste et pour lors professeur de chimie médicale prononce à la rentrée de l'École de santé le 1^{er} brumaire an V : « Après avoir donné à l'homme une connaissance exacte de son être et de ses facultés [...] ce qu'il importe le plus, c'est de lui fournir les moyens d'être utile à la Société. Or ils sont tous, ces moyens, dans l'art de conserver ou de rétablir la santé, dans l'art de faire prospérer l'agriculture ou d'éclairer les arts [...]. Le médecin paraît donc se diviser ou se multiplier pour ainsi dire, dès qu'il est question d'être utile; il embrasse tous les besoins de la Société pour satisfaire à tous » [11].

S'il est un domaine où le rayonnement de l'École se marque particulièrement, c'est bien celui des théories médicales. Le XVIII^e siècle est en effet une ère de grandes controverses, car les médecins sont placés devant un dilemme : où situer la médecine face aux progrès foudroyants des sciences exactes? Le réductionnisme est la première tentation, prédisant l'annexion complète de la médecine par celles-ci, à l'instar d'Herman Boerhaave (1668-1738) à Leyde, contré par l'animisme de Georg-Ernst Stahl (1659-1734) de Halle qui défend les prérogatives de l'âme. Ces courants trouvent des échos dans l'École, et Boissier de Sauvages défendra successivement l'un et l'autre. Mais Montpellier va surtout se singulariser par son implication dans une troisième voie, médiane, le *vitalisme* [12,13], qui se distingue du réductionnisme par l'affirmation de l'insuffisance des sciences exactes à totalement expliquer le vivant et de l'animisme par l'affirmation de la suffisance des sciences naturelles pour décrire la vie, sans recours à une entité métaphysique. Deux types de vitalisme s'individualisent, l'un promu par Théophile de Bordeu (1722-1776) formé à Montpellier puis exerçant à Paris, l'autre par Paul-Joseph Barthez (1734-1806). Le premier se base sur la *sensibilité*, considérée comme caractéristique du vivant irréductible à la physique ou à la chimie, le second (Figure 3) par la considération d'un *Principe vital*, décalqué dans le monde vivant de la gravitation newtonienne, dont la nature importe peu mais dont l'existence permet d'avancer dans la compréhension du fonctionnement de l'organisme, préfigurant le concept de réflexe, qui émergera au siècle suivant. Le vitalisme va devenir la philosophie médicale dominante de la fin du XVIII^e siècle européen.

Tout ce corps universitaire montpelliérain est proche du milieu encyclopédiste. Bordeu sera le médecin de d'Alembert et Diderot le met en scène dans le *Rêve de d'Alembert*. Nombre de maîtres de l'université contribuent à l'*Encyclopédie* (Barthez, Venel, Fouquet entre autres, ce dernier auteur notamment de l'article *Sensibilité*, qui fera date).

Un élément marquant de l'évolution des professions de santé au XVIII^e siècle est le changement de statut des chirurgiens. La profession réclame une reconnaissance et notamment un accès à la dignité universitaire. Montpellier y contribue, à travers le personnage de François Gigot de Lapeyronie (1678-1747). Né et formé à Montpellier, un temps chirurgien-major de l'Hôtel-Dieu



FIGURE 3. Paul-Joseph Barthez, Toile de la faculté de médecine Montpellier.

Saint Éloi, membre fondateur de la Société royale des sciences, sa carrière se déroule surtout à la Cour, où il succède à Charles-Georges Mareschal (1658-1736) comme premier chirurgien de Louis XV. Tous deux obtiennent en 1731 la création de l'Académie royale de chirurgie. En 1743 un édit promulgué à la demande de Lapeyronie impose la maîtrise ès-arts pour étudier la chirurgie à Paris, mesure que Lapeyronie étend *de facto* à Montpellier : on est bien désormais en présence d'un enseignement universitaire. Dès 1741, Lapeyronie dote quatre charges de démonstrateur, qui seront progressivement étendues à onze, avec le titre de professeurs-démonstrateurs royaux, à la grande fureur de l'université de médecine. Le legs par Lapeyronie à ses confrères montpelliérains du tiers de sa fortune permet de loger somptueusement les chirurgiens dans l'hôtel Saint-Côme inauguré en 1757, siège aujourd'hui de la Chambre de commerce [14,15]. Les professeurs de chirurgie seront ensuite intégrés pour partie lors de la création de l'École de santé en frimaire an III, soudant ainsi définitivement les deux professions.

Les apothicaires ont des désirs analogues sans pouvoir autant concrétiser leurs ambitions et gardent une subordination certaine à l'université de médecine. Ils sont par ailleurs en conflit avec les parfumeurs, qui exercent une activité très prisée. Se met aussi en place une activité de chimie industrielle, qu'illustre Jean-Antoine Chaptal créant l'usine de La Paille en 1782 [16].

Les enseignements scientifiques se trouvant assurés par l'université de médecine, se pose naturellement la question de chaires à destination des ingénieurs et autres professions nécessitant des connaissances scientifiques. C'est le lieu de parler d'une curieuse chaire de mathématiques, créée dans un cadre maritime, rattachée à la faculté de droit et finalement logée et dirigée par les Jésuites [17,18]. Louis XIV avait décidé en 1681 la création dans chaque amirauté d'une chaire de mathématiques et d'hydrographie. Pour le Languedoc, l'implantation avait été prévue à Frontignan et dès 1682 cette chaire est rattachée à la faculté de droit de Montpellier : les cours se déroulent l'été à Frontignan et l'hiver en ville. Le premier titulaire est Nicolas Fizes (1648-1718) avocat, auquel succède son fils Antoine (1689-1765), l'enseignement à Frontignan étant assuré par Jean de Clapiès (1640-1740), membre de la Société royale des sciences jusqu'à la mort de celui-ci. Antoine Fizes étant devenu professeur à l'université de médecine et chargé d'une importante clientèle (c'est lui qui suivra Jean-Jacques Rousseau venu à Montpellier pour un « polype au cœur »), il transmettra sa chaire de mathématiques aux Jésuites, toujours sous l'égide de la faculté de droit jusqu'en 1762. La chaire est absorbée à compter de 1764 par la Société royale des sciences.

Le collège des Jésuites avait d'ailleurs assuré à compter de 1629 la continuité de la faculté des Arts fondée en 1242. Ils maintenaient un haut niveau de culture littéraire, délivraient par moments des titres de licence ou de doctorat et formaient l'élite universitaire.

Au total, on voit l'activité et la diversité du milieu universitaire montpelliérain, poursuivant une longue tradition. Émerge en outre dans l'ambiance du XVIII^e siècle un acteur essentiel des sciences à Montpellier, la Société royale des sciences.

2. La Société royale des sciences

Le mouvement académique se développe précocement en Languedoc : l'académie d'Arles est par exemple fondée par lettres patentes en 1666, celle de Nîmes en 1682.

Il a été récemment montré qu'il s'était formé au milieu du XVII^e siècle une compagnie, de statut privé [19,20], majoritairement composée de réformés, et qui semble correspondre à la « célèbre assemblée » mentionnée sur la page de titre du célèbre ouvrage de Kenelm Digby sur la *poudre de sympathie* [21]. Cette académie disparaît vers 1660 et reste encore bien mystérieuse.

Les origines de la Société royale remontent classiquement à la réunion régulière chez l'évêque Joachim Colbert de Croissy (1667-1738), nommé en 1697 et qui va devenir un pilier du jansénisme, d'un groupe de scientifiques comprenant notamment Pierre Magnol, Jean de Clapiès et François Lapeyronie. Le passage à Montpellier de Sylvain Régis, de l'abbé Picard ou de Jean-Dominique Cassini avait stimulé l'intérêt pour les sciences exactes et incité à établir des ponts avec les sciences de la nature bien représentées au sein de l'université. Cassini avait poussé à la fondation d'une académie et intéressé au projet le chancelier de Pontchartrain et son neveu l'abbé Bignon, bien placé dans l'administration des différentes académies parisiennes. La Société royale des sciences est créée par lettres patentes en février 1706 [22] rassemblant « une Assemblée de Gens de Lettres, sous le nom de Société Royale des Sciences, que nous avons mis & mettons sous notre protection particulière, ainsi que l'Académie Royale des Sciences établie en notre bonne ville de Paris, de laquelle ladite Société ne sera regardée que comme une extension & une partie ». Les membres sont répartis en cinq classes de trois membres chacune : mathématiques, anatomie, chimie, botanique et physique. À ces quinze membres sont adjoints autant d'élèves qui prennent en 1727 le titre d'adjoint. Ces membres sont astreints à la résidence, mais on prévoit six (puis huit) associés honoraires non-résidents, illustres personnages exerçant une sorte de patronage, parmi lesquels est choisi un Président, aidé d'un Directeur et d'un Sous-Directeur. On nommait aussi un Secrétaire perpétuel et un Trésorier. Sont aussi créés des postes d'associés libres, d'associés libres étrangers et des membres correspondants (ces derniers au nombre de 100). Les membres qui ne pouvaient plus assurer leurs fonctions pouvaient demander l'honorariat, alors appelé vétéran. Les Statuts décrivent précisément le fonctionnement de la Compagnie, qui s'assemble tous les jeudis après-midi.

Les membres de la Société sont bien sûr, en nombre, issus des professions de santé et plusieurs sections leur sont évidemment préférentiellement destinées. Louis Dulieu [17] a compté parmi un total de 83 titulaires et adjoints 44 médecins dont 23 professeurs, 7 chirurgiens dont 5 professeurs du collège Saint-Côme et 3 apothicaires. On note par ailleurs trois ecclésiastiques, dont l'abbé Bertholon, et l'abbé Pierre-Augustin Boissier de Sauvages, frère du professeur de médecine. Siègent en outre des magistrats, des ingénieurs, des érudits libéraux, tel Etienne-Hyacinthe de Ratte élu en 1742, passé en 1755 dans la section de mathématiques jusqu'à la Révolution, Secrétaire perpétuel et qui sera la cheville ouvrière de la renaissance de la Compagnie sous la forme de Société libre des Sciences en 1795. Il publiera de nombreux éloges académiques. La présence de membres de la Cour des Comptes, Aides et Finances n'est pas fortuite. Les magistrats érudits de l'époque sont légion (le jeune Montesquieu disserte par exemple, en ses



FIGURE 4. Tour de la Babote à Montpellier, surmontée de l'Observatoire construit par la Société royale des Sciences, © Wiki commons.

premières années à l'Académie de Bordeaux de l'*écho*, ou de l'*usage des glandes rénales*). En outre, plusieurs professeurs de l'université de médecine prennent leurs grades en droit pour acquérir une charge au sein de cette juridiction, utile complément de salaire et de notoriété.

Le fonctionnement de la Société à ses débuts n'est pas facile, notamment car il n'y a pas de local propre. Les séances ont pendant longtemps lieu chez l'un des membres. La Société peut finalement utiliser la tour de la Babote (Figure 4), qui fait encore partie des remparts de la ville, et y fait même édifier au sommet un observatoire, non sans disputes avec la confrérie des pénitents bleus voisine. Finalement la bienveillance de Mgr Dillon (1721-1806) lui permet d'acquérir l'hôtel de Guilleminet, rue de l'Aiguillerie où elle siègera jusqu'à la Révolution.

Il faut bien sûr acheter le nécessaire : livres (finalement 3000 volumes), instruments (et notamment un télescope de 12000 livres offert par le maréchal duc de Biron) ... Des collections naturalistes sont constituées. Se pose aussi la question des publications. Deux volumes d'*Histoire* paraissent en 1766 [22] et 1778 [23], un troisième étant en instance de parution lorsque survient la Révolution. Ces volumes, conformément à leur intitulé, présentent les principaux événements survenus (le tome II s'arrêtant en 1745), mais aussi une sélection des mémoires présentés lors des séances. Des séances publiques ont lieu à l'Hôtel de Ville et sont patronnées par les États de Languedoc, qui publient un certain nombre de mémoires de même que l'Académie des Sciences de Paris. La Société va décerner aussi un prix annuel, et quelques prix occasionnels.

Les liens entre la Société et les États s'intensifient lorsque Mgr Dillon devient archevêque de Narbonne en 1758, et préside de ce fait lesdits États. Ceux-ci instaurent deux cours publics : un cours de chimie confié à Jean-Antoine Chaptal en 1780 et pérennisé en chaire en 1781, de même en 1782 qu'une autre chaire chargée d'un cours de physique pour l'abbé Bertholon. On aménage pour Chaptal le rez-de-chaussée de l'hôtel de Guilleminet. Ces deux cours rencontrent un énorme succès et il faut bientôt aménager dans le voisinage un « Hôtel des cours de physique et chimie ». Ces deux chaires vont subsister jusqu'à la Révolution et on a encore la lettre des citoyens Chaptal et Bertholon de 1793 réclamant à l'administration du district l'arrérage de traitement qui leur était dû.



FIGURE 5. Réunion des États de Languedoc en 1704 à Montpellier, toile de J.B. Martn (1659-1735), Château de Vogüé © Wiki commons.

La Société promeut la culture scientifique et ne dédaigne pas le spectaculaire : c'est ainsi que Louis-Sébastien Lenormand (1757-1837) fait en 1783 du haut de la tour de la Babote un essai de parachute (qu'il aurait en fait limité à des animaux) !

Autour de la Société gravitent un certain nombre d'ingénieurs, dont le meilleur exemple est sans doute Henri Pitot (1695-1771) qui, déjà associé de l'Académie des Sciences de Paris est nommé en 1742 directeur de la sénéchaussée de Nîmes et directeur du canal royal de Languedoc. Outre ses travaux de mathématiques et de physique (dont l'invention du fameux tube éponyme) on lui doit de remarquables ouvrages de génie civil, dont le superbe aqueduc Saint-Clément débouchant sur le château d'eau du Peyrou à Montpellier.

On voit que la Société royale des Sciences fédère monde universitaire et érudits de tous ordres : le premier est principalement composé de naturalistes, les seconds d'astronomes ou physiciens. Tous trouvent dans ces conversations académiques le moyen d'échanger et de féconder mutuellement leur réflexion, à un haut niveau scientifique. Il s'agit en outre d'une institution reconnue du pouvoir royal et partenaire de la Province, qui œuvre à la formation des élites, répand le goût des sciences et fait rayonner internationalement la ville. En marge du savoir, les mêmes personnes se rencontrent dans des lieux de sociabilité, qui contribuent à la structuration du paysage scientifique montpelliérain. C'est ce qu'il faut maintenant envisager.

3. Les lieux de sociabilité

Montpellier tient en Languedoc une place essentielle à côté de Toulouse, siège du Parlement. C'est la résidence de l'intendant, le siège de la Cour des Comptes, Aides et Finances, et les États de la province y siègent fréquemment, et constamment à partir de 1737 (Figure 5). Ces États sont une assemblée délibérante, qui vote l'impôt versé au Roi, mais qui joue aussi un grand rôle dans le pilotage des travaux publics (canaux, place du Peyrou...) et, on l'a vu avec la création des cours de physique et de chimie, dans la politique culturelle et scientifique de la province.

Il est donc évident que la vie sociale et mondaine à Montpellier se doit d'être intense. Les riches familles d'universitaires ou de magistrats se font édifier de somptueux hôtels où ils organisent des réceptions fastueuses. Il nous en reste, entre bien d'autres, un témoignage très vivant

dans les *Mémoires* de René Dufriche Desgenettes (1762-1837), le futur médecin-chef de l'expédition d'Égypte puis de l'armée impériale [24]. Celui-ci séjourne à Montpellier plusieurs mois, de 1789 à 1791 et y passe sa thèse. Il publiera en 1811 un certain nombre de mémoires académiques montpelliérains [25] et prononcera l'éloge funèbre de Barthez lors de la mort de celui-ci en 1806. Il nous fait bien sûr assister aux événements souvent violents de la Révolution, mais met aussi en scène toute la bonne société, qui oscille entre enthousiasme, scepticisme ou consternation, et qui est traversée de fortes tensions.

C'est ainsi qu'il nous livre le récit d'un dîner chez la marquise de Marnésia, qui éclaire une autre dimension de convivialité de toute cette société : la franc-maçonnerie : « Les francs-maçons assez nombreux qui se trouvaient à ce dîner se mirent à rire, et nous ne craignîmes cependant, en aucune manière, que la marquise de Marnésia eût pénétré nos secrets¹ ».

L'implantation de la franc-maçonnerie à Montpellier est importante, dépendante du Prieuré de Septimanie d'une part, du Grand Orient d'autre part [26]. Le rite écossais s'implante à partir de 1779. Le nombre des loges fluctue selon les périodes, mais on compte neuf loges en activité en 1785. Il existe une nette séparation socio-professionnelle dans le recrutement de chacune d'entre elles, sans que la proportion de membres issus de la l'université ou de la Société royale des Sciences soit précisée. On peut cependant noter que Chaptal et Auguste Broussonet sont maçons.

Cette appartenance maçonnique n'empêche pas de faire partie de confréries d'orientation religieuse et notamment des Pénitents, si caractéristiques, encore aujourd'hui, de la France méridionale. Les Pénitents sont des laïcs, qui s'engagent dans des activités religieuses et charitables. Ils se regroupent en confrérie, souvent dénommées de la couleur de leur tenue dénommée froc ou sac. Ces confréries partagent un certain nombre d'aspiration des loges, dont la fraternisation des différentes couches de la société, bien que l'égalité des conditions y soit bien plus réelle alors que les loges pratiquent une ségrégation sociale beaucoup plus nette. C'est ainsi que les pénitents se dénomment « frères » et que la tenue comprend d'amples manchettes de dentelle afin de ne pouvoir identifier le statut social de celui qui la porte. De 1780 à 1792 on compte 585 réceptions dont 393 de statut social connu dont 26 nobles, 36 ecclésiastiques, 11 chirurgiens et professeurs, 22 négociants [27]. Deux confréries sont actives à Montpellier, les bleus et les blancs. Ces derniers ont la prééminence. Le jeune Jean-Jacques Régis de Cambacérès (1753-1824), futur deuxième Consul, magistrat de la Cour des Aides, est membre à la fois d'une loge affiliée au Grand Orient et des Pénitents blancs, dont il est même élu prieur en 1790. De nombreux noms déjà cités se retrouvent dans les registres de cette confrérie : François Chicoyneau, François Gigot de Lapeyronie, Henri Pitot...

Nul doute que dans ces lieux de sociabilité se poursuivent les échanges, y compris scientifiques, des assemblées universitaires ou des séances de la Société des sciences, publiques ou privées.

Le Montpellier scientifique apparaît ainsi comme un milieu extrêmement vivant, juxtaposant une tradition ancienne de science, d'enseignement et d'humanisme, une vision globalisante de ce que Barthez dénomme la *Science de l'Homme* [28] et le mouvement général des sciences au XVIII^e siècle où les académies, les salons, les amateurs éclairés et les liens avec l'*Encyclopédie* jouent un rôle essentiel. L'abbé Bertholon y trouve naturellement sa place.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que son organisme de recherche.

¹ *Mémoires*, T.II, p. 60.

Références

- [1] T. Lavabre-Bertrand, « La fondation de l'Université de médecine de Montpellier, 17 août 1220 », *Hist. Sci. Méd.* **II** (2020), p. 123-136.
- [2] L. Dulieu, *La médecine à Montpellier T.III, L'époque classique*, Les Presses Universelles: Avignon, 1983 et 1986.
- [3] J. A. Chaptal, *Mes souvenirs sur Napoléon*, Plon: Paris, 1893.
- [4] P. Chirac, *Observations générales sur les inconvénients auxquelles sont sujets les équipages des vaisseaux et la manière de les traiter*, Imprimerie Royale: Paris, 1724.
- [5] H. Fouquet, « Discours », in *Recueil de discours, prononcés à la faculté de médecine de Montpellier, par des professeurs de cette faculté*, Vve Picot: Montpellier, 1820, p. 109-219.
- [6] M. Foucault, *Naissance de la clinique. Une archéologie du regard médical*, Presses universitaires de France: Paris, 1963.
- [7] P. Magnol, *Prodromus historiae generalis plantarum, in quo familiae plantarum per tabulas disponuntur*, Gabriel & Pech: Montpellier, 1689.
- [8] F. Boissier de Sauvages, *Nouvelles classes de maladies où dans un ordre semblable à celui des Botanistes comprennent les genres et les espèces de toutes les Maladies, avec leurs signes & leurs indications*, d'Avanville: Avignon, 1731.
- [9] F. Boissier de Sauvages, *Nosologia methodica sistens morborum classes, genera et species, juxta Sydenhami mentem et Botanicorum ordinem*, Frères De Tournes: Amsterdam, 1763.
- [10] F. Boissier de Sauvages, *Mémoire historique sur les effets de l'électricité dans la cure des rhumatismes, sciatiques et autres douleurs, assemblée publique de la Société royale des Sciences de Montpellier du 16 décembre 1759*, J. Martel: Montpellier, 1752.
- [11] J. A. Chaptal, « Discours de rentrée », in *Recueil de discours, prononcés à la faculté de médecine de Montpellier, par des professeurs de cette faculté*, Vve Picot: Montpellier, 1820, p. 11-12.
- [12] T. Lavabre-Bertrand, « Le vitalisme de l'École de Montpellier », in *Repenser le vitalisme* (P. Nouvel, ed.), PUF: Paris, 2011, p. 57-71.
- [13] C. Wolfe, *La philosophie de la biologie avant la biologie : une histoire du vitalisme*, Garnier: Paris, 2019.
- [14] A. Germain, *Les maîtres chirurgiens de l'École de chirurgie de Montpellier*, Boehm: Montpellier, 1880.
- [15] L. Dulieu, *La chirurgie à Montpellier*, Presses Universelles: Avignon, 1975.
- [16] C. Charlot et J. L. Bérard, *La Paille à Montpellier une manufacture de produits chimiques et pharmaceutiques 1782-1879*, AVL diffusion: Montpellier, 2011.
- [17] L. Dulieu, « Le mouvement scientifique montpelliérain au XVIII^e siècle », *Rév. Hist. Sci. Appl.* **11** (1958), p. 227-249.
- [18] M. Flahault, « Histoire de l'enseignement scientifique à Montpellier avant la création de la faculté des sciences en 1809 », *Études Hérault.* **53** (2019), p. 49-62.
- [19] S. Mazauric, « Une Académie très discrète : l'Académie de Montpellier (1648?–1665?) », *Dix-Septième siècle* **12** (2021), p. 31-44.
- [20] C. Nique, « À propos d'une toute première académie à Montpellier aux alentours de 1650 : certitudes historiques et interrogations », *Bull. Acad. Sci. Lett. Montpellier* **54** (2023), p. 283-312.
- [21] K. Digby, *Discours fait en une célèbre assemblée par le chancelier de la Reine de la Grande Bretagne etc. touchant à la guérison des playes par la poudre de sympathie*, Augustin Courbe: Paris, 1657.
- [22] *Histoire de la Société royale des Sciences établie à Montpellier, avec les Mémoires de mathématiques et de physique tirés des registres de cette Société*, Duplain: Lyon, 1766, p. 11-24.
- [23] *Histoire de la Société royale des Sciences établie à Montpellier, avec les Mémoires de mathématiques et de physique tirés des registres de cette Société*, Jean Martel aîné: Montpellier, 1778.
- [24] R. N. Dufriche Desgenettes, *Souvenirs de la fin du XVIII^e siècle et du commencement du XIX^e, ou Mémoires de R. D. G.*, Firmin Didot: Paris, 1835. T.II, *Ibid.*, 1836.
- [25] R. N. Dufriche Desgenettes, *Éloge des académiciens de Montpellier, recueillis, abrégés et publiés par M. le baron Des Genettes, pour servir à l'histoire des sciences dans le XVIII^e siècle*, Bossange et Masson: Paris, 1811.
- [26] C. Rouzet, « Les francs-maçons à l'Orient de Montpellier (1750–1820) », *Études Hérault.* **25–26** (1996), p. 125-130.
- [27] C. Reboul, « Essai pour une étude sociale de la confrérie des Pénitents Blancs de Montpellier à la fin du XVIII^e siècle (1780–1792) », *Études Hérault.* **7–8** (1992), p. 125-132.
- [28] P. J. Barthez, *Nouveaux Éléments de la Science de l'Homme*, Martel aîné: Montpellier, 1778. 2^e édition revue et augmentée, vol. 2, Paris, Goujon, 1806.



Article de synthèse / *Review article*

Le foudroisement des avions : compréhension, impacts et protection

Aircraft lightning strikes: understanding, impacts, and protection

Philippe Lalande ^a

^a DPHY, ONERA, Université Paris Saclay, F-91123 Palaiseau, France

Courriel : philippe.lalande@onera.fr

Résumé. Les campagnes en vol des années 1980 ont montré deux mécanismes intervenant lors du foudroisement d'un avion. L'un correspond à l'interception d'un éclair naturel par l'avion et l'autre, au déclenchement de l'éclair par l'avion lui-même. Dans ce dernier cas, deux traceurs foudre se forment depuis les zones de renforcement du champ électrique atmosphérique sur l'avion. Après cette phase durant laquelle l'avion s'est peu déplacé, l'éclair poursuit son développement pendant une durée d'environ 1 seconde. Les canaux de l'éclair restent immobiles dans l'air, tandis que l'avion continue d'avancer. Le pied d'arc se déplace alors à la surface de l'avion pour compenser l'avancée de l'aéronef.

Le retour d'expérience des aviateurs et des compagnies aériennes révèle que, dans la grande majorité des cas, le foudroisement se produit durant les phases d'approche, de descente ou de décollage. Seulement 8 % des foudroissements entraînent des effets jugés importants sur l'avion, car ils impactent des éléments critiques. Le foudroisement d'un avion produit les effets directs et indirects sur l'appareil.

Pour garantir la sécurité d'un avion, les autorités de l'aviation civile exigent qu'un avion civil soit protégé à la foudre pour être certifié et résister à des courants impulsionnels de 200 kA.

L'allègement des avions par l'utilisation des matériaux composites conduit à une meilleure compréhension de l'interaction de la foudre avec ces matériaux et avec les nouvelles géométries d'aéronefs. Cela permettra d'élaborer des solutions techniques optimisées du point de vue de la masse, des marges de conception, des délais et coûts de développement et de certification.

Abstract. In-flight campaigns in the 1980s revealed two mechanisms involved in aircraft lightning strikes. One corresponds to the interception of natural lightning by the aircraft, and the other to the triggering of lightning by the aircraft itself. In the latter case, two lightning leaders form from areas of atmospheric electric field enhancement on the aircraft. After this phase, during which the aircraft has moved little, the lightning continues to develop for approximately 1 second. The lightning channels remain stationary in the air, while the aircraft continues to advance. The arc foot then moves along the surface of the aircraft to compensate for the aircraft's forward motion.

Feedback from aircraft manufacturers and airlines indicates that, in the vast majority of cases, lightning strikes occur during the approach, descent, or takeoff phases. Only 8% of lightning strikes cause effects deemed significant on the aircraft, as they impact critical components. A lightning strike on an aircraft produces both direct and indirect effects on the airframe.

To ensure aircraft safety, civil aviation authorities require civil aircraft to be lightning-protected to be certified and to withstand impulse currents of 200 kA.

The lightning of aircraft through the use of composite materials necessitates a better understanding of lightning's interaction with these materials and with new aircraft geometries. This will allow for the development of optimized technical solutions in terms of mass, design margins, and development and certification timelines and costs.

Mots-clés. Foudroiement, Éclair, Protection.

Keywords. Lightning, Aircraft, Protection.

Manuscrit reçu le 7 juillet 2025, révisé le 8 septembre 2025, accepté le 11 septembre 2025.

1. Introduction

Au niveau des civilisations et des croyances, l'orage et les éclairs ont toujours suscité un mélange de fascination, crainte et de vénération. La nature soudaine de ces phénomènes, leur puissance destructrice et leur lien avec le ciel les ont souvent associés, dans l'antiquité et la mythologie, à des manifestations directes de la volonté divine.

Il a fallu attendre le Siècle des Lumières, caractérisé par une effervescence intellectuelle, pour que les croyances soient remises en question au profit des observations et du raisonnement. C'est au cours de cette période, marquée par des avancées scientifiques majeures, que les premières notions sur l'effet de l'électricité sur son environnement apparaissent, avec notamment l'électro-culture par l'abbé Bertholon [1], l'électrophysiologie avec Luigi Galvani [2], la pile électrique avec Alessandro Volta [3] et la démonstration en 1752, par Benjamin Franklin, de la nature électrique du nuage orageux grâce à son expérience du cerf-volant. A cette époque, la compréhension des phénomènes électriques est encore sommaire et en perpétuelle évolution comme le montre le recueil de sa correspondance avec d'autres scientifiques [4]. Dans sa correspondance du 29 avril 1749 avec Peter Collinson, un marchand Londonien de la Royal Society, il émet l'idée d'attirer la foudre avec des tiges métalliques pointues pour protéger des bâtiments; la notion de paratonnerre est née. Il remet en question le principe du fonctionnement du paratonnerre, dans sa lettre du 27 juillet 1750, où il explique à ce même Peter Collinson, qu'une tige en fer pointue reliée à la terre par un fil conducteur, permettra de « tirer silencieusement » le feu électrique des nuages pour prévenir les éclairs et le bruit du tonnerre qui y est associé.

C'est également à la fin de ce XVIII^e siècle qu'en Europe, l'homme se lance à la conquête du ciel en essayant de vaincre la gravité terrestre. Le 4 juin 1783 à Annonay, en France, les frères Montgolfier font la démonstration qu'un ballon non habité de 800 m³ gonflé à l'air chaud peut s'élever de 400 m et parcourir plusieurs kilomètres pendant une dizaine de minutes. Ils seront suivis le 27 août 1783 par le physicien Jacques Charles et les frères Robert avec l'expérimentation d'un ballon à hydrogène sur le Champ-de-Mars. Une nouvelle étape est franchie, le 19 septembre 1783 par le vol à Versailles d'un canard, d'un coq et d'un mouton emportés par un ballon. Une dernière étape est franchie, le 21 novembre 1783 par le vol sous un ballon, au château de la Muette, du marquis d'Arlandes et de Pilatre de Rozier. C'est le début de l'aérostation où les aéronefs cherchent principalement à être plus légers que l'air. Il faudra attendre les frères Wright, le 17 décembre 1903, pour avoir la première démonstration du premier vol motorisé et soutenu d'un aéronef plus lourd que l'air.

La cohabitation de ces nouvelles technologies avec l'environnement atmosphérique dans lequel elles évoluent n'est pas neutre comme le montre la mort du physicien Georg Wilhelm Richmann le 6 août 1753 lors d'un orage au-dessus de Saint-Petersbourg. Ce jour-là, ce passionné des travaux de Franklin reproduisait l'expérience du cerf-volant pour mesurer l'électricité qui circulait sur le fil. Un éclair frappa le cerf-volant ce qui conduisit à l'électrocution de Georg Wilhelm Richmann. Il s'agit du premier évènement recensé de la foudre frappant un objet volant captif et de ses conséquences mortelles.

Dès le début de l'aviation, des témoignages oraux font état du foudroiement d'aéronefs même s'il est difficile d'apporter des preuves concrètes de leur existence car les enquêtes et enregistrements d'incidents étaient moins systématiques qu'aujourd'hui. Le premier incident recensé est

le foudroiement du dirigeable allemand LZ40 le 3 septembre 1915, au large de l'île de Neuwerk, en Allemagne alors qu'il libérait de l'hydrogène. Le dirigeable a été complètement détruit. Pour les avions, certains experts ont nié la possibilité qu'un aérodyne puisse être foudroyé. L'écrasement d'un Ford Tri-Motor de la Transcontinental Air Transport, surnommé "City of San Francisco", le 3 septembre 1929, est souvent cité comme le premier cas d'un avion plus lourd que l'air détruit par la foudre. Au fil du temps, avec l'augmentation du trafic aérien après la Seconde Guerre mondiale, les observations de foudroiement d'avions se sont multipliées. Le dernier accident majeur impliquant un avion de transport civil est recensé le 8 décembre 1963 avec l'écrasement du vol Pan Am 214 (Boeing 707) reliant l'aéroport de San Juan de Porto Rico aux aéroports de Baltimore et Philadelphie, aux États-Unis. L'analyse des débris de l'appareil retrouvés près d'Elkton dans le Maryland (États-Unis) indique aux enquêteurs que l'accident est probablement dû à l'explosion de l'aile gauche à la suite de l'inflammation des vapeurs de carburant d'un des réservoirs lors du foudroiement. Cet accident, qui a coûté la vie à 81 personnes (passagers et membres d'équipage), a conduit à un durcissement des règles de conception des avions afin d'éviter que ce phénomène ne se reproduise.

L'objet de cet article est de vous décrire le foudroiement des avions en commençant par la physique de la foudre à travers la formation des nuages orageux et de leur électrisation. Dans une seconde partie, les mécanismes conduisant au foudroiement d'un avion seront décrits. Dans une troisième partie, l'impact du foudroiement sur les avions et la certification à la foudre seront présentés. Une dernière partie présentera les enjeux et évolutions de la problématique foudre pour l'aéronautique.

2. Rappels sur la physique de la foudre

2.1. Rappels sur la formation des orages et de leur charge électrique

Les conditions atmosphériques propices aux orages nécessitent de l'air chaud et humide dans les basses couches de l'atmosphère et de l'air froid en altitude. Lorsque le gradient vertical thermique est suffisant, la masse d'air devient instable. L'air chaud, moins dense, s'élève alors en altitude par la poussée d'Archimède. Au fur et à mesure de son élévation, cet air se refroidit, ce qui provoque la condensation de la vapeur d'eau. Cette condensation libère la chaleur latente qui réchauffe l'air et entretient le mouvement ascendant. Ainsi l'énergie d'un nuage orageux est principalement stockée dans l'humidité de l'air sous forme de chaleur latente, qui se libère lors de la condensation de la vapeur d'eau. Cette énergie alimente les mouvements violents de l'air, dont la vitesse ascendante peut dépasser les 40 m/s.

La Figure 1, extraite et traduite de l'article de Morrison et al. [5], illustre les processus microphysiques qui se déroulent au sein de cette masse d'air. L'air humide est aspiré à la base du nuage par convection. En montant en altitude, la vapeur d'eau se condense sur des noyaux de condensation, formant des gouttelettes. Ces dernières grossissent par coalescence et sont transportées à des altitudes où la température est inférieure à 0°, se transformant en une grande variété de particules glacées. Lorsque la masse des particules devient trop importante, le courant ascendant ne suffit plus à les maintenir en l'air et elles précipitent alors vers le sol. Dans leur chute, elles entrent en collision avec les particules ascendantes. Le nuage d'orage est donc le siège d'un important brassage entre les différentes espèces microphysiques. Le résultat de ces collisions est l'apparition de charges électriques sur les particules microphysiques, par effet triboélectrique [6]. Les plus petites particules deviennent chargées positivement et sont transportées vers le sommet du nuage, tandis que les plus grosses, chargées négativement, précipitent vers sa base. Ce mécanisme de séparation de charges [6] conduit à des répartitions de charges électriques complexes dans le nuage comme l'illustre l'article de Stolzenburg et al. [7]. La répartition des charges est

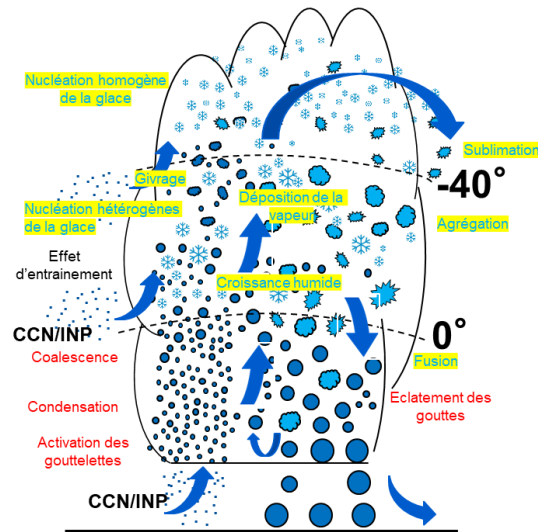


FIGURE 1. Illustration schématique des processus microphysiques à l'intérieur d'un cumulonimbus extrait et traduit de Morrison et al. [5]. CCN : Cloud Condensation nuclei (Noyaux de condensation). INP : Ice Nucleating Particle (Noyaux pour la nucléation des particules glacées).

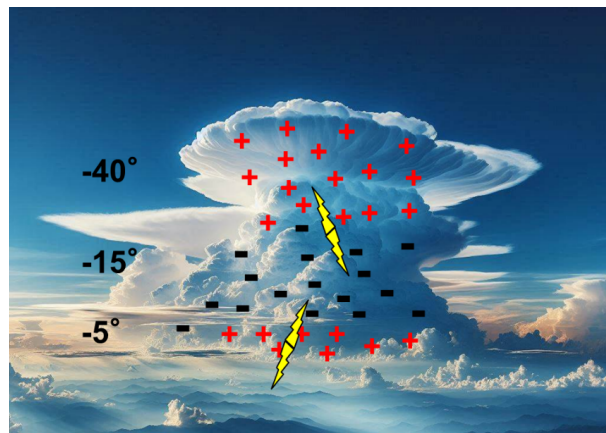


FIGURE 2. Illustration simplifiée de la répartition des charges électriques dans un nuage d'orage avec la présence d'éclairs intra-nuage et nuage-sol.

généralement simplifiée par une structure électrique tripolaire comme illustrée sur la Figure 2. La petite charge positive à la base du nuage est la résultante de la convection jusqu'à la base du nuage, des charges positives formées au sol par l'effet du champ électrique produit par le nuage.

Dans les zones de séparation des charges, le champ électrique est le plus intense. A partir de sondages atmosphériques effectués par ballons au sein des orages, Marshall et al. [8] ont déduit que les éclairs s'initient spontanément dans des zones où le champ électrique est d'environ 350δ kV/m, où δ est la densité relative de l'air par rapport au sol ($\delta = (P/P_o)(T_o/T)$, P_o , T_o sont les valeurs de la pression et de la température au niveau de la mer et P , T à l'altitude considérée).

Cela produit une majorité d'éclairs intra-nuage et dans 10 % des cas, des éclairs se forment entre le nuage et le sol, partie des éclairs observables lors d'un orage.

2.2. *Rappels sur le développement des éclairs*

L'éclair, lorsqu'il touche le sol, est un phénomène facilement observable par tout le monde que notre perception résume à un évènement lumineux bref, suivi par le bruit du tonnerre. L'éclair étant très bref et éloigné, nous ne percevons qu'une infime partie des phénomènes qui s'y déroulent. Avec des caméras rapides et mieux résolues spatialement, la partie visible de l'éclair nuage-sol révèle un processus complexe qui est composé de plusieurs étapes :

- **Traceur ou précurseur de la foudre** : C'est une décharge électrique constituée d'un canal ionisé conducteur qui se propage dans la majorité des cas vers le sol. Le traceur peut être positif, s'il se propage dans la direction du champ électrique produit par le nuage d'orage, ou négatif si sa propagation va en direction inverse de ce champ électrique. Les vitesses caractéristiques des traceurs se situent entre 10^4 et 10^5 m/s [9,10]. Ces traceurs sont similaires aux grandes étincelles de plusieurs mètres produites en laboratoire par des impulsions de tension de plusieurs millions de volts. L'étude de ces décharges, étudiées intensivement en laboratoire [11-14] pour le dimensionnement des lignes à haute tension de transport électrique, a montré l'importante différence de propagation entre les décharges positive (traceur positif) et négative (traceur négatif). Cette dernière se déplace par bonds de quelques mètres en laboratoire et de quelques dizaines de mètres lors d'un éclair, se produisant de façon aléatoire toutes les 10 à 100 μ m. La Figure 3 montre quatre images en négatif prises lors de la propagation du précurseur négatif du coup de foudre du 27 juillet 2013 au-dessus de Paris. L'origine des temps est imposée au moment de la connexion (Figure 3d). Ce traceur est constitué d'une multitude de branches à l'extrémité desquelles les processus d'ionisation se forment (Figure 3a, b, c). On constate que l'intensité des canaux varie au cours de son développement. A chaque avancée par bond d'une des branches, une impulsion de courant de quelques centaines (laboratoire) à quelques milliers (éclair) d'ampères est mesurée. Par opposition, la décharge positive, quant à elle, se propage de façon continue comme le montre la Figure 4 sur l'éclair positif du 23 juillet 2013 au-dessus de Paris. Contrairement à la polarité négative, ce traceur est très peu branché et son canal est illuminé en continu tout au long de sa propagation. Un point important à noter est qu'en laboratoire, les mesures ont montré qu'il fallait appliquer une tension deux fois plus grande pour faire propager la décharge négative sur la même distance que pour la décharge positive [11,12].
- **Eclair** : Une fois que le traceur atteint le sol, il établit un court-circuit entre le nuage et le sol qui permet le passage d'impulsions de courant de plusieurs dizaines de kiloampère et d'une durée de quelques dizaines de microseconde dont les caractéristiques sont résumées entres autres dans les articles et livres [9,10,15]. Ce courant très intense et très bref provoque par chauffage de l'air le flash lumineux et l'onde de choc acoustique appelée tonnerre [9,10].

Une des énigmes sur le développement des éclairs était de savoir comment ce traceur descendant, issu du nuage, pouvait se propager et quel phénomène, caché à notre vue, se produisait au sein du nuage pour alimenter cette décharge électrique. Au niveau mythologique, l'image de Zeus lançant les éclairs depuis les nuages apportait une réponse simple. A notre époque, on comprenait qu'une décharge puisse se développer depuis l'électrode d'un générateur haute tension. Malheureusement, dans le nuage d'orage, il n'y a pas de générateur électrique à proprement parler, mais uniquement de l'air et des charges électriques sur des hydrométéores très

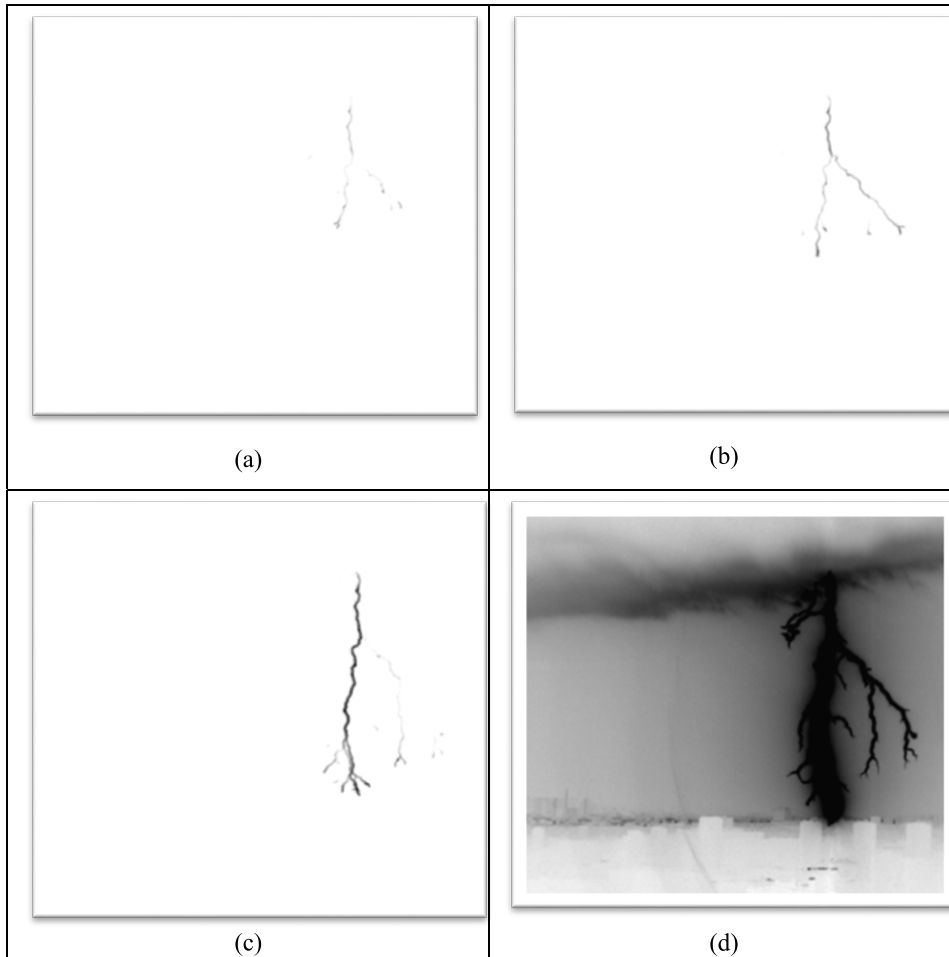


FIGURE 3. Images en négatif extraites d'une vidéo rapide à 14 000 i/s montrant la descente du précurseur négatif. L'origine des temps pour les images est prise par rapport à l'instant de connexion. Eclair du 27 juillet 2013 à 04h01 UTC au-dessus de Paris (a) $-1428 \mu\text{s}$ (b) $-928 \mu\text{s}$ (c) $-214 \mu\text{s}$ (d) $0 \mu\text{s}$.

faiblement mobiles. Cela ne suffit pas à entretenir le développement d'une décharge seule. Kase-mir [16] a été le premier à imaginer, à partir d'une description électrostatique, comment des décharges peuvent se propager dans un nuage. Il a proposé le concept de doubles décharges électriques de polarité opposée qui s'auto-alimentent (Figure 5a). Avec l'avènement des imageurs VHF d'éclair [17-30], il a été possible de visualiser la propagation du traceur négatif et de déduire la position des canaux associés au traceur positif. Le coup au sol n'est finalement que le résultat minoritaire (10 à 20 % des cas) de la propagation jusqu'au sol d'un des deux traceurs (Figure 5b).

3. Le Mécanisme de Foudrolement d'un Avion

3.1. Les campagnes en vol pour l'étude du foudrolement

La fin des années 60 marquent l'essor de l'aviation commerciale avec l'arrivée des familles B737 et B747. Les avions, construits en métal, deviennent également de plus en plus complexes.



FIGURE 4. Images extraites d'une vidéo rapide à 14 000 i/s montrant la descente du pré-curseur positif. L'origine des temps pour les images est prise par rapport à l'instant de connexion. Eclair du 23 juillet 2013 à 13h31 UTC au-dessus de Paris (a) $-1286 \mu\text{s}$ (b) $-714 \mu\text{s}$ (c) $-143 \mu\text{s}$ (d) $0 \mu\text{s}$.

C'est aussi durant cette décennie qu'un B707 connaît une explosion catastrophique en vol lors d'un foudroiement, rappelant ainsi le danger lié à ce phénomène.

Les années 80 sont marquées par plusieurs avancées technologiques majeures dans l'aviation civile. Alors que l'utilisation de matériaux composites, comme la fibre de carbone, était limitée jusqu'aux années 70, à des composants secondaires non structuraux (carénages, ailerons) en raison de leur légèreté, ces matériaux commencent à être intégrés, bien que de façon limitée, aux structures primaires, notamment dans certaines parties de la voilure et du fuselage. C'est également à cette période que les commandes de vol électriques sont utilisées pour la première fois sur le programme de l'AIRBUS A320.

En parallèle, les premières normes et réglementations spécifiques à la protection contre la foudre se développent progressivement, au fur et à mesure des avancées technologiques et d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques. Cette dernière reste cependant très limitée et s'appuie exclusivement sur les observations faites sur les éclairs nuage-sol.

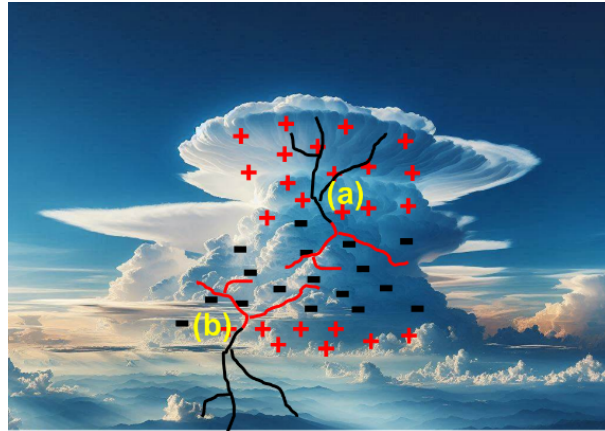


FIGURE 5. Illustration schématique du développement d'un éclair à partir de deux traceurs de polarité différente. En noir sont indiqués les canaux du traceur négatif et en rouge ceux du positif. (a) double traceurs se développant au sein du nuage entre les deux poches de charge. (b) Double traceurs dont le traceur négatif dans cet exemple se connecte au sol.

Pour franchir un cap, la NASA met en place le programme NASA NF-106B N816NA [31]. Il consiste, de 1980 à 1984, à réaliser des campagnes en vol dédiées pour étudier le foudroiement des aéronefs. L'avion utilisé est un F106B instrumenté (Figure 6a). Durant cette période, le F106B a volé à travers 1496 nuages d'orage au cours de 195 vols. Il a été foudroyé 714 fois. Il détient le record de 72 foudroiements en un vol à 11 km d'altitude au-dessus de la Caroline du Nord aux États-Unis en juillet 1982. La Figure 6b montre l'altération de la peinture au début des campagnes après des foudroiements. Les chercheurs notent que la présence de peinture conduit à augmenter les dommages en produisant des points brûlés et fondus sur le fuselage, non observés sur des parties non peintes. Aussi, la peinture de l'avion est enlevée pour le reste des campagnes. Lors de ces campagnes, il a été observé que, sur cet avion, les foudroiements étaient dix fois plus fréquents au-dessus de 6 km qu'en dessous. Au cours de ces vols, des photographies étaient réalisées comme le montre la Figure 7 où l'on voit une partie de l'éclair attachée à l'arrière de l'avion. Lors de chaque foudroiement, des mesures étaient également réalisées pour analyser les effets de la foudre sur les commandes électroniques. L'acquisition se faisait sur des fenêtres de quelques centaines de microsecondes à comparer à une durée d'éclair pouvant atteindre une seconde. Ces mesures ont apporté des éléments pour évaluer les niveaux de contraintes électriques au niveau des systèmes électriques mais ne permettaient pas de comprendre les phénomènes qui conduisaient à un foudroiement.

Face à cette limite, deux autres programmes de campagnes en vol sur le foudroiement ont été mis en place à la suite de celui de la NASA. Le premier, mené par l'US Air Force à partir d'un avion CONVAIR CV580, s'est déroulé de 1984 à 1985 et le second, mené en France par la Direction Générale de l'Armement (DGA) avec l'ONERA, DGA Essais en vol et DGA Techniques Aéronautiques, a utilisé un avion TRANSALL C160 de 1984 à 1988. Ces avions de transport avaient la capacité d'embarquer une instrumentation plus grande que celle du F106B en raison de leur taille, par contre leur domaine de vol était plus restreint (altitude de vol maximale inférieure à 5000 m, vitesses inférieures à 100 m/s) en comparaison de celui du F106B.

Le TRANSALL, comme l'illustre la Figure 8, était équipé en 1988 de l'instrumentation suivante :

- quatre perches pour mesurer le courant de l'éclair, lorsqu'au moins un pied d'arc d'éclair était attaché à l'une des perches ;



FIGURE 6. Images du F106B utilisée par la NASA pour les campagnes en vol sur l'étude du foudrolement de 1980 à 1984. (a) Image avant les campagnes en vol (Source NASA). (b) Image après un certain nombre de foudrolements (Source NASA). (c) Image du F106B après le retrait de sa peinture (Source NASA).



FIGURE 7. Photographie vue du cockpit de l'éclair foudroyant le F106B (Source NASA).

- de moulins à champ électrostatique (FM) avec une largeur de bande du DC à 40 Hz pour mesurer le champ électrostatique produit par le nuage d'orage au moment du foudrolement.
- de capteurs électromagnétiques (E,H) positionnés de façon symétrique sur l'avion et ayant respectivement des bandes passantes de 5 Hz à 5 MHz et de 300 Hz à 5 MHz. Ils ne mesurent que le champ électromagnétique à l'emplacement du capteur. Il est également important de noter qu'ils ne mesurent que les variations du champ électromagnétique (Voir fréquence de coupure basse). Par convention, le champ électrique varie positivement lorsque la variation de charge électrique négative augmente.
- de caméras (C) dont l'une sous l'aile pour filmer l'interaction de l'éclair sur l'avion ;

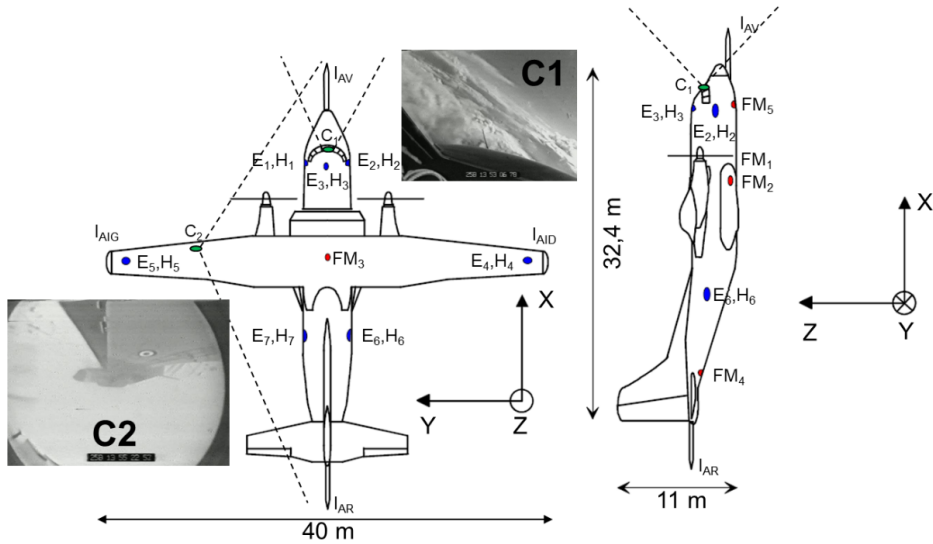


FIGURE 8. Illustration des capteurs embarqués sur le TRANSALL. E_X , H_X : E capteur de champ électrique rapide N°X, H capteur de champ magnétique rapide N°X. I_{AV} , I_{AR} , I_{AID} , I_{AIG} perches pour la mesure du courant foudre et de sa dérivée. FM_X : moulin à champ électrostatique N°X. $C^\circ X$ est la caméra N°X. C_1 est la caméra au niveau du cockpit et C_2 la caméra sous l'aile gauche. Les lignes en pointillé montrent l'angle de vue des caméras.

Pour le courant et les mesures électromagnétiques, les durées d'acquisition se faisaient sur plusieurs centaines de millisecondes, permettant ainsi de capter tous les signaux intervenant lors d'un foudroiement. Les caméras et les moulins à champ fonctionnaient en continu. Le bilan de ces campagnes est de 31 foudroiements enregistrés sur CONVAIR en 1985 et de 11 foudroiements sur TRANSALL en 1988.

3.2. L'initiation du foudroiement sur avion

L'analyse des mesures électriques montre qu'il y a deux types de signature conduisant à un foudroiement dont l'interprétation a été faite par Mazur [32] à partir d'une approche électrostatique. Le premier scénario, associé à 90 % des foudroiements [33], est illustré à la Figure 9. Il se produit quand le champ électrostatique, généré par le nuage d'orage et mesuré par les moulins à champ [34], atteint une valeur autour de 100δ kV/m (δ densité relative de l'air par rapport au niveau de la mer). On mesure alors sur tous les capteurs électriques E_1 à E_7 , la même variation du champ électrique avec des niveaux dépendant de la position du capteur sur l'avion (facteur géométrique).

Juste avant le début du foudroiement au temps t_a , l'avion est polarisé électriquement par le champ électrostatique du nuage E_o , comme illustré à la Figure 9. La ligne pointillée L_1 schématise la ligne de séparation entre les charges électriques positives et négatives sur la surface de l'avion. Comme la décharge positive s'amorce plus facilement que la décharge négative, la variation du champ électrique sur la surface entre les temps t_a et t_b est associée au démarrage et au développement du traceur positif. Il se propage à une vitesse comprise entre 10^4 m/s et 10^5 m/s dans la direction du champ électrostatique du nuage E_o pendant une durée d'environ 4 ms. Pendant cette propagation, ce traceur injecte de la charge négative dans l'avion ce qui conduit par convention sur les capteurs à avoir une variation positive du champ électrique. Cette charge

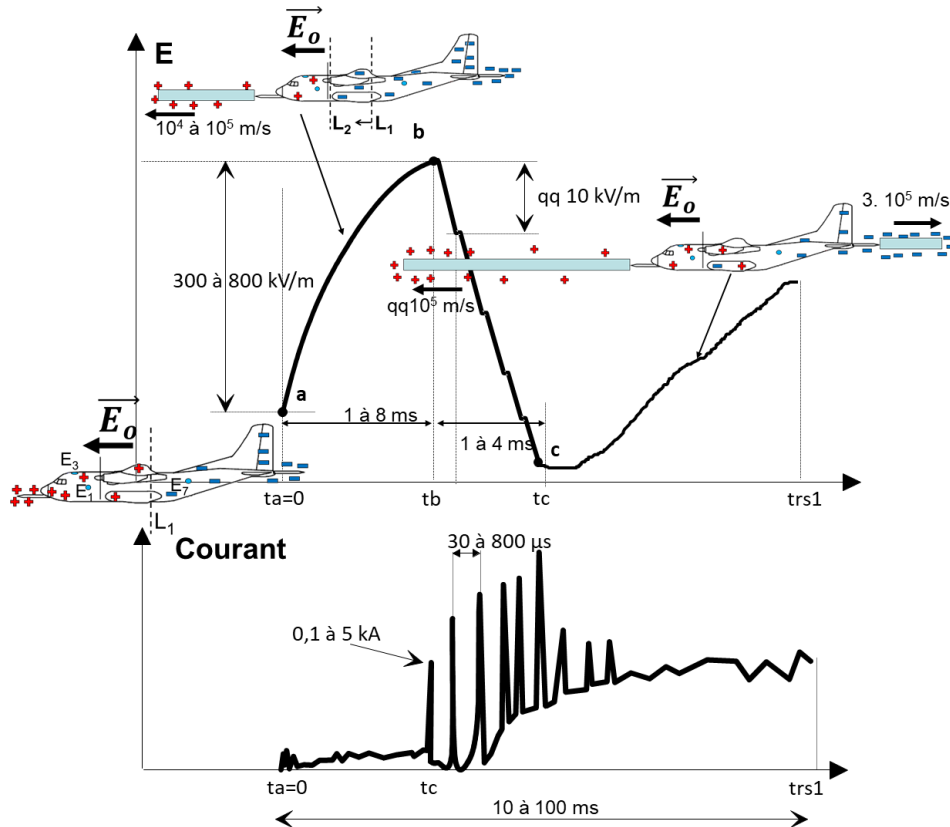


FIGURE 9. Evolution typique du champ électrique et du courant mesurés sur l'avion pour le scénario majoritaire de foudroiement [33]. Cela correspond au déclenchement de l'éclair à partir de l'avion. Par convention, une variation négative de la charge conduit à une variation positive du champ électrique. Les parties bleu clair illustrent le ou les traceurs entourés de la charge électrique qu'ils déposent d'ans l'air.

négative conduit à faire bouger la ligne de séparation des charges de L_1 à L_2 et à augmenter, dans cet exemple, les charges électriques négatives sur la partie arrière de l'aéronef. Le courant injecté par ce traceur dans l'avion est continu et sa faible valeur de quelques dizaines d'ampère, se situait dans le bruit de la mesure des capteurs de courant.

A partir de t_b , on observe une variation descendante par bonds pendant environ 2 ms jusqu'au temps t_c . Cela correspond au démarrage et à la propagation du traceur négatif à partir de la queue de l'appareil. A chaque bond, une impulsion de courant, mesurée entre 0.1 et 5 kA, est injectée à travers le canal du traceur dans l'avion. Comme l'illustre la Figure 9, les impulsions de courant du traceur négatif, qu'il produit à sa tête, s'atténuent au cours du temps. C'est lié au filtrage des impulsions de courant par le canal du traceur qui se comporte comme un filtre passe bas. Plus la longueur de celui-ci est grande plus sa fréquence de coupure haute est faible, transformant les impulsions de courant à sa tête en un courant continu au niveau de l'avion.

Au-delà du temps t_c , la variation du champ électrique redevient positive. Elle correspond à une augmentation de la charge produite par le traceur positif favorisée par le développement du traceur négatif. On retrouve la double décharge électrique, décrite par Kasemir [16], pour expliquer le développement d'un éclair naturel dans un nuage d'orage.

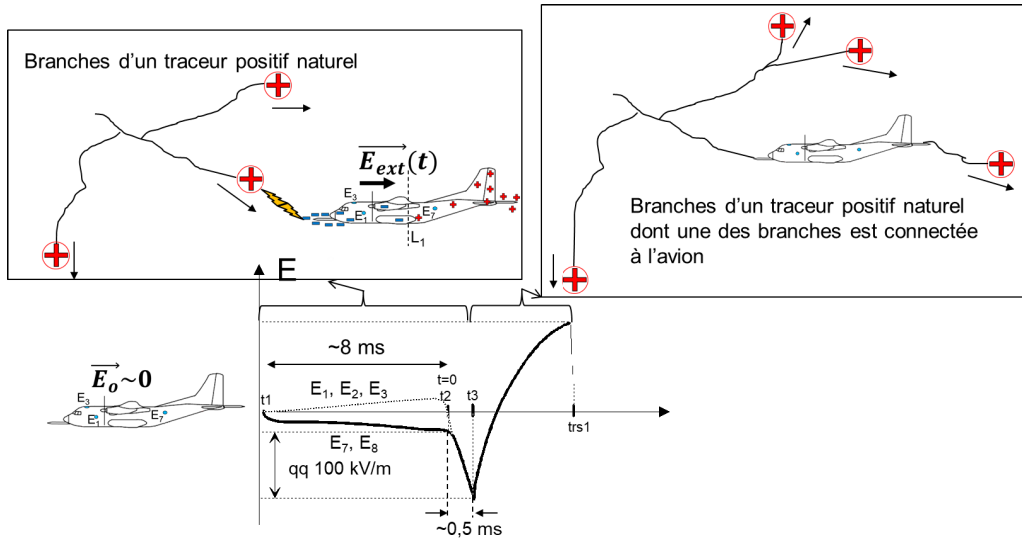


FIGURE 10. Evolution typique du champ électrique E sur l'avion dans 10 % des cas de foudroisement d'après [33]. E_o champ électrique produit par le nuage d'orage (Champ électrostatique atmosphérique). $E_{ext}(t)$ champ électrique variable produit par le développement d'un traceur positif naturel.

Il est important de noter que dans ce scénario, l'avion déclenche son propre foudroisement. Une fois déclenché, l'éclair produit est très similaire à un éclair naturel mais amorcé à un seuil plus faible que celui observé naturellement [8].

Le deuxième scénario, conduisant à un foudroisement d'avion, est le moins fréquent (10 % des cas [33]) mais paradoxalement assez similaire aux mécanismes d'un éclair naturel descendant foudroyant une structure au sol.

Comme l'illustre la Figure 10, avant t_1 , le champ électrique atmosphérique est faible autour de quelques kilovolts par mètre. Il est insuffisant pour déclencher le foudroisement depuis l'avion.

Entre les temps t_1 et t_2 , l'évolution du champ électrique montre une polarisation électrique de l'avion. L'origine de cette évolution est supposée être l'approche d'une branche d'un traceur positif naturel qui génère un champ électrique $E_{ext}(t)$, augmentant avec le temps. Dans cette illustration, les capteurs E_1 à E_3 voient une augmentation du champ électrique alors que les capteurs E_7 et E_8 mesurent une variation négative. Pour les capteurs E_4 et E_5 , positionnés sur les ailes et proches de la ligne de neutralité électrique L_1 , la variation du champ électrique est quasi-nulle.

Entre t_2 et t_3 , toutes les mesures de champ électrique varient vers les valeurs négatives. Cela correspond à la phase de connexion de la branche du traceur positif à l'avion, comme illustré par la partie orange sur la Figure 10. Lors de cette connexion, l'avion se met au potentiel électrique du traceur en acquérant une charge positive, ce qui provoque les variations négatives du champ électrique sur tous les capteurs.

A partir de t_3 , le champ électrique varie positivement sur tous les capteurs électriques. Cela correspond à la poursuite du développement de la branche du traceur positif depuis la partie arrière de l'appareil. Il est important de noter qu'à priori, d'autres branches du traceur se développent en parallèle. La présence de l'avion dans le canal de l'éclair ne modifie pas la nature de l'éclair.

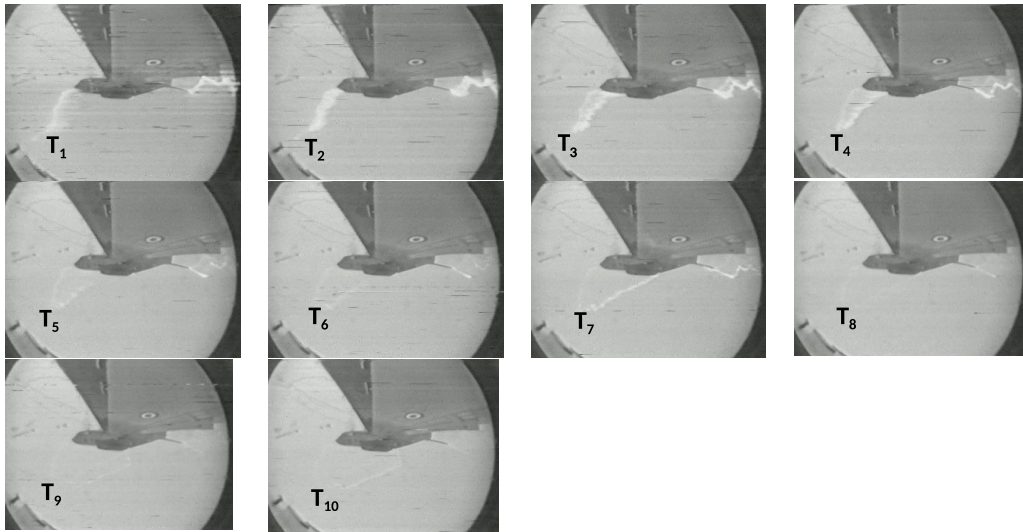


FIGURE 11. Série d'images prise lors du foudroisement du TRANSALL lors de l'évènement 1988_J223_16_44_45 dans le référentiel avion. La prise d'images est faite via la caméra C2 sous l'aile et regardant le fuselage qui filma à 200 images par seconde. La durée $T_{10}-T_1$ est entre 300 et 400 ms.

Dans ce scénario, on remarque que, sur les quelques mesures obtenues, l'avion intercepte toujours une branche d'un traceur positif de l'éclair. D'un point de vue théorique, il n'y a pas de raison pour qu'un traceur négatif ne soit pas également intercepté par l'avion. Dans ce cas, la variation du champ électrique devrait être assez similaire à la Figure 9 avec, avant t_a , une polarisation de l'avion comparable à celle observée sur la Figure 10 entre les temps t_1 et t_2 .

3.3. La phase d'arc de la foudre sur avion

Après la phase d'initiation, qui ne dure que quelques millisecondes, la phase d'arc débute à partir du temps t_{rs1} (Figures 9, 10). Durant cette phase, des impulsions de courant de plusieurs dizaines de kiloampères se produisent lorsqu'un des traceurs atteint le sol ou si l'éclair reste confiné à l'intérieur du nuage.

La présence de l'avion a un faible impact sur la dynamique de l'éclair. En effet, l'avion n'est qu'un tout petit élément conducteur (environ 40 m) intégré dans des canaux de l'éclair qui peuvent atteindre une dizaine de kilomètres de long. Les fortes impulsions de courant se déclenchent loin de l'avion et remontent ces canaux avant de traverser finalement l'avion. La durée des éclairs déclenchés par un avion est similaire à celle des éclairs naturels, de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes.

Sur ces longues durées, contrairement à la phase d'initiation, l'avion s'est déplacé, dans l'air, de plusieurs dizaines de mètres, tandis que les canaux de l'éclair restent fixes dans la masse d'air. Comme le montrent les images de la Figure 11 prises dans le référentiel avion, le pied de l'arc foudre se déplace sur la surface de l'avion au niveau du nez, tandis que le canal accroché à l'arrière s'étire pour compenser l'avancée de l'avion.

Si l'éclair dure suffisamment longtemps, les deux canaux se rejoignent à l'arrière et le foudroisement s'arrête, le courant ne traversant plus l'avion. Ce phénomène est appelé phénomène de balayage du pied d'arc. Il a pour conséquence de limiter la durée de présence du pied d'arc

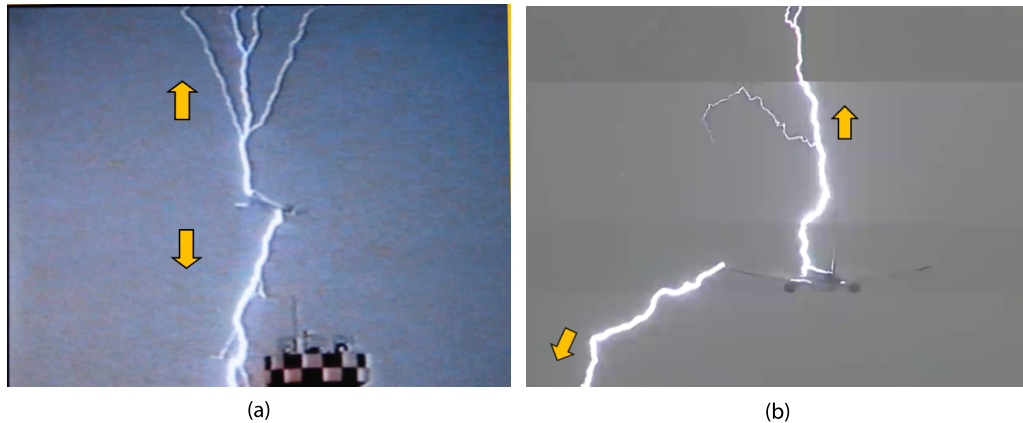


FIGURE 12. (a) Image du foudroiement d'un Boeing 747 décollant de l'aéroport d'Osaka au Japon en 2010 (Source Professeur Zen Kawasaki de l'université d'Osaka). (b) Image du foudroiement d'un Boeing 777 décollant de l'aéroport d'Amsterdam en 2017. Les flèches orange montrent la direction de développement des traceurs de la foudre depuis l'avion (Source <https://youtu.be/OJUXUB5T-lw>).

en un point donné du fuselage, à l'exception des parties arrière où il peut persister pendant toute la durée du foudroiement. Ce mécanisme explique pourquoi la plupart des parties du fuselage peuvent être impactées par la foudre.

4. Impacts du Foudroiement sur les Aéronefs

4.1. Le retour d'expérience

Les campagnes en vol dédiées ont considérablement amélioré notre compréhension des mécanismes de foudroiement malgré le faible nombre d'événements enregistrés. De nos jours, les réseaux sociaux sont devenus une précieuse source d'information, le public partageant fréquemment des vidéos de foudroiement dont il a été le témoin.

La Figure 12 montre deux événements où les directions de développement des traceurs de la foudre depuis l'avion sont clairement visibles :

- Figure 12a : Cette image montre le foudroiement d'un B747 en 2010, lors de son décollage à l'aéroport d'Osaka. L'événement s'est produit à basse altitude, sous un orage de grêle. On observe que le traceur montant vers le nuage a la structure d'un traceur positif tandis que celui qui descend est négatif.
- Figure 12b : Cette image représente le foudroiement d'un B777 en 2017, au décollage d'Amsterdam. Bien qu'il soit plus difficile de déduire la polarité des traceurs dans ce cas, l'image montre clairement qu'un traceur se propage vers le nuage et l'autre vers le sol.

Pour ces deux situations, l'avion déclenche son propre foudroiement, un mécanisme déjà identifié lors des campagnes en vol menées avec les avions Transall et Convair.

Outre les observations directes et les campagnes dédiées, les bases de données d'incidents des compagnies aériennes et des aviateurs représentent une source d'information cruciale sur le foudroiement. Chaque fois qu'un foudroiement est détecté en vol par le pilote ou lors d'une inspection de maintenance, des rapports spécifiques sont rédigés : Les PIREPS (Pilot REPortS) ou MAREPS (MAintenance REPortS).

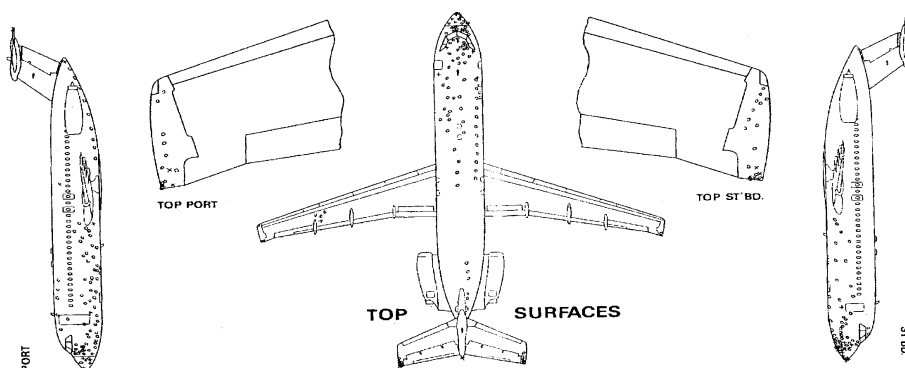


FIGURE 13. Positionnement des points cumulés d'impact de la foudre pour le BAC 11-1 (Source BAe).

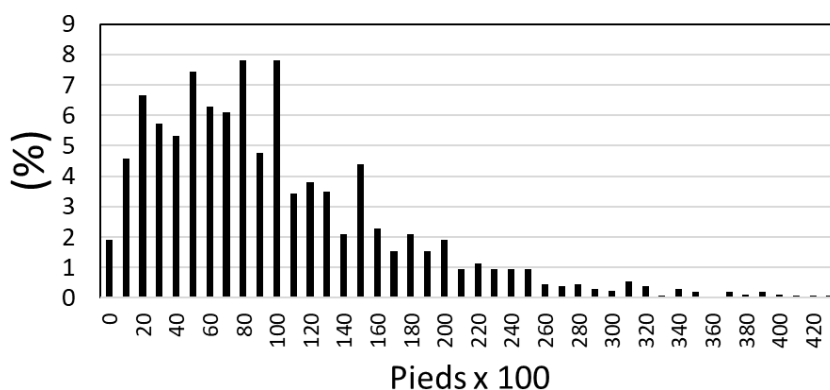


FIGURE 14. Distribution normalisée du nombre de foudroiements en vol en fonction de l'altitude, exprimée en pieds (source BAe). Statistique faite sur 2429 foudroiements.

Ces documents, dont la précision peut varier, consignent des informations essentielles : les conditions atmosphériques au moment du foudroiement, les points où des dommages sont observés, et les éléments qui ont nécessité une réparation.

Grâce à ces informations, on estime qu'un avion de transport civil est foudroyé en moyenne une fois par an. Il est possible de compiler tous les impacts foudre sur un type d'avion donné, comme le montre la Figure 13 pour le BAC11-1. Cette compilation révèle des zones de l'appareil particulièrement sujettes aux impacts, telles que la partie avant de l'avion, les extrémités des ailes, des ailerons et des dérives (notamment au niveau des bords de fuite). D'autres zones sont moins fréquemment touchées, comme la partie centrale du fuselage et d'autres encore très rarement, comme le dessus des ailes pour ce modèle d'avion.

Le retour d'expérience des foudroiements en vol sur les avions de ligne révèle une prédominance des foudroiements à basse altitude comme l'indique la Figure 14, avec un maximum autour de 2 000 m (6 000 Pieds). Cette observation correspond aux phases de décollage et d'atterrissage, ce que confirme également la Figure 15 qui présente la répartition des foudroiements en fonction de la phase de vol.

Ceci semble être en contradiction avec les résultats obtenus lors des campagnes d'essais avec le F106B, qui suggéraient un risque de foudroiement majoritairement au-dessus de 6 km d'altitude. Une explication avancée est que les pilotes de ligne, soucieux du confort des passagers,

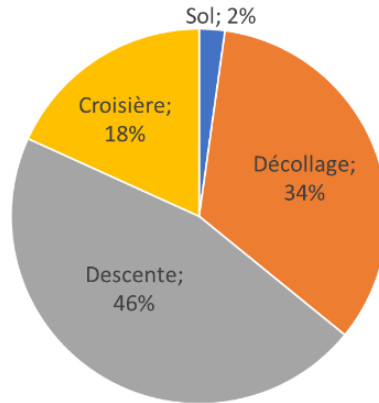


FIGURE 15. Répartition des foudroiements en fonction de la phase de vol de l'avion (Source BAe).

évitent autant que possible les cumulonimbus, qui sont des zones de fortes turbulences. Le pilote du F106B, en revanche, cherchait délibérément à voler au sein de ces formations nuageuses. Les seules zones où les avions de ligne ne peuvent pas systématiquement se dérouter sont les abords des aéroports.

Les rapports d'incident indiquent par ailleurs que, lors des foudroiements, les avions évoluaient à 80 % à l'intérieur de nuages. Parmi ces nuages, 59 % étaient des cumulonimbus et 34 % des cumulus, le restant étant identifié par les pilotes comme des stratus.

4.2. Les effets de la foudre sur l'avion

Les effets directs sont les dommages subis par la structure et les éléments externes d'un aéronef lors d'un foudroiement. Ces dommages sont causés par l'exposition directe au plasma d'air généré par l'éclair ou par une densité de courant foudre excessive. La circulation du courant et la présence de ce plasma peuvent entraîner les conséquences suivantes :

- Échauffement des matériaux
 - Effet Joule : l'échauffement est dû aux courants qui circulent dans les matériaux.
 - Échanges thermiques avec le plasma : la chaleur intense du plasma de l'éclair est transférée aux surfaces de l'avion.
- Contraintes mécaniques :
 - Forces de Laplace : ces forces résultent de la circulation des courants dans la structure.
 - Forces de pression : elles sont générées par l'onde de choc associée à la décharge de foudre.
- Contraintes électriques :
 - Claquage électrique des matériaux : une tension électrique trop élevée peut provoquer la rupture diélectrique des isolants.
 - Génération d'étincelles : des étincelles peuvent apparaître aux interfaces des assemblages en raison de la circulation du courant de foudre.

La Figure 16 montre des dommages typiques observés sur le revêtement de l'avion, résultant des effets directs de la foudre. Il s'agit généralement de brûlures de l'ordre d'une dizaine de millimètres de diamètre, sur lesquelles des points de fusion du fuselage peuvent être visibles (Figure 16a,b).

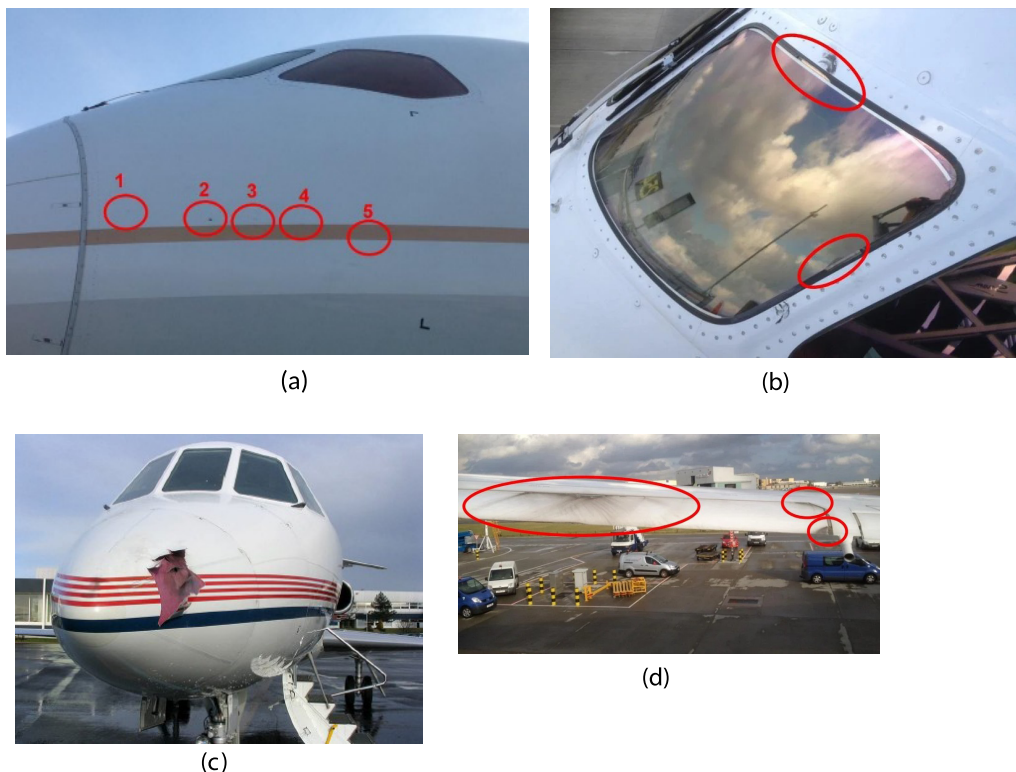


FIGURE 16. (a) Photographie montrant les points d'impact de la foudre sur le nez de l'avion; points entourés en rouge source NTBS. (b) Photographie montrant les points d'impact de la foudre sur la verrière de l'avion; points entourés en rouge source NTBS. (c) Photographie d'un dommage du radome d'un avion à la suite d'un foudroiement. (d) Photographie montrant les points d'impact de la foudre sur les gouvernes de vol, zones entourées en rouge source NTBS.

Les effets indirects du foudroiement se manifestent par des dommages ou des perturbations des systèmes de l'avion. Ils sont causés par les courants et les tensions générés par couplage électromagnétique avec les courants foudre qui circulent sur l'appareil. Ces effets peuvent entraîner :

- Des interférences électromagnétiques (EMI) et des perturbations des systèmes électroniques.
- Des dommages aux capteurs, aux calculateurs, ainsi qu'aux systèmes de communication et de navigation.
- Des risques pour les systèmes de commande de vol, notamment les commandes électriques.

Au sein des compagnies aériennes, les foudroiements sont classés selon leur gravité :

- Mineur : il s'agit de dommages superficiels tels que le remplacement de rivets, des marques de brûlure, le changement de déperditeurs passifs de potentiel, ou des dégâts de peinture
- Moyen : Ce niveau concerne l'impact sur des éléments sensibles comme l'entrée d'air moteur, les antennes, les panneaux de bord d'attaque et de bord de fuite, ou les fenêtres, surtout si des perforations du fuselage sont détectées.

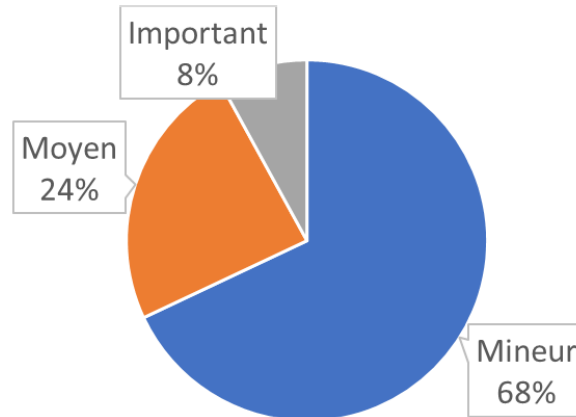


FIGURE 17. Exemple de répartition des foudroiements en mineur, moyen et important, observée sur l'ensemble d'une flotte d'une compagnie Européenne sur une année.

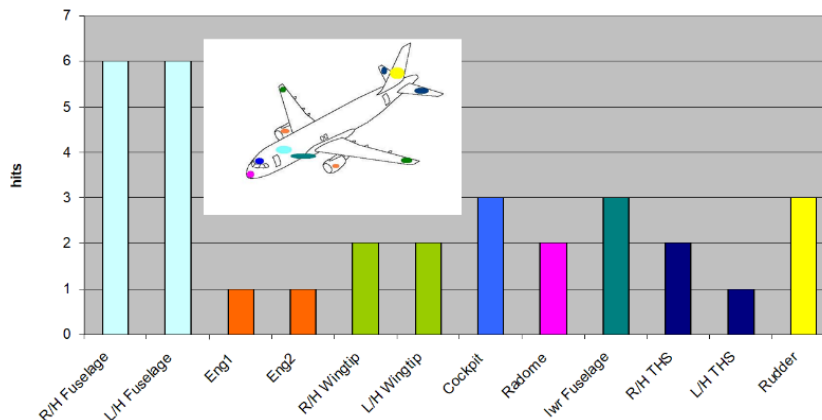


FIGURE 18. Zones sur lesquelles des actions de maintenance ont été réalisées suite à des foudroiements observés sur l'ensemble de la flotte d'une compagnie Européenne sur un an. Le codage couleur correspond à la position de l'élément impacté sur l'avion.

- Important : Cette catégorie regroupe les cas où des éléments critiques tels que les commandes de vol (palonnier, aileron, élévateur, ...) et le cockpit sont touchés.

La catégorie du foudroiement détermine l'ampleur de la maintenance requise et, par conséquent, la durée d'immobilisation de l'appareil. L'immobilisation de l'avion et la perte d'exploitation qui en découle représentent le coût le plus significatif pour la compagnie.

La Figure 17 illustre la répartition du niveau d'importance des coups de foudre observés sur une flotte d'une compagnie Européenne sur une année. La Figure 18 présente quant à elle les éléments ayant nécessité une maintenance et leur localisation. Ces figures montrent que les cas de foudre, jugés "importants" représentent moins de 10 % des incidents.

5. Protection des avions contre la foudre

Pour être autorisé à voler, un aéronef doit obtenir un certificat de type par le biais d'un processus de certification rigoureux. Ce processus garantit que l'aéronef respecte les exigences de sécurité

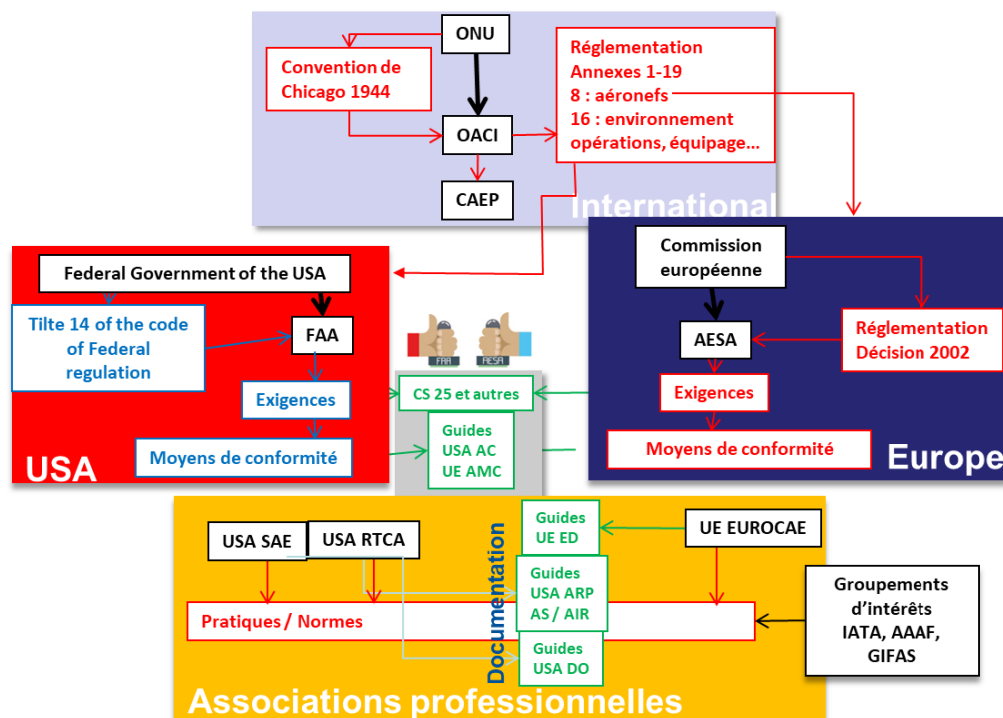


FIGURE 19. Schéma montrant l'organisation mise en place au niveau international pour l'aviation civile.

réglementaires. Le niveau de sécurité requis impose une probabilité, de défaillance majeure inférieure à 10^{-9} par heure de vol pour chaque système critique de l'aéronef.

Cette valeur est établie en partant du principe qu'un accident se produit toutes les 1 million d'heures de vol, soit une probabilité de 10^{-6} par heure de vol. Parmi les causes d'accident, seulement 10 % sont attribuables à un problème technique, ce qui ramène la probabilité de défaillance matérielle à 10^{-7} par heure de vol. Etant donné qu'un avion contient environ 100 équipements critiques, on aboutit ainsi à la probabilité de défaillance de 10^{-9} par heure de vol et par équipement critique.

Etant donné que les aéronefs peuvent voler d'un pays à l'autre, les réglementations doivent être adoptées au niveau international. La Figure 19 montre une vue schématique de l'organisation de l'aviation civile mondiale et des liens entre ses différents acteurs.

Tous les états sont représentés au niveau des nations unies (ONU) qui délèguent leurs compétences à l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI). L'OACI, à son tour, diffuse les réglementations que chaque état doit ensuite mettre en œuvre. Au niveau européen, la commission représente l'ensemble des états et délègue à l'agence de l'Union Européenne pour la sécurité aérienne (AESA), l'exécution des règlements ainsi que l'élaborations des exigences (CS : Certification Specification) et des critères de conformité (AMC : Acceptable Means of Compliance). Aux Etats-Unis, cette fonction est assurée par la Federal Aviation Agency (FAA). Ce sont ces organismes qui, à l'issue du processus de certification, délivrent le certificat de type des avions.

Les exigences de l'AESA (CS) sont des spécifications de haut niveau qui varient en fonction du type d'aéronef. Par exemple, la CS-25 regroupe toutes les exigences applicables aux grands avions de transport. Concernant la protection des avions contre la foudre Au niveau de la foudre, la CS

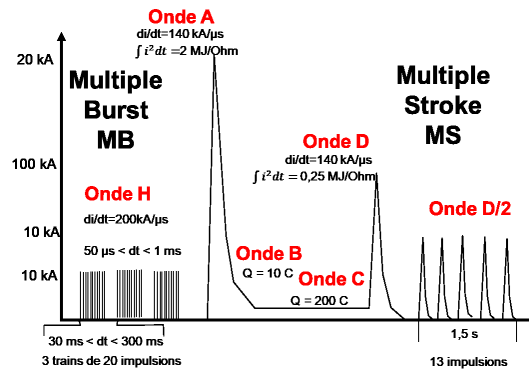


FIGURE 20. Environnement foudre en courant auquel un avion doit résister [35].

25.581 de l'EASA, spécifique aux grands avions, se résume à la phrase clé : "The aeroplane must be protected against catastrophic effects from lightning", que l'on traduit par « un avion doit être protégé contre les effets catastrophiques de la foudre ».

Des associations professionnelles, telles que l'EUROCAE en Europe et la SAE aux Etats-Unis sont en chargées d'élaborer des guides méthodologiques. Ces guides décrivent les démarches et les procédures acceptées par les autorités pour démontrer la conformité d'un avion en matière de résistance aux effets catastrophiques, y compris ceux de la foudre.

La première étape cruciale pour protéger un avion contre la foudre est de définir précisément l'environnement foudre auquel il devra résister. Cet environnement est détaillé dans le document ED-84A [35]. Il a été élaboré à partir de mesures expérimentales de coups de foudre au sol et d'une connaissance approfondie des mécanismes de foudrolement. Cet environnement est constitué de formes d'onde de courant qui ne visent pas à reproduire exactement l'éclair à l'identique, mais à garantir que leurs effets directs et indirects sur l'avion soient supérieurs à ceux obtenus par un foudrolement réel (Figure 20).

Le « multiple burst » se compose d'un train de 20 impulsions de 10 kA, répété 3 fois. Ces impulsions durent quelques microsecondes et représentent le courant du traceur négatif de la foudre injecté dans l'aéronef. Le nombre de 20 impulsions est supérieur au nombre d'impulsions mesuré lors des campagnes en vol, assurant une marge de sécurité. L'intervalle de temps de 50 μ s à 1 ms entre les 20 impulsions est également basé des mesures en vol.

La répétition de ces trains 3 fois simule les observations des campagnes en vol qui ont montré deux tentatives d'amorçage de la foudre avortées depuis l'avion avant qu'un foudrolement ne se produise. Les mesures ont indiqué que l'intervalle de temps entre ces tentatives se situe entre 30 ms et 300 ms. Le niveau de courant de 10 kA est deux fois supérieur aux mesures réelles des campagnes en vol. Bien que cette composante de courant produise peu d'effets directs, elle est très importante pour les effets indirects en raison de la vitesse de montée du courant, qui atteint 200 kA/ μ s.

L'onde de courant A représente le premier arc foudre qui frappe l'avion. C'est une impulsion qui dure quelques centaines de microsecondes et dont le pic atteint 200 kA. Ce niveau couvre plus de 98 % des courants foudre mesurés, ce qui est significativement plus élevé que le pic de courant moyen d'un éclair naturel qui est d'environ 20 kA. L'onde A possède également une très grande intégrale d'action de 2 MJ/Ohm, ce qui engendre d'importants effets thermomécaniques au niveau du point d'impact de l'arc de foudre sur l'aéronef.

L'onde A est suivie par l'onde C, qui représente le maintien du canal de l'éclair sur des durées de plusieurs centaines de millisecondes. Le courant de cette onde est compris entre 100 A et

800 A et sa durée est ajustée pour délivrer une charge totale de 200 C. Son effet sur les matériaux de l'avion est purement thermique.

L'onde D représente les arcs suivants. Leur intensité est supposée inférieure à celle de l'onde A. La durée de cette onde est toujours de quelques centaines de microsecondes, mais le pic est réduit à 100 kA, ce qui reste très supérieur au pic de courant moyen d'un éclair. Son intégrale d'action de 0.25 MJ/Ohm produit également des effets thermomécaniques significatifs au niveau du pied de l'arc.

Le « Multiple Stroke » a pour fonction de représenter tous les arcs successifs produits par un éclair. De même le nombre de 13 impulsions couvre plus de 99.9 % des éclairs sachant que dans environ 50 % des cas, un éclair ne génère qu'un seul arc. Cette composante est cruciale pour les effets induits cumulatifs.

En conclusion, la contrainte en courant pour certifier un aéronef contre la foudre est extrêmement sévère. Cependant, cette rigueur doit être mise en perspective avec la probabilité de 10^{-9} par heure de vol qui doit être démontrée pour la sécurité des systèmes critiques de l'avion.

La deuxième étape dans la démarche de protection d'un aéronef à la foudre est le zoning. Cette approche prend en compte le phénomène de balayage de l'arc sur la surface de l'avion, causé par le mouvement relatif entre le canal de l'éclair (qui reste immobile dans l'air) et l'avion en déplacement. Il en résulte que chaque surface de l'avion ne subit qu'une partie de l'agression foudre.

Le guide ED-91A [36] définit six zones distinctes, chacune étant associée à une partie spécifique des ondes de courant de la Figure 20.

Ces six zones sont définies comme suit :

- Zone 1A : Toutes les zones à la surface de l'avion où un impact d'un premier arc est probable avec un temps de maintien de l'arc sur cette zone faible. Cette zone doit supporter les ondes de courant A et B.
- Zone 1B : Toutes les zones à la surface de l'avion où un impact d'un premier arc est probable avec un long de maintien de l'arc sur cette zone. Cette zone doit résister aux ondes de courant foudre (A+B+C).
- Zone 1C : Toutes les surfaces de l'avion où un premier arc d'amplitude réduite (150 kA) est probable mais avec un temps de maintien faible. Cette zone prolonge la zone 1A.
- Zone 2A : Toutes les surfaces qui peuvent être impactées par un des arcs suivants de l'éclair et avec un temps de maintien de l'arc faible. Cette zone doit résister aux ondes de courant (D+B).
- Zone 2B : Toutes les surfaces qui peuvent être impactées par des arcs suivants de l'éclair et avec un long temps de maintien de l'arc. Cette zone doit résister aux ondes de courant (D+B+C).
- Zone 3 : Dans cette zone, l'impact direct d'un arc foudre est peu probable. Elle correspond aux surfaces restantes de l'avion et est le complément des zones 1 et 2. Dans cette zone, l'avion subit uniquement un courant foudre de conduction qui transite entre les zones 1 et 2.

La Figure 21 présente l'exemple de zoning tel que défini dans l'ED-91A pour un avion de transport civil. Ce zoning est établi à partir des observations d'impacts de foudre relevées au sol après des foudroiements réels.

Les zones 1A sont typiquement situées aux extrémités de l'aéronef, comme le nez, les bouts d'ailes et des ailerons, la dérive verticale, et l'entrée des moteurs. Sur ces zones, le champ électrique produit par le nuage d'orage est fortement amplifié, ce qui favorise le développement des traceurs de foudre.

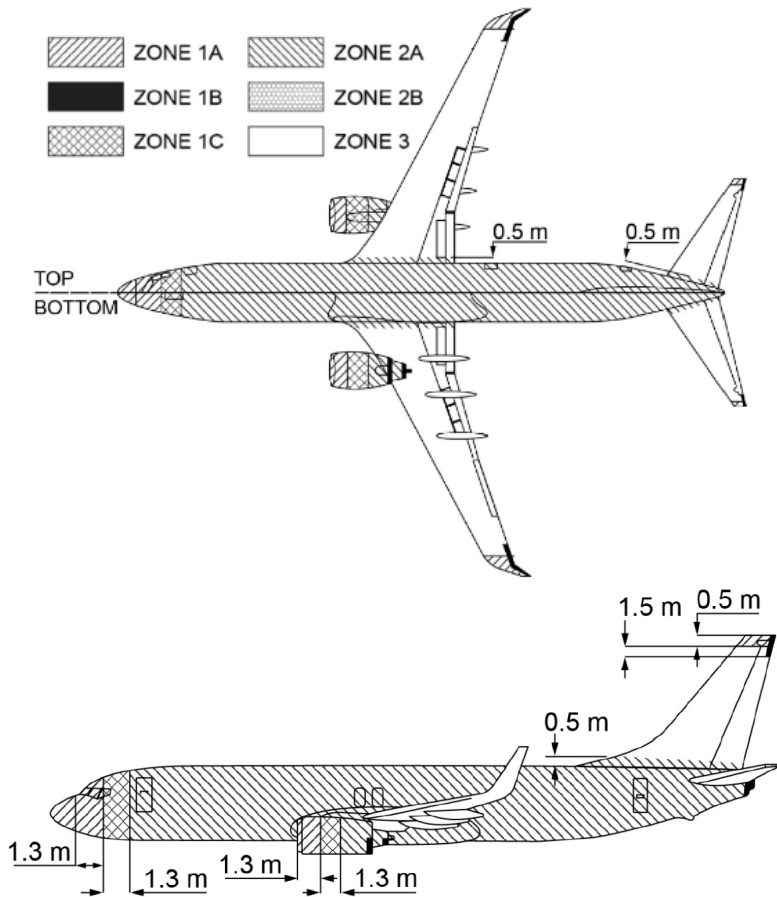


FIGURE 21. Zoning d'un aéronef civil de transport extrait de l'ED-91A [36].

Les zones 1B sont généralement localisées là où le champ électrique atmosphérique est également renforcé, ainsi que sur les bords de fuite. Dans ces zones, l'arc reste accroché pendant le déplacement de l'avion lors du foudroiement.

Les zones 1C et 2A se trouvent dans la continuité des zones 1A. La zone 2B est également située sur des bords de fuite, faisant suite à une zone 2A.

Pour conclure cette partie, le zoning est la première étape essentielle du processus de certification d'un avion à la foudre. Il permet d'apporter des éléments pour démontrer que l'aéronef est adéquatement protégé contre les effets de la foudre.

6. La problématique foudre : évolution et enjeux

La sécurité du transport aérien s'appuie en grande partie sur l'évolution constante de la réglementation des opérations aériennes et de la certification des matériels. Comme nous l'avons vu précédemment, face au risque lié à la foudre, la conception d'une structure d'aéronef doit satisfaire aux critères drastiques de conception et de sécurité imposés par les autorités de certification.

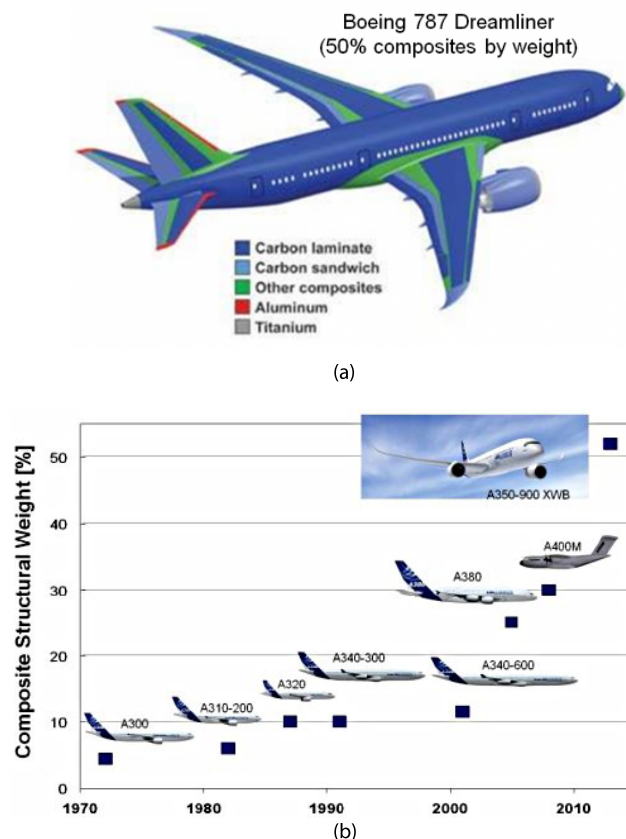


FIGURE 22. (a) Part de composite dans la masse du Dreamliner de Boeing (source Boeing). (b) Evolution de la part des composites à base de fibres carbone en fonction de la famille d'avion AIRBUS (source AIRBUS).

Du fait de leurs très hautes performances mécaniques et de leur contribution notable à l'amélioration du bilan de masse, l'usage des matériaux composites tend à se généraliser au niveau des structures d'aéronefs, comme le montre la Figure 22. La part de composite à base de fibres carbone atteint 50 % de la masse du Dreamliner de Boeing et 53 % pour l'A350 d'AIRBUS.

Cependant ces matériaux restent très complexes car ils sont composés d'un assemblage de matériaux hétérogènes. Cette complexité se traduit par des propriétés mécaniques fortement anisotropes, des risques inhérents de présence de défauts et des difficultés dans la maîtrise des assemblages (nature des matériaux, types de fixations, méthodes spécifiques d'assemblage). De plus, ces matériaux possèdent une conductivité électrique elle-même anisotrope et au moins mille fois plus faible que celle de l'aluminium qu'ils remplacent.

Les particularités des matériaux composites ont des répercussions significatives sur la protection des structures d'aéronefs contre les effets directs de la foudre. Pour contrer le risque de foudroiement, il est impératif d'ajouter des éléments de protection à la surface de ces matériaux. La Figure 23 illustre ces fines couches métalliques, dont la masse varie de 80 gr/m² à 200 gr/m². Leur rôle est de permettre aux courants de foudre de circuler sans provoquer de dommages catastrophiques aux structures.

Cependant, cette protection a un coût : une augmentation de la masse de l'avion. Sur le Dreamliner, par exemple, le surpoids dû aux protections foudre représente environ 2.5 % de la

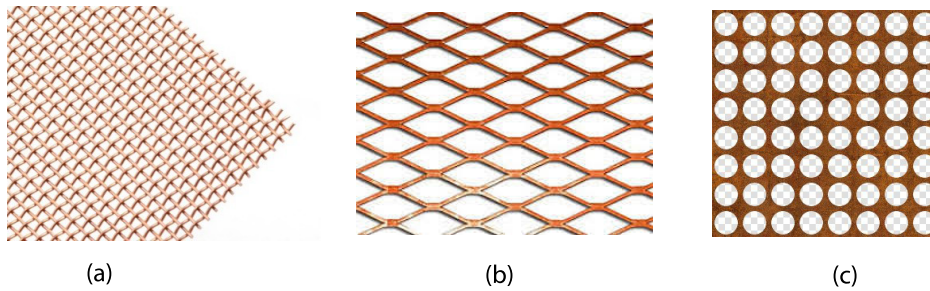


FIGURE 23. Exemple de protection foudre rajoutée au panneau composite carbone pour qu'il résiste à un impact foudre. (a) Tissu à base de fil de bronze. (b) Feuille de cuivre déployée. (c) Feuille de cuivre perforée.

masse totale, soit environ 3.5 tonnes. Sachant qu'une augmentation de 1 % du poids d'un avion entraîne une hausse d'environ 0.75 % de la consommation de carburant, cela se traduit par une surconsommation annuelle de carburant d'environ 363 t pour cet avion.

Le retour d'expérience des avionneurs sur les programmes récents (Boeing 787, Airbus A350 et Falcon F5X) révèle que la réponse des structures composites à la foudre est encore mal comprise. Les risques d'endommagement, de perforation des panneaux composites ou d'étincelage des fixations dans les zones de réservoir sont particulièrement difficiles à évaluer avec les connaissances actuelles.

Ce manque de connaissances, combiné au renforcement des exigences réglementaires en matière de sécurité des réservoirs (FAR 25.981), entraîne une augmentation d'un ordre de grandeur du coût de la certification liée à la foudre. Les industriels s'efforcent d'acquérir une meilleure maîtrise des effets directs de la foudre sur les structures composites. Leur objectif est d'évaluer de manière fiable la nature des protections nécessaires et la nature des protections nécessaires et de développer des solutions techniques optimisées en termes de masse, de marges de conception, et de délais et coûts de développement et de certification.

Par ailleurs, l'urgence écologique et l'émergence de nouveaux usages poussent les avionneurs et hélicoptéristes à concevoir des configurations d'aéronefs en rupture avec l'existant (Figure 24). Ces nouvelles architectures remettent en question les méthodes de certification traditionnelles, qui s'appuient largement sur le retour d'expérience.

En ce qui concerne spécifiquement les risques liés à la foudre, l'approche normative du « zoning », pourtant la première étape de la base de certification foudre, devient inutilisable pour identifier les zones de l'aéronef les plus susceptibles d'être des points d'attachement de la foudre. De plus, le retour d'expérience des hélicoptéristes sur les appareils en service montre que la méthode actuelle ne permet pas de tenir compte de la complexité des différents emports qui modifient le zoning des appareils.

Les industriels sont donc activement à la recherche de nouvelles méthodes, validées et acceptées par les autorités de certification pour établir le zoning sur les configurations inédites et pour mieux maîtriser l'impact des différents équipements en surface du fuselage sur les configurations conventionnelles.

7. Conclusion

7.1. La foudre et l'aéronautique : un phénomène complexe et ses implications

Les éclairs sont un phénomène complexe qui se développe au sein du nuage d'orage, lequel agit comme un générateur électrique. Les premières avancées scientifiques sur les éclairs ont

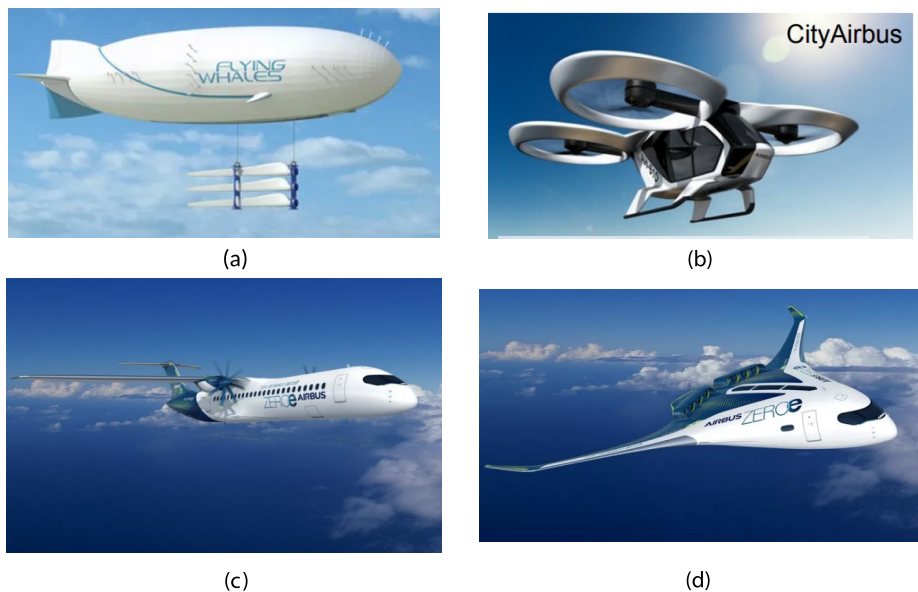


FIGURE 24. Nouveaux types aérodynes (a) LCA60T de la société Flying Whale et d'aéronefs (b) City d'AIRBUS, (c) Concept d'avion régional d'AIRBUS et (d) Concept d'aile volante d'AIRBUS pour répondre aux nouveaux usages et aux enjeux de décarbonation.

débuté avec la démonstration par Benjamin Franklin de la nature électrique des orages, suivie par l'invention du paratonnerre. Il a fallu attendre les années 1960 pour que H. W. Kasemir introduise la notion d'une double décharge électrique bidirectionnelle afin d'expliquer comment un éclair peut se développer à l'intérieur d'un orage. Cette représentation théorique a, par la suite, été validée par les imageurs d'éclairs en bandes VHF et UHF.

En parallèle, l'après-Seconde Guerre mondiale a marqué l'avènement de l'aéronautique civile mondiale. Cette croissance du trafic aérien s'est accompagnée d'une augmentation du nombre d'avions foudroyés en vol, avec comme événement majeur l'explosion en vol du Boeing 707 de la Pan Am, le 8 décembre 1963. Au début des années 1980, des programmes majeurs ont été mis en place par la NASA, la FAA et la DGA, utilisant respectivement un F106, un Convairet et un Transall, pour comprendre les mécanismes physiques impliqués dans un foudroiement. Ces études ont permis de montrer que deux mécanismes distincts conduisent au foudroiement d'un avion :

- **Le premier, majoritaire (90 % des cas)**, correspond aux situations où l'avion déclenche son propre foudroiement. Une double décharge électrique s'amorce depuis l'avion sur les points qui renforcent le plus le champ électrique généré par le nuage d'orage.
- **Le second, représentant 10 % des cas**, est associé à l'interception d'un éclair naturel par l'avion.

Le retour d'expérience des aviateurs et des compagnies aériennes révèle que, dans la grande majorité des cas, le foudroiement se produit durant les phases d'approche, de descente ou de décollage. Seulement 8 % des foudroiements entraînent des effets jugés importants sur l'avion, car ils impactent des éléments critiques. Les effets de la foudre se répartissent en :

- **Effets directs** : liés à l'accrochage de l'arc électrique et à la circulation du courant.
- **Effets indirects** (ou induits) : correspondant aux perturbations électromagnétiques dues à l'éclair qui se propagent jusqu'aux systèmes de l'avion.

7.2. Réglementation et Défis pour l'aviation moderne

Les autorités de l'aviation civile imposent qu'un avion civil soit protégé à la foudre pour être certifié. Au niveau réglementaire, les avions doivent pouvoir résister aux niveaux de courant quasiment les plus forts (200 kA).

Les enjeux pour l'aviation moderne, qui utilise des matériaux composites pour alléger les avions, est d'augmenter la compréhension de l'interaction de la foudre avec ces matériaux et les nouvelles géométries d'aéronef. Cela permettra d'élaborer des solutions techniques optimisées du point de vue de la masse, des marges de conception, des délais et coûts de développement et de certification.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que son organisme de recherche.

Références

- [1] M. I. Bertholon, *De l'électricité des végétaux : ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, de leurs vertus médico & nutritivo-électriques, & principalement des moyens de pratique de l'appliquer utilement à l'agriculture, avec l'invention d'un électro-végétomètre*, Didot: Paris, 1783. En ligne sur <http://archive.org/details/dellectrici00bert> (consulté le 24 avril 2025).
- [2] L. Galvani, « De viribus electricitatis in motu musculari commentarius », dans *Volume VII des Commentarii de Bononiensi Scientiarum et Artium Instituto atque Academia*, Typographia Instituti Scientiarum: Bologna, 1791.
- [3] A. Volta, *XVII. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In a letter from Mr. Alexander Volta, F.R.S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K.B. P.R.S.*, 1832. En ligne sur <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstl.1800.0018> (consulté le 24 avril 2025).
- [4] B. Franklin, E. Cave, T. Jefferys, E. Livingston et T. P. Barton, *Experiments and observations on electricity, made at Philadelphia in America. London : Printed and sold by E. Cave, at St. John's Gate*, 1751. En ligne sur http://archive.org/details/experimentsobser00fran_0 (consulté le 24 avril 2025).
- [5] H. Morrison, M. van LierWalqui, A. M. Fridlind et al., « Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics », *J. Adv. Model. Earth Syst.* **12** (2020), no. 8, article no. e2019MS001689.
- [6] C. Saunders, « Charge separation mechanisms in clouds », *Space Sci. Rev.* **137** (2008), no. 1–4, p. 335-353.
- [7] M. Stolzenburg, W. D. Rust et T. C. Marshall, « Electrical structure in thunderstorm convective regions : 3. Synthesis », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **103** (1998), no. D12, p. 14097-14108.
- [8] T. C. Marshall, M. P. McCarthy et W. D. Rust, « Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **100** (1995), no. D4, p. 7097-7103.
- [9] R. H. Golde, *Lightning Protection*, Edward Arnold: London, 1973.
- [10] M. A. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press: Orlando, FL, 1987.
- [11] Les Renardières Group, « Positive discharges in long air gaps at Les Renardières – 1975 results and conclusions », *Electra* **53** (1977).
- [12] Les Renardières Group, « Negative discharges in long air gaps at Les Renardières – 1978 results », *Electra* **53** (1977).
- [13] S. Larigaldie, A. Roussaud et B. Jecko, « Mechanisms of high-current pulses in lightning and long-spark stepped leaders », *J. Appl. Phys.* **72** (1992), no. 5, p. 1729-1739.
- [14] S. Larigaldie, *Etude expérimentale et modélisation de mécanismes physiques de l'étincelle glissante*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 1985. En ligne sur <https://theses.fr/1985PA112375> (consulté le 8 octobre 2024).
- [15] R. B. Anderson et A. J. Eriksson, « Lightning parameters for engineering application », *CIGRE Electra* **69** (1980), p. 65-102.
- [16] H. W. Kasemir, « A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge », *J. Geophys. Res.* (1896–1977) **65** (1960), no. 7, p. 1873-1878.
- [17] J. W. Warwick, C. O. Hayenga et J. W. Brosnahan, « Interferometric directions of lightning sources at 34 MHz », *J. Geophys. Res.* **84** (1979), p. 2457-2468.

- [18] C. O. Hayenga, « Characteristics of lightning VHF radiation near the time of return strokes », *J. Geophys. Res.* **89** (1984), p. 1403-1410.
- [19] P. Richard, A. Delannoy, G. Labaune et P. Laroche, « Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning », *J. Geophys. Res.* **91** (1986), no. D1, p. 1248-1260.
- [20] C. T. Rhodes, X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas et C. O. Hayenga, « Observations of lightning phenomena using radio interferometry », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **99** (1994), no. D6, p. 13059-13082.
- [21] X. M. Shao, D. N. Holden et C. T. Rhodes, « Broad band radio interferometry for lightning observations », *Geophys. Res. Lett.* **23** (1996), no. 15, p. 1917-1920.
- [22] T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, Y. Ohta et K. Matsuura, « Broad band interferometric measurement of rocket triggered lightning in Japan », *Geophys. Res. Lett.* **24** (1997), no. 22, p. 2769-2772.
- [23] Z. Kawasaki, R. Mardiana et T. Ushio, « Broadband and narrowband RF interferometers for lightning observations », *Geophys. Res. Lett.* **27** (2000), p. 3189-3192.
- [24] D. Cao, X. Qie, S. Duan, J. Yang et Y. Xuan, « Observations of VHF source radiated by lightning using short baseline technology », dans *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, 2010, p. 1162-1165.
- [25] M. G. Stock, M. Akita, P. R. Krehbiel, W. Rison, H. E. Edens, Z. Kawasaki et M. A. Stanley, « Continuous broadband digital interferometry of lightning using a generalized cross-correlation algorithm », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **119** (2014), no. 6, p. 3134-3165.
- [26] Y. Pu et S. A. Cummer, « Needles and lightning leader dynamics imaged with 100–200 MHz broadband VHF interferometry », *Geophys. Res. Lett.* **46** (2019), no. 22, p. 13556-13563.
- [27] D. E. Proctor, « VHF radio pictures of cloud flashes », *J. Geophys. Res. : Oceans* **86** (1981), no. C5, p. 4041-4071.
- [28] L. Maier, C. Lennon, T. Britt et S. Schaefer, « LDAR system performance and analysis, paper presented at International », dans *Présenté à Conference on Cloud Physics, Dallas, Tex*, American Meteorological Society: Boston, MA, 1995.
- [29] W. Rison, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, T. Hamlin et J. Harlin, « A GPS-based three-dimensional lightning mapping system : initial observations in central New Mexico », *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999), no. 23, p. 3573-3576.
- [30] R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, W. Rison, S. J. Hunyady, W. P. Winn, T. Hamlin et J. Harlin, « Accuracy of the lightning mapping array », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **109** (2004), no. D14, article no. D14207.
- [31] B. O. Fisher, P. W. Philip, J. A. Plumer et A. J. Wunschel Jr., « Final results of the nasa storm hazards program », dans *International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, OK, USA*, 1988.
- [32] V. Mazur, « Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **94** (1989), no. D3, p. 3311-3325.
- [33] J.-P. Moreau, J.-C. Alliot et V. Mazur, « Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations », *J. Geophys. Res. : Atmos.* **97** (1992), no. D14, p. 15903-15912.
- [34] P. Laroche, « Airborne measurements of electrical atmospheric field produced by convective clouds », *Rev. Phys. Appl. (Paris)* **21** (1986), no. 12, p. 809-815.
- [35] EUROCAE, *ED-84A - Aircraft lightning environment and related test waveforms*, 2013. En ligne sur <https://www.eurocae.net/product/ed-84a-aircraft-lightning-environment-and-related-waveforms> (consulté le 28 octobre 2025).
- [36] EUROCAE, *ED-91A - Lightning Zoning*, 2019. En ligne sur <https://www.eurocae.net/product/ed-91a-lightning-zoning> (consulté le 28 octobre 2025).



Article de synthèse / *Review article*

Apports du *fluide électrique* sur les systèmes aérospatiaux

Contribution of the electric fluid to aerospace systems

Paul-Quentin Elias ^a

^a DPHY, ONERA, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

Courriel : paul-quentin.elias@onera.fr

Résumé. Les systèmes aérospatiaux cherchent constamment l'optimisation de leurs performances par l'intégration de nouvelles technologies. Les plasmas, ou « fluide électrique » comme l'appelle l'abbé Bertholon du XVIII^{ème} siècle, offrent des possibilités d'action mécanique, thermique et chimique sur les écoulements, mais leur adoption reste limitée par l'équilibre entre gains de performance et complexité du système. À titre d'illustration, on présente trois applications concrètes des plasmas aérospatiaux : la réduction de traînée par filamentation laser femtoseconde, l'amélioration des performances d'allumage en conditions d'altitude par décharges de surface, et l'optimisation de propulseurs à tuyères magnétiques. Bien que peu de dispositifs plasma soient actuellement opérationnels en aéronautique, contrairement à la propulsion spatiale où ils dominent désormais, un mouvement d'adoption graduel est possible. Pour cela, il faudra relever un certain nombre de défis scientifiques et techniques, poursuivant l'ambition historique de maîtriser le « fluide électrique » pour corriger et optimiser les systèmes techniques.

Abstract. Aerospace systems constantly seek performances optimization through the integration of new technologies. Plasmas, or “electric fluid” as 18th-century abbé Bertholon called them, offer unique possibilities for mechanical, thermal, and chemical action on flows, but their adoption remains limited by the balance between performance gains and system complexity. As an illustration, three concrete applications of plasmas in aerospace systems are presented: drag reduction through femtosecond laser filamentation, improvement of ignition performance at altitude conditions through surface discharges, and optimization of magnetic nozzle thrusters. Although few plasma devices are currently operational in aeronautics, unlike space propulsion where they now dominate, a gradual adoption movement is possible. For this to happen, a number of scientific and technical challenges must be overcome, pursuing the historical ambition of mastering the “electric fluid” to correct and optimize technical systems.

Mots-clés. Plasma, aérospatial, contrôle d'écoulement, propulsion spatiale.

Keywords. Plasma, aerospace, flow control, space propulsion.

Manuscrit reçu le 18 juillet 2025, accepté le 11 septembre 2025.

1. Introduction

Un système aérospatial, au sens le plus général, est un dispositif se déployant dans l'atmosphère ou dans l'espace en vue d'accomplir une fonction donnée, telle que le transport, l'observation, ou la défense. Comme tout objet technique, le concepteur cherche à optimiser son fonctionnement pour la mission recherchée. L'optimisation s'appuie sur des modifications du dispositif ou par l'ajout de nouveaux sous-systèmes.

Une classe de sous-systèmes explorée depuis les débuts de l'ère aérospatiale repose sur l'utilisation de plasma. Si la dénomination de « système plasma » semble futuriste, il est bon de rappeler que l'utilisation des plasmas est aussi ancienne, voire plus ancienne, que l'industrie aéronautique. Le premier système plasma opérationnel, toujours utilisé de nos jours, est la bougie d'allumage, brevetée par Lenoir à la fin du XIX^{ème} siècle [1]. L'idée d'accélérer des particules chargées pour obtenir une force propulsive, peut être tracée aux travaux de Tsiolkovsky et Goddard [2]. L'idée clé de ce dispositif est de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, thermique ou chimique pour produire un effet désirable.

Ces systèmes actifs mettant à profit les propriétés des plasmas, conceptualisés par les pionniers de l'aérospatial, mettent du temps à se déployer. En effet, leur utilité opérationnelle résulte d'un équilibre entre le gain en performance qu'ils amènent et le surcoût en complexité du système qu'ils demandent. Si cette balance est très en faveur des bougies d'allumage, objet plasma historique, il n'en va pas de même de beaucoup d'autres dispositifs plasma. Ainsi, ce n'est que récemment que l'industrie spatiale a intégré la propulsion plasma pour certaines missions, en raison de cet équilibre qui a longtemps défavorisé ce moyen de propulsion. De plus, la gradation de l'effet attendu participe aussi à l'évaluation de cet équilibre. En effet, certains dispositifs « plasma » proposent une amélioration incrémentale, alors que d'autres visent un effet disruptif qui a un impact fort sur le dispositif. Dans le premier cas, le concepteur sera très exigeant sur le volume et la puissance allouée à l'actionneur plasma. Dans le second, un gain significatif peut justifier un réexamen de la conception globale pour laisser de la place au dispositif.

Depuis une vingtaine d'années, on assiste à une accélération des études pour la compréhension et le développement de systèmes plasmas pour l'aérospatial, qu'on peut classer selon trois grands axes. Le premier axe porte sur l'utilisation des plasmas pour le contrôle d'écoulement. Ce contrôle peut s'exercer à basse vitesse — par exemple en manipulant la couche limite pour retarder ou déclencher la transition vers le régime turbulent [3] — ou à plus haute vitesse pour agir sur les performances aérodynamiques [4]. Le deuxième axe porte sur l'utilisation de plasmas pour l'assistance à la combustion, afin de stabiliser une flamme, garantir l'allumage ou accrocher une flamme dans un superstatoréacteur [5,6]. Enfin, le troisième axe concerne le développement et l'optimisation de propulseurs à plasma pour la propulsion spatiale [7].

Dans ce contexte, il n'est pas toujours aisé de comprendre les enjeux et les problématiques autour de ces dispositifs à plasma. Aussi, l'objectif de cet article est d'aider à clarifier la vision du lecteur sur ce type de système. D'abord, nous introduirons et nous discuterons les modes d'action du plasma, en se plaçant dans la continuité des travaux des savants du XVIII^{ème} siècle, notamment ceux de l'abbé Bertholon. Ensuite, nous illustrerons l'utilisation de ces dispositifs plasmas dans les trois axes exposés ci-dessus : le contrôle d'écoulement, l'assistance à la combustion et la propulsion spatiale. Pour conclure, nous discuterons les enjeux autour des systèmes plasmas.

2. Le plasma comme moyen d'action

Le plasma, ou « fluide électrique » comme l'appelait l'abbé Bertholon, est un objet physique qui se manifeste naturellement, comme dans le cas de la foudre, ou artificiellement suite à l'injection d'énergie dans le milieu (souvent sous forme électromagnétique). Dans cette section, on discute les modes d'action du plasma. Par cette dénomination, on entend les termes de transferts de matière, de force ou d'énergie qui permettent à la matière ionisée d'avoir une action sur son environnement. Premièrement, en se plongeant notamment dans les contributions de P. Bertholon, il est intéressant de voir que cette idée d'employer le « fluide électrique » pour agir sur et modifier l'environnement est venue presque immédiatement aux premiers observateurs de ce phénomène. Dans la suite, on définira plus précisément ce qu'on entend par plasma, pour ensuite, dans la dernière section, détailler plus formellement ces mécanismes de couplage.

2.1. Les plasmas à l'époque de l'abbé Bertholon

Les savants du XVIII^{ème} siècle comprennent déjà un certain nombre de notions clefs sur le fluide électrique. Initialement, la distinction est faite entre l'électricité naturelle et artificielle. Cette dernière peut être créée au moyen d'électrophore, un appareil triboélectrique popularisé par Volta. Les expérimentateurs savent depuis 1733 que le « fluide électrique » se présente sous deux formes, une positive et une négative [8]. Elle peut être stockée dans des bouteilles de Leyde, ancêtre de nos condensateurs. Si l'électricité artificielle se prête aux expériences, une question est de savoir si ce phénomène étrange se trouve dans la nature. C'est Franklin qui propose en 1749 une expérience pour démontrer le caractère électrique de la foudre et que l'électricité naturelle et artificielle sont une seule et même chose [9]. Cette identité implique que, comme l'électricité artificielle, la foudre peut être attirée par les pointes et guidée par les conducteurs métalliques, menant ainsi Franklin au concept de paratonnerre. Bertholon, vif admirateur de Franklin, soutient sa théorie de l'électricité et l'explicite dans son mémoire de 1777 [10]. Selon la vue de Franklin, la matière électrique peut être accumulée et, comme un fluide, a tendance à fuir les endroits où elle est en excès pour aller à ceux où elle est en déficit. Ainsi, les nuages d'orages sont, par un procédé d'accumulation inconnu, surchargés de fluide électrique. Bertholon fait une analogie avec l'hydrostatique pour expliquer que, comme un liquide en surpression, le fluide électrique en excès va rejoindre les zones où il est en déficit. Ceci « afin de rétablir l'équilibre ». Ce phénomène se manifeste par la foudre. Dès lors, Bertholon se fait l'avocat de Franklin et défend l'usage du paratonnerre, constatant que

Enfin, après que l'efficacité de ce procédé fut démontrée, il fallut encore bien des années pour le faire adopter; tant les vérités utiles ont de peine à braver les préjugés & à les déraciner. [10]

Un constat lucide et qui reste, somme toute, très actuel.

Dans leurs observations et leurs expériences pratiques, ces savants sont constamment exposés à ce qu'on appelle de nos jours le *plasma*, que ce soit dans sa manifestation la plus spectaculaire, la foudre, ou celle plus commune mais tout aussi mystérieuse, les aigrettes observées sur les conducteurs chargés par frottement dans les laboratoires. Le cadre conceptuel n'existe pas pour comprendre ces phénomènes, mais le terme de « fluide électrique » traduit l'intuition de ces observateurs sur cette substance qui peut être conduite, guidée, isolée. Il est encore plus frappant de constater que malgré cette compréhension partielle du phénomène, les philosophes naturels vont rapidement chercher à utiliser ce fluide électrique pour agir sur l'environnement. L'électrovégétomètre de Bertholon en est un exemple éclatant : cet appareil cherche à compenser le défaut de fluide électrique sur les végétaux. Ce défaut est supposé nuire à la croissance et à la fructification des plantes. En soutirant le fluide électrique de sources atmosphériques, Bertholon propose de rétablir cet équilibre. Cette utilisation du fluide électrique en vue d'optimiser un processus peut être considérée comme le fondement conceptuel des recherches actuelles sur l'utilisation des plasmas pour l'aérospatial, illustrées par les trois exemples détaillés dans le présent article. En ce sens, cette activité s'inscrit dans la lignée des savants des Lumières et de Bertholon en particulier, qui écrit en 1777

Quoiqu'il paraisse au premier coup d'œil que l'idée hardie de corriger la nature dans ses écarts soit téméraire, cependant cette nature, toute puissante qu'elle est, s'est montrée si souvent docile aux efforts victorieux de l'industrie humaine, qu'on peut encore espérer d'en triompher une fois. [11]

2.2. Quelques définitions

Avant d'expliciter plus en détail le mode d'action du plasma sur son environnement, il convient de revenir sur quelques définitions qui permettent de mieux saisir cet objet. La première, historique, est celle donnée par I. Langmuir qui, le premier, introduisit ce mot de « plasma ». Langmuir s'intéressait aux décharges électriques générées en appliquant une tension entre deux électrodes placées dans un tube en verre contenant du gaz à basse pression. Voici ce qu'il constata dans ses tubes à décharge :

except near the electrodes, where there are sheaths containing very few electrons, the ionized gas contains ions and electrons in about equal numbers so that the resultant space charge is very small. We shall use the name plasma to describe this region containing balanced charges of ions and electrons. [12]

On le voit, le plasma désignait, dans l'esprit de Langmuir, une région d'un tube à décharge au sein de laquelle existe un équilibre des charges. Il choisit le terme grec *plasma* qui désigne une entité sans forme propre, moulée par un contenant. Langmuir a probablement choisi ce terme en constatant que cette région, qui s'observe facilement par le rayonnement qu'elle émet, épousait la forme parfois complexe des contenants en verre dans lesquels étaient générées ces décharges.

Une définition plus moderne est rappelée par Moisan [13]. Un plasma est un :

- milieu gazeux (les particules peuvent se mouvoir dans toutes les directions),
- constitué de particules chargées et neutres (électrons, ions),
- macroscopiquement neutre,
- qui manifeste comportements collectifs.

Cet objet physique est défini par un certain nombre de paramètres clefs, en particulier :

- La densité volumique de charge n , qui indique le nombre d'un type de particules par unité de volume, illustrée dans la figure 1(a). Ces particules peuvent être des électrons n_e , des ions n_i ou des neutres n_n . Selon la définition d'un plasma, on a la plupart du temps $n_e \simeq n_i$.
- La température T , qui renseigne sur l'agitation thermique du plasma, figure 1(b). D'un point de vue plus formel, la température est liée à l'énergie cinétique microscopique des particules. Elle peut être définie pour les différentes espèces présentes dans le plasma : les électrons T_e , les ions T_i et les neutres T_n . Une particularité des plasmas est qu'il existe des régimes de déséquilibre, où la température des électrons T_e est très supérieure à la température des espèces lourdes (ions, neutres). On parlera dans ce cas de plasmas « froids ».
- La fraction d'ionisation $\alpha = n_e / (n_e + n_n)$ indique l'abondance relative des espèces chargées (électrons ou ions). Pour un plasma complètement ionisé, $\alpha = 1$. Les plasmas « froids » évoqués précédemment sont usuellement tels que $\alpha \ll 1$.

2.3. Mécanismes de couplages

La dynamique d'un écoulement peut être formellement décrite comme un jeu d'équations de transport pour la densité volumique de masse ρ , la densité volumique d'impulsion $\rho \vec{v}$ et la densité volumique d'énergie ρe . L'action du plasma sur l'écoulement se manifeste de deux façons. Premièrement, le plasma peut agir sur les propriétés thermophysiques du milieu : modification des propriétés thermodynamiques (chaleur massique, rapport des chaleurs spécifiques) ou des coefficients de transport (viscosité, conductivité électrique et thermique). Ce mode d'action peut

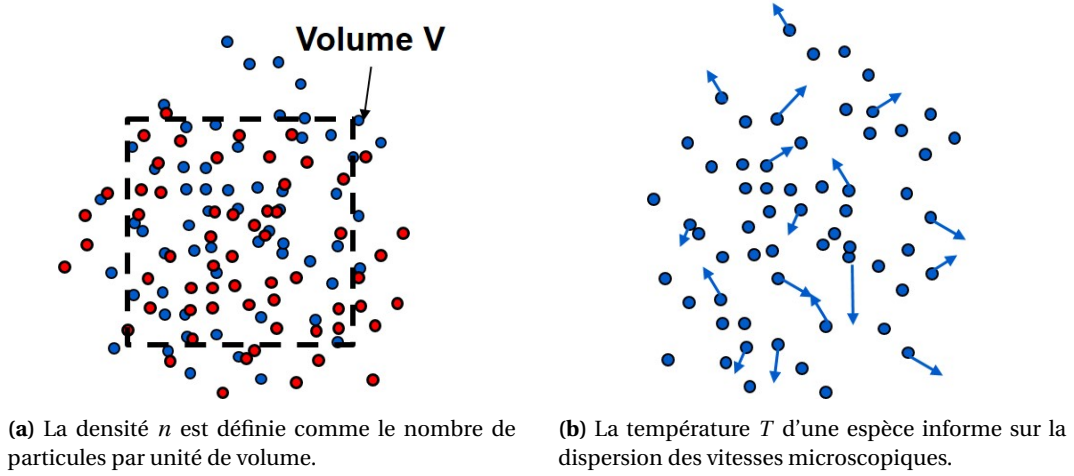


FIGURE 1

être très significatif dans les plasmas thermiques, mais reste marginal pour les plasmas faiblement ionisés. Deuxièmement, le plasma peut agir par le biais de termes sources dans les équations de transport :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{T} + \rho_c \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(u + \frac{1}{2} v^2 \right) + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} \left(u + \frac{1}{2} v^2 \right) = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_U - \vec{T} \cdot \vec{v}) + \vec{j} \cdot \vec{E} + \sigma_E. \quad (3)$$

Ces équations de transport résument les trois modes d'action d'un plasma sur un écoulement : une action mécanique, par les forces de Coulomb ou de Laplace $\rho_c \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B}$, exprimée en Nm^{-3} , une action thermique $\vec{j} \cdot \vec{E} + \sigma_E$ exprimée en Wm^{-3} . À cela s'ajoute une action chimique, qui n'est pas figurée dans ces équations, mais qui se traduit par des termes sources σ_j dans les équations de transport spécifiques à chaque espèce j . Ce terme source est dû à la production d'espèces réactives par le plasma.

Dans cette perspective, l'intérêt du plasma est de permettre un contrôle de cette action thermique, mécanique ou chimique sur un écoulement. Cette action peut être continue, pulsée, avec une dynamique lente ou très rapide devant les temps caractéristiques de l'écoulement. Selon les types de décharge, l'action peut être découplée, c'est-à-dire que la modification induite sur l'écoulement n'est pas suffisante pour rétroagir sur le plasma, ou couplée. Enfin, l'action du plasma peut être en surface ou en volume. La section suivante explore différents exemples d'utilisation de ces mécanismes de couplage pour obtenir une action physique.

3. Exemples d'applications des plasmas pour l'aérospatiale

Dans cette section, on s'attache à présenter trois exemples d'application des plasmas dans le domaine aérospatial. Il s'agit d'une illustration basée sur les travaux de l'auteur ; elle n'est donc pas exhaustive. L'objectif de cet exposé est d'éclairer les propos très généraux de la section précédente par trois cas concrets d'utilisation du *fluide électrique* sur des systèmes aérospatiaux. On posera d'abord deux cas d'étude ayant trait aux écoulements rapides externes (contrôle

d'écoulement) ou internes (allumage et assistance à la combustion). Ces deux cas illustreront le couplage par le terme source d'énergie σ_E dans l'équation (3) : comment le plasma, en permettant un apport d'énergie de topologie et d'intensité contrôlées, permet d'obtenir des effets désirables pour optimiser un système aéronautique. Le dernier cas concernera l'utilisation d'un plasma à très basse pression pour communiquer de la quantité de mouvement à la matière, c'est-à-dire le terme source de force dans l'équation (2).

3.1. Réduction de traînée par filamentation femtoseconde

Pour les écoulements supersoniques, il a été établi expérimentalement et numériquement que l'apport d'énergie en amont de l'écoulement peut permettre une diminution de la traînée significative [4,14]. Selon la description proposée dans les équations (1)–(3), ceci revient à établir un terme source σ_E en amont de l'aéronef. Le plasma est un outil très approprié pour effectuer un tel dépôt d'énergie. Différentes voies ont été explorées : la focalisation de micro-ondes, la génération de décharges continues ou encore l'utilisation de claquages laser. Dans ce dernier cas, un laser impulsionnel est focalisé dans un gaz pour créer un plasma au point focal. Pour une énergie d'impulsion suffisante, l'intensité laser au point focal est telle que les atomes ou les molécules du milieu peuvent être ionisés. Ce claquage laser forme ainsi un volume de plasma au voisinage du point focal. Pour des durées d'impulsions de l'ordre de la nanoseconde, le volume de ce plasma est de quelques millimètres cubes.

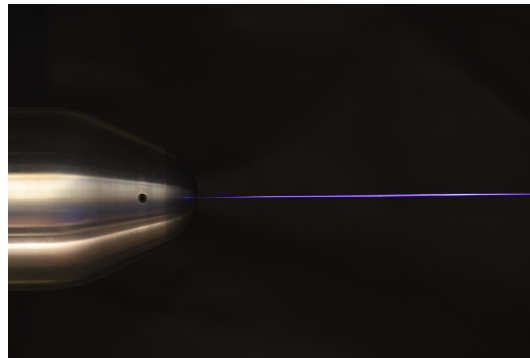


FIGURE 2 – Filament femtoseconde générée à la pression atmosphérique. © ONERA-LOA

Pour des durées d'impulsion inférieures à la picoseconde, la topologie du plasma change significativement. Le plasma se présente sous forme de filaments centimétriques, voire décimétriques. En effet, les impulsions laser ultra-courtes peuvent générer de longues colonnes de plasma continues et faiblement ionisées par un processus dit de filamentation laser [15]. Pour des énergies d'impulsion suffisantes, cette filamentation est due à la compétition entre l'auto-focalisation du faisceau laser par effet Kerr (nonlinéarité de la réponse diélectrique du gaz) et sa défocalisation due à la chute de permittivité dans le plasma. Il résulte de cette compétition la formation d'une colonne de plasma de durée de vie très brève et le chauffage subséquent du gaz lors de sa recombinaison. Ce processus permet donc de déposer de l'énergie en volume, sur une longueur décimétrique. De tels dépôts d'énergie peuvent être intéressants pour modifier la traînée de corps en écoulement rapide. Par analogie avec un dispositif physique parfois placé au nez des ogives supersoniques, ce concept a été appelé « perche laser ». La simulation a montré

qu'un dépôt linéique unique induit une perturbation significative de l'écoulement, et une réduction importante de la traînée sur un profil supersonique générique (dénommé HB2) [16]. La durée caractéristique de la perturbation est de l'ordre de la durée de convection du filament. L'intensité de cette perturbation croît avec l'énergie déposée, mais de manière non-linéaire. Pour des conditions d'un vol supersonique d'une ogive décimétrique, un effet significatif est possible avec une énergie déposée dans le gaz de l'ordre de $0.4\text{--}1\text{ mJ cm}^{-1}$. Depuis la mise en évidence du phénomène de filamentation en 1995, la plupart des études se sont concentrées sur le cas de longs filaments produits en focalisant faiblement des faisceaux (environ 0.5 mJ pour une durée de 100 fs). Cependant, des études au Laboratoire d'Optique Appliquée à l'école Polytechnique ont montré, avec des impulsions femtosecondes plus énergétiques (de 5 à 250 mJ), une augmentation de l'ionisation d'au moins un ordre de grandeur et une augmentation du dépôt d'énergie du même ordre. Dans le dépôt, la température initiale des neutres dans le filament atteint environ 1400 K dans un canal de $150\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre pour une énergie déposée de $800\text{ }\mu\text{J cm}^{-1}$ environ. Lorsqu'on augmente l'énergie laser incidente, ce canal chaud s'élargit et l'énergie laser déposée atteint 4 mJ cm^{-1} ce qui est largement suffisant en théorie pour modifier un écoulement supersonique. Cette hypothèse a été testée dans la soufflerie supersonique R1Ch de l'ONERA, afin de créer un filament en amont d'une maquette, comme le montre la figure 2. En utilisant des moyens de diagnostics optiques (strioscopie nanoseconde, analyseur de front d'onde) et des capteurs montés sur l'ogive, on peut ensuite reconstruire l'interaction entre le filament laser et l'écoulement afin de mettre en évidence l'effet du dépôt d'énergie sur l'écoulement. On observe que le filament génère dans le gaz une onde de choc cylindrique et un canal sous-dense, dû à l'échauffement du milieu. Quand elle est générée en amont de la maquette d'essai, cette zone chaude sous-dense vient interagir avec le choc détaché. La figure 3 montre une visualisation par strioscopie des différentes phases d'interaction entre la colonne chaude et le système de chocs généré par la maquette. L'effet du dépôt est de former une zone décollée de basse pression, en amont du corps, qui diminue transitoirement la traînée. La formation de cette zone décollée est due à l'apparition d'un couple barocline quand le canal sous-dense traverse l'onde de choc. Dans cette configuration, le gradient de densité, dû au canal sous-dense, est principalement radial, tandis que le gradient de pression, dû au choc, est axial. Cette configuration favorise la formation d'une zone tourbillonnaire, qui se transforme en bulle de recirculation en amont de l'ogive. Cette bulle décollée est ensuite convectée vers l'aval, formant un tourbillon toroïdal qui génère une dépression importante lors du passage sur la paroi de l'ogive. Cette dépression entraîne une forte chute du coefficient de traînée. Expérimentalement, on mesure une réduction transitoire de la traînée de l'ordre de 40% [17].

Ces travaux apportent une première preuve expérimentale de la faisabilité du concept de perche laser, montrant ainsi qu'il est possible de modifier significativement un écoulement supersonique à l'aide d'impulsions ultra-courtes de faible énergie générant un plasma en amont d'une ogive. Ils démontrent également que la *perche laser* induit une réduction transitoire de traînée significative. Cette première démonstration reste toutefois encore assez éloignée d'une application pratique pour le contrôle de traînée. En effet, la fréquence de répétition du laser est juste suffisante pour observer un faible effet moyen. Cependant, si on note L la longueur du canal sous-dense formé par le dépôt laser, u_∞ la vitesse amont de l'écoulement et f la fréquence de l'écoulement, une première analyse indique qu'un effet quasi-continu pourrait être observé dès lors que le temps entre chaque impulsion est identique au temps de convection du canal

$$fL/U_\infty \approx 1.$$

Cette relation fait ressortir tout l'intérêt de la filamentation femtoseconde. En effet, si on suppose $U_\infty \sim 1 \times 10^3\text{ m s}^{-1}$ et une impulsion femtoseconde telle que $L \sim 0.1\text{ m}$, on a $f \sim 10\text{ kHz}$. Le grand rapport d'aspect des filaments diminue la cadence nécessaire à l'entretien du phénomène.

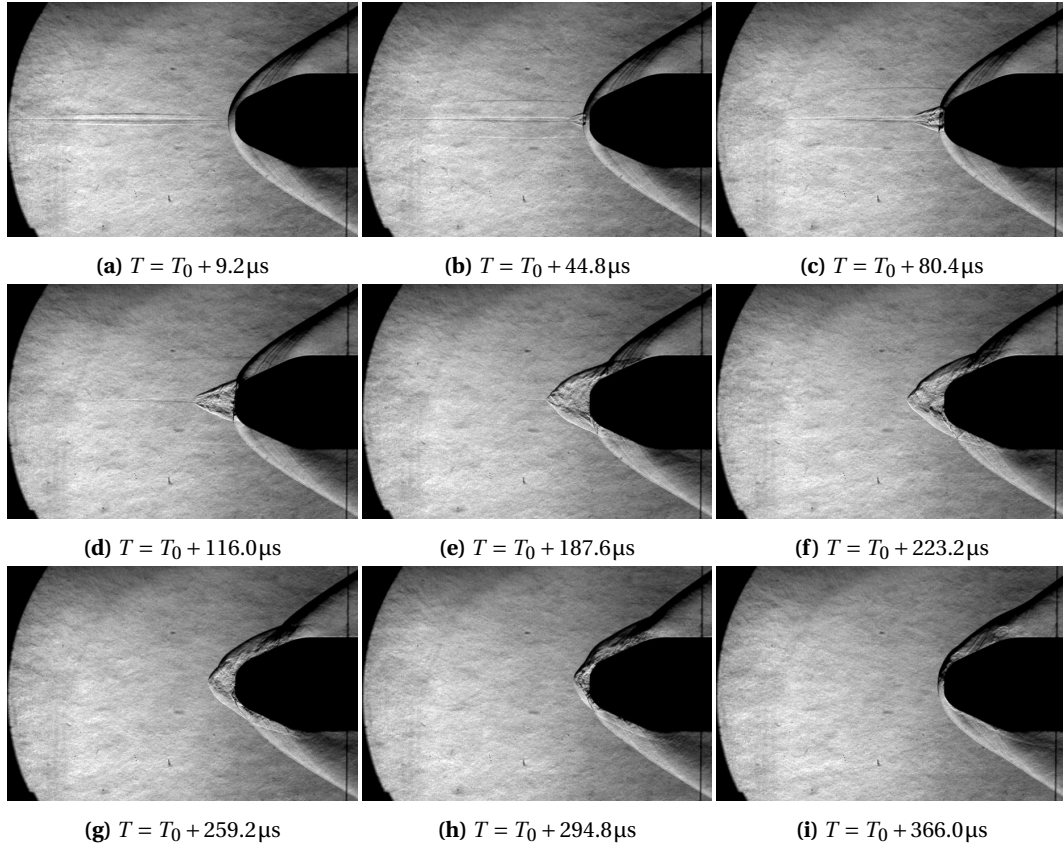
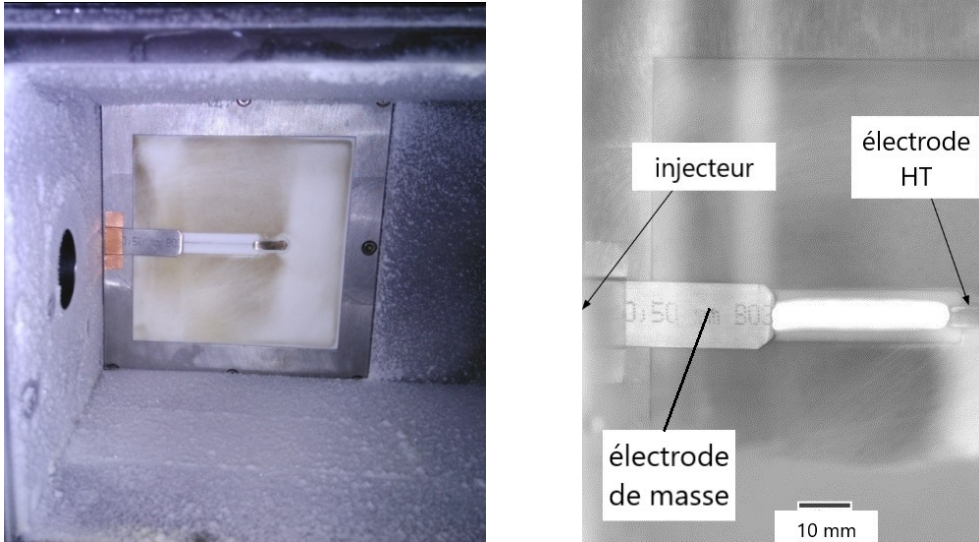


FIGURE 3 – Strioscopie montrant l’interaction du canal de gaz chaud généré par filamentation femtoseconde avec le choc détaché de l’ogive. $M=3$, pression génératrice $P_i = 3.59 \times 10^5$ Pa, température génératrice $T_i = 359$ K, Reynolds unitaire amont $Re_u = 2.9 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, laser LLR à 1064 nm, énergie d’impulsion $E = 250$ mJ et fréquence de répétition du laser $f = 1$ kHz.

L’analyse plus poussée de la dynamique de l’interaction montre que la durée d’expansion de la bulle décollée est encore plus longue que le temps de convection (autour de 0.1–0.2 ms). On peut donc s’attendre à des effets cumulatifs pour des fréquences autour de 5–10 kHz, et observer des effets moyens pour des fréquences encore plus basses (autour de 1 kHz). De nouveaux types de laser, plus compact et opérant à des cadences compatibles avec ces exigences, vont être évalués pour explorer ces effets en régime quasi-permanent.

3.2. Allumage

Un point critique pour l’opération des turbines d’hélicoptère concerne l’allumage ou le ré-allumage en condition de haute altitude. En effet, en cas d’extinction de la turbine en vol, il est nécessaire de la redémarrer rapidement. Pour cela, l’allumeur doit pouvoir initier la combustion avec de l’air froid à une pression inférieure à l’atmosphère. Ce problème se pose également lors d’opérations en altitude ou à très basse température. Les allumeurs aéronautiques sont constitués par des dispositifs très semblables aux bougies automobiles. Un système d’électrodes est alimenté par une impulsion haute-tension pour générer un arc de quelques millimètres cubes.



(a) Bougie plasma dans la chambre de combustion du banc MERCATO. L'injecteur de kérosène est l'orifice à droite. La chambre est refroidie avant essai pour simuler les conditions d'allumage à basse température.

(b) Vue de la décharge de surface dans la chambre de combustion. La décharge s'établit entre l'électrode HT et la masse.

FIGURE 4

En condition froide et déprimée, cette excitation est insuffisante pour garantir l'allumage à la stœchiométrie. On est alors obligé d'augmenter la richesse Φ du mélange assez significativement pour allumer la chambre. La richesse Φ est définie comme le nombre de mole de carburant par unité de masse du mélange, rapporté à ce même nombre de mole par unité de masse pour un mélange stœchiométrique. Augmenter la richesse signifie l'injection de plus de carburant que le régime idéal, entraînant une dégradation des performances.

Or, certaines configurations d'électrodes asymétriques, combinées à des impulsions haute-tension microseconde, génèrent des décharges filamenteuses se propageant en surface sur des distances centimétriques. Cette propriété permet de déposer de l'énergie de manière quasi-linéique [18]. Elle peut notamment être exploitée pour l'allumage ou le ré-allumage de foyers aéronautiques. En effet, contrairement aux bougies, la décharge de surface permet de générer un arc sur des longueurs centimétriques. Ceci se traduit par un plus grand volume de plasma, qui a pour conséquence d'augmenter la probabilité d'avoir des conditions favorables à l'allumage pour un champ fluctuant donné. La figure 4(a) montre un tel dispositif de décharge de surface installé dans le banc MERCATO de l'ONERA. Ce banc permet notamment d'étudier l'allumage sur des injecteurs « swirlés » typiques de turbines aéronautiques. En alimentant l'allumeur avec de l'air et du kérosène refroidis, en régime déprimé (environ 0.6 atmosphère) il simule les régimes d'allumage les plus contraignants.

Dans l'expérience, la décharge présente une extension de 33 mm, comme le montre la figure 4(b). La figure 5 présente le résultat d'une série d'essais d'allumage à basse pression et basse température. Pour la bougie aéronautique classique, il est nécessaire d'augmenter la richesse à $\Phi = 2.17$ pour garantir un allumage à basse température. Avec l'allumeur à décharge de surface, l'allumage est obtenu même pour une richesse de $\Phi = 1.22$ à basse température et à l'atmosphère, et pour une richesse inférieure à $\Phi = 1.5$ à basse température et basse pression. On parvient ainsi

à diminuer significativement la richesse minimale nécessaire à l'allumage. Ce résultat illustre l'effet de la topologie sur la performance d'allumage. L'extension plus importante du plasma augmente la probabilité d'allumage et autorise un fonctionnement en régime nominal, même dans des conditions d'altitude.

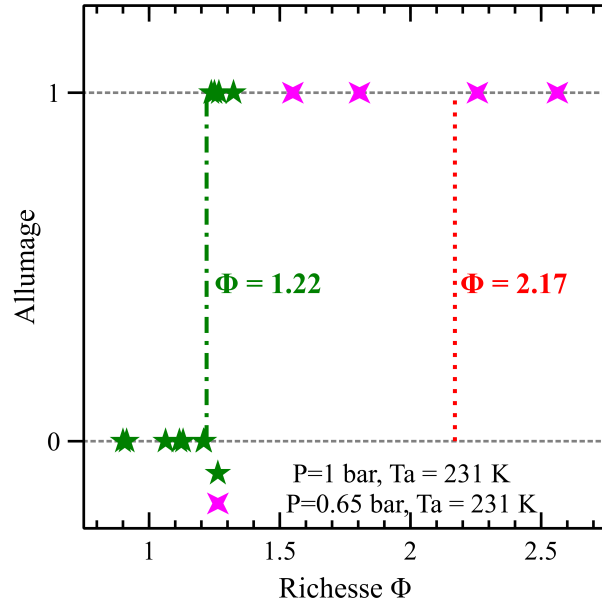


FIGURE 5 – Probabilité d'allumage en fonction de la richesse, pour de l'air refroidi à 231 K. La richesse minimum pour garantir l'allumage pour la bougie classique est figurée en rouge.

3.3. Propulsion spatiale

Au cœur du propulseur électrique se trouve un plasma dont le rôle est d'ioniser l'ergol pour permettre son accélération par des forces électromagnétiques. Comme évoqué dans l'introduction, l'idée d'accélérer des charges électriques pour générer, par réaction, une force propulsive n'est pas nouvelle et a été évoquée dès le début de la conquête spatiale. Ce concept a progressé tout au long du XX^{ème} siècle, principalement développé dans le cadre de missions institutionnelles, avant de s'imposer très récemment comme le type de propulsion majoritaire avec l'explosion du nombre de satellites en orbite, dû principalement aux méga-constellations. Le grand intérêt de la propulsion électrique est de permettre des vitesses d'éjection de la matière d'ordre de la dizaine de kilomètres par seconde, là où la propulsion chimique ne permet que des vitesses de l'ordre du kilomètre par seconde. Actuellement, deux grands types de propulseurs électriques se disputent le marché : les propulseurs à courant de Hall et les propulseurs à grilles [19]. En parallèle, de nouveaux concepts sont étudiés pour remédier à certaines limitations de ces deux technologies. La principale est due à la nécessité de neutraliser le faisceau de particules chargées accélérées, afin de conserver la neutralité du satellite. C'est le rôle du neutraliseur, qui doit être une source d'électrons extrêmement performante et efficace mais, par voie de conséquence, fragile, notamment sur la durée de vie de plusieurs milliers d'heures [7]. Parmi les nouveaux concepts de propulseurs électriques qui sont actuellement étudiés en laboratoire, ceux ne nécessitant pas de neutraliseurs sont particulièrement intéressants pour circonvenir ce problème. Ces nouvelles

configurations de propulseurs (propulseur Hélicon ou propulseur à résonance cyclotronique des électrons) proposent d'utiliser un champ magnétique statique pour créer une tuyère magnétique permettant, comme dans le cas d'une tuyère physique, d'accélérer le plasma.

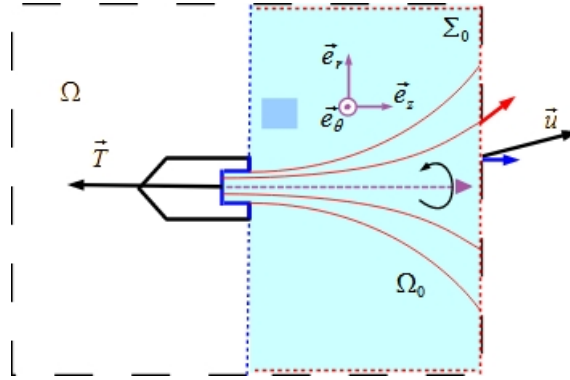


FIGURE 6 – Représentation schématique du volume de contrôle et du propulseur. Le bilan de quantité de mouvement sur le volume Ω_0 permet d'exprimer la poussée comme la somme d'une contribution volumique due à la force de Lorentz et d'une contribution surfacique due à la pression et à la convection (cf. eq. (4)). Les lignes de champ magnétique sont représentées en rouge.

Pour étudier l'éjection du plasma dans ces configurations, ainsi que l'effet d'une tuyère magnétique, une approche simple utilise une description magnétohydrodynamique (MHD) du plasma. Ce modèle décrit le plasma comme un mono-fluide chargé, soumis à la force de Lorentz, qui est représentée par le terme $\vec{j} \times \vec{B}$ dans l'équation de conservation de quantité de mouvement (2). En définissant un volume de contrôle tel que présenté dans la figure 6, une intégration de l'équation de conservation de quantité de mouvement du fluide permet d'écrire la projection de la poussée T selon l'axe z comme [20] :

$$T_z = \underbrace{\int_{\Omega_0} j_{\theta e} B_r dV}_{\text{poussée magnétique}} + \underbrace{\int_{\Sigma_T} (\rho_i U_z (\vec{U} \cdot \vec{n}) + p n_z) dS}_{\text{poussée cinétique}}. \quad (4)$$

L'équation (4) montre que la poussée du propulseur avec tuyère magnétique s'exprime comme la somme d'une contribution cinétique et d'une contribution magnétique. Le premier terme est dû au transfert de quantité de mouvement des particules chargées impactant les parois, qui comprend un terme convectif $\rho_i U_z U_n$, où ρ_i est la masse volumique des ions et U leur vitesse, et un terme de transport microscopique p , la pression. Le second terme apparaît du fait du développement de courants électroniques azimuthaux $j_{\theta e}$ dans le plasma. Ces courants vont interagir avec le champ magnétique. Pour une tuyère divergente ($B_r > 0$), on voit que les courants électroniques paramagnétiques ($j_{\theta e} > 0$) réduisent la poussée, tandis que les courants électroniques diamagnétiques ($j_{\theta e} < 0$) augmentent la poussée [20]. Ceci est identique à la force qui s'établit entre deux spires de courant. Si les courants sont dans le même sens, les deux spires s'attirent, ce qui correspond au cas de courants électroniques paramagnétiques. Si les courants sont dans le sens opposé, les deux spires se repoussent, correspondant au cas diamagnétique.

La figure 7 illustre ce cas de figure dans le cas d'une source de plasma cylindrique située dans un champ magnétique purement divergent, typique de la configuration du propulseur ECR développé à l'ONERA [21,22]. Le plasma se détend en suivant initialement les lignes de champ magnétique. Cette détente permet d'accélérer les ions. La figure 8 montre les zones où la force

volumique $j_{\theta e} B_r$ s'applique, essentiellement sur la périphérie du jet de plasma où un courant électronique azimuthal significatif s'établit.

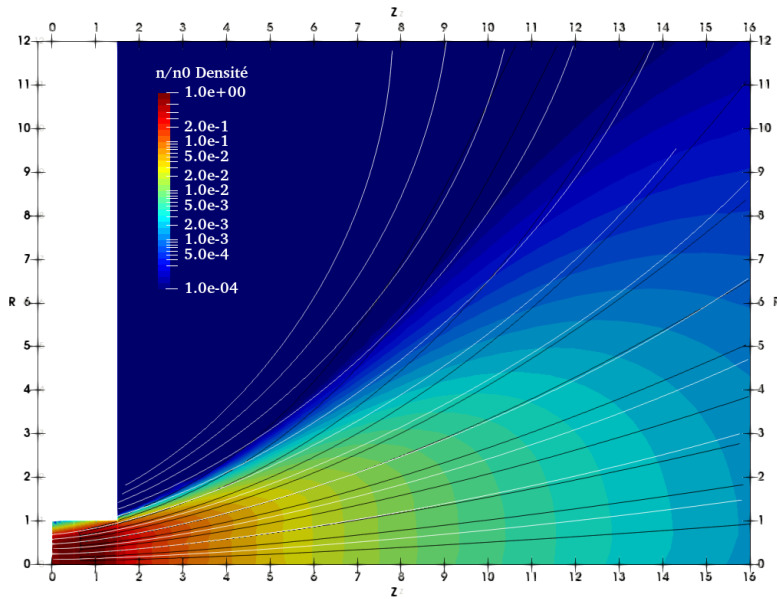


FIGURE 7 – Coupe R-Z montrant la densité adimensionnée dans la tuyère magnétique. Les lignes de champ magnétique sont en blanc, les lignes du champ de vitesse plasma en noir. Paramètre du calcul : $\delta = m_e / M_i$ du xénon, $R/r_{ci} = 10$, où r_{ci} est le rayon cyclotronique des ions.

4. Conclusion

Les savants des Lumières, observateurs du « fluide électrique », ont rapidement spéculé sur son intérêt pour « corriger la nature dans ses écarts », comme le proposait Bertholon. En résonance avec cette considération, les travaux menés actuellement sur l'utilisation des plasmas sur des systèmes aérospatiaux (aéronefs, satellites) connaissent une croissance continue. Le présent article a illustré certaines applications pour le contrôle d'écoulement, l'assistance à la combustion ou encore la propulsion spatiale. Ces trois exemples constituent un échantillon des travaux actuellement menés, qui peut être considéré comme représentatif des trois grandes classes de problèmes. Bien sûr, il en existe d'autres. Pour donner quelques exemples, on peut citer l'actuation magnétohydrodynamique d'écoulement de rentrée [23], le dégivrage par plasma [24], la furtivité électromagnétique [25] et la fonctionnalisation de surface par plasma, ce dernier sujet étant largement étudié dans de nombreuses industries, en particulier la microélectronique.

Si le domaine d'usage des plasmas pour l'industrie aérospatiale est étonnamment varié, pour l'heure peu de dispositifs sont passés au stade opérationnel. Parmi ceux-ci, on peut compter les systèmes de propulsions par plasma historiques comme les propulseurs à courant de Hall ou les propulseurs à grille [2] qui forment maintenant une grande partie des systèmes propulsifs lancés en orbite. La vague du « Newspace » a permis une accélération de tests en orbite de nouveaux concepts de propulseurs, étape clef pour le déploiement de nouveaux types de propulseur à plasma. Pour les applications aéronautiques, la plupart des dispositifs à l'étude sont encore au stade d'objet de laboratoire ou de prototype. Plusieurs raisons expliquent cela. Dans certains cas,

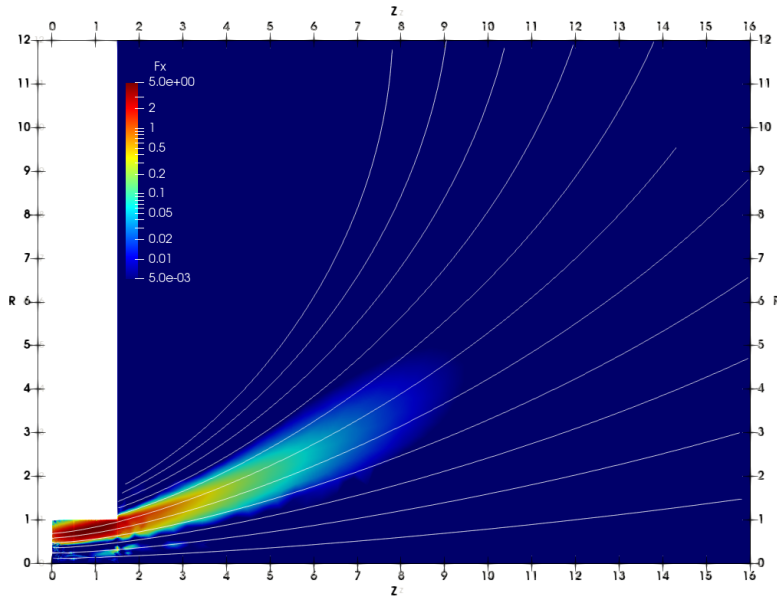


FIGURE 8 – Coupe R-Z du terme de force volumique $F_x = j_{\theta e} B_z$, dans la tuyère magnétique. Les lignes du champ de vitesse sont en noir.

il reste des questions ouvertes ou des inconnues sur les mécanismes d'action des plasmas [3,4]. Dans d'autres, il reste des obstacles au déploiement opérationnel du système. En effet, si l'efficacité intrinsèque du dispositif plasma est un facteur déterminant (ex. combien de pourcent de traînée réduite, quel gain sur les limites d'extinction d'une chambre de combustion), ce n'est pas le seul. Un dispositif d'actuation plasma doit également utiliser un convertisseur d'énergie efficace pour ne pas dégrader l'efficacité totale. Il doit être fiable et présenter une durée de vie suffisante pour ne pas alourdir la maintenance, il ne doit pas perturber d'autres systèmes (par exemple en provoquant des perturbations électromagnétiques) ou introduire une faiblesse dans la sécurité, comme par exemple la protection à la foudre. Ainsi, l'emploi d'une technologie plasma permettant un gain de performance incrémental ne se justifiera que si elle induit un accroissement également incrémental du coût et de la complexité. A contrario, un système plasma promettant un gain disruptif pourra légitimement demander un effort plus conséquent pour son déploiement.

Pour certaines missions dans l'industrie spatiale, cet équilibre entre les gains et les coûts a peu à peu basculé en faveur de la propulsion par plasma. Ce basculement a été lent à advenir, il a nécessité une recherche constante depuis le début des missions spatiales. Mais une fois enclenché, sa rapidité a surpris plus d'un observateur. Pour le domaine aéronautique, paradoxalement, l'effort de recherche est beaucoup plus récent, mais il est très probable que, comme pour l'industrie spatiale, un mouvement d'adoption de systèmes plasma s'opère graduellement puis se généralise. Les études à venir pour parvenir à l'adoption de ces dispositifs plasma s'annoncent passionnantes. En un sens, elles poursuivront l'ambition de Bertholon de maîtriser le « fluide électrique ».

Remerciements

L'auteur remercie l'association ONERA-Alumni pour l'organisation du Colloque en hommage à P. Bertholon, ainsi que les nombreux chercheurs et personnels de l'ONERA ou d'ailleurs qui sont

associés aux travaux présentés ci-dessus. En particulier, l'auteur remercie Mikaël Orain, Nicolas Séverac, Jean-Marc Luyssen, Jean-Pierre Tobeli, Reynald Bur, Aurélien Houard, Julien Jarrige, Denis Packan, Philippe Castera et Christophe Laux.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que ses organismes de recherche.

Références

- [1] E. Lenoir, Gas-Engine, brevet US, US345596A, 1886.
- [2] E. Choueiri, « A critical history of electric propulsion : the first fifty years (1906–1956) », in *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, American Institute of Aeronautics et Astronautics, 2004.
- [3] J. Kriegseis, B. Simon et S. Grundmann, « Towards in-flight applications? A review on dielectric barrier discharge-based boundary-layer control », *Appl. Mech. Rev.* **68** (2016), no. 2, article no. 020802 (41 pages).
- [4] D. Knight et N. Kianvashrad, « Review of energy deposition for high-speed flow control », *Energies* **15** (2022), no. 24, article no. 9645 (40 pages).
- [5] S. B. Leonov, I. V. Adamovich et V. R. Soloviev, « Dynamics of near-surface electric discharges and mechanisms of their interaction with the airflow », *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016), no. 6, article no. 063001 (32 pages).
- [6] Y. Ju et W. Sun, « Plasma assisted combustion : dynamics and chemistry », *Prog. Energy Combust. Sci.* **48** (2015), p. 21–83.
- [7] E. Dale, B. Jorns et A. Gallimore, « Future directions for electric propulsion research », *Aerospace* **7** (2020), no. 9, article no. 120 (30 pages).
- [8] C. F. de Cisternay du Fay, « Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction & répulsion des corps électriques », *Mém. Acad. R. Sci.* **1733** (1733), p. 457–476.
- [9] J. L. Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th centuries : a study of early modern physics*, University of California Press, 1979, xiv+606 pages.
- [10] P. Bertholon, *Mémoire sur un nouveau moyen de se préserver de la foudre*, Jean Martel Ainé, 1777, 30 pages.
- [11] P. Bertholon, *De l'électricité des végétaux : ouvrage dans lequel on traite de l'électricité de l'atmosphère sur les plantes, de ses effets sur l'économie des végétaux, de leurs vertus médico & nutritivo-électriques, & principalement des moyens de pratique de l'appliquer utilement à l'agriculture, avec l'invention d'un électro-végétomètre. Avec figures en taillédouce*, Didot Jeune, 1783, xvi+468 pages.
- [12] I. Langmuir, « Oscillations in ionized gases », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **14** (1928), no. 8, p. 627–637.
- [13] M. Moisan et J. Pelletier, *Physics of collisional plasmas : introduction to high-frequency discharges*, Springer, 2012, xxiv+480 pages.
- [14] D. Knight, « Survey of aerodynamic drag reduction at high speed by energy deposition », *J. Propul. Power* **24** (2008), no. 6, p. 1153–1167.
- [15] A. Houard et A. Mysyrowicz, « Femtosecond laser filamentation and applications », in *Light filaments : structures, challenges and applications* (J.-C. Diels, M. C. Richardson et L. C. Arissian, eds.), Institution of Engineering et Technology, 2021, p. 11–30.
- [16] P.-Q. Elias, « Numerical simulations on the effect and efficiency of long linear energy deposition ahead of a supersonic blunt body : toward a laser spike », *AerospaceLab J.* (2015), no. 10, article no. AL10-03 (11 pages).
- [17] P.-Q. Elias et al., « Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation », *Sci. Adv.* **4** (2018), no. 11, article no. eaau5239 (5 pages).
- [18] P.-Q. Elias et P. Castera, « Measurement of the impulse produced by a pulsed surface discharge actuator in air », *J. Phys. D : Appl. Phys.* **46** (2013), no. 36, article no. 365204 (12 pages).
- [19] D. M. Goebel et I. Katz, *Fundamentals of electric propulsion : ion and Hall thrusters*, John Wiley & Sons, 2008, xv+509 pages.
- [20] K. Takahashi, T. Lafleur, C. Charles, P. Alexander et R. W. Boswell, « Electron diamagnetic effect on axial force in an expanding plasma : experiments and theory », *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011), no. 23, article no. 235001.
- [21] F. Cannat, T. Lafleur, J. Jarrige, P. Chabert, P.-Q. Elias et D. Packan, « Optimization of a coaxial electron cyclotron resonance plasma thruster with an analytical model », *Phys. Plasmas* **22** (2015), no. 5, article no. 053503.
- [22] T. Vialis, J. Jarrige, A. Aanesland et D. Packan, « Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster », *J. Propul. Power* **34** (2018), no. 5, p. 1323–1333.

- [23] T. Fujino, Y. Matsumoto, J. Kasahara et M. Ishikawa, « Numerical studies of magnetohydrodynamic flow control considering real wall electrical conductivity », *J. Spacecr. Rock.* **44** (2007), no. 3, p. 625-632.
- [24] C. Kolbakir, H. Hu, Y. Liu et H. Hu, « An experimental study on different plasma actuator layouts for aircraft icing mitigation », *Aerosp. Sci. Technol.* **107** (2020), article no. 106325.
- [25] X. Liu, J. Zhang, C. Luo, M. Dang, M. Lin et P. Zhang, « Experiment and simulation of electron density distribution in discharge plasma at hypersonic speed », *AIP Adv.* **13** (2023), no. 9, article no. 095307 (14 pages).



Review article

From electroculture to plasma agriculture: a three-century arc bridging Bertholon's legacy with contemporary farming advances

Thierry Dufour^{®,a}

^a Laboratoire de Physique des Plasmas, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, Sorbonne Université, CNRS, École polytechnique, France
E-mail: thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

Abstract. This review traces the historical trajectory of electricity in agriculture, from the earliest observations of electrical phenomena to the emergence of cold plasmas. Looking back to Antiquity and then to the Enlightenment, it underlines Abbé Bertholon's 18th-century efforts to channel atmospheric electricity to stimulate crops, using devices such as the electro-végétomètre. Although these early electroculture experiments relied on neither quantitative dosimetry nor rigorous methodology, they foreshadowed the idea of a controlled transfer of electrical energy to plants. Then the review examines the historical development of galvanism, electrochemistry, and the physics of gaseous discharges throughout the 19th and 20th centuries, which collectively laid the foundations for contemporary cold-plasma technologies. In the 21st century, plasma agriculture has emerged as an interdisciplinary approach integrating electrical, chemical, radiative, thermal, and fluid-mechanical effects. Applications include seed treatment (preconditioning, seed priming), stimulation of plant growth, soil and water treatment, and decontamination of agri-food products. The review thus reassesses Abbé Bertholon's contributions as those of a methodological precursor and shows how his intuition of a “vivifying electricity” resonates with modern cold-plasma science. Finally, it argues that plasma agriculture can transform an Enlightenment intuition into a reproducible experimental framework for sustainable agriculture and food safety.

Keywords. Electroculture, Plasma agriculture, Cold atmospheric plasma, Abbé Bertholon, Reactive oxygen and nitrogen species, Seed priming, Sustainable agriculture.

Note. Article submitted by invitation.

Manuscript received 27 August 2025, revised 13 October 2025, accepted 14 October 2025, online since 23 February 2026.

1. Electricity and agronomy: a historical trajectory from Antiquity to the 21st century

1.1. *Electricity (Antiquity-18th century): from experimental spectacle to metrological instrumentation*

From Antiquity to the end of the 18th century, the study of electrical phenomena evolved from a qualitative curiosity to a quantitative, instrument-based practice. Early authors such as Theophrastus (*De lapidibus*) and Pliny the Elder (*Natural History*) noted the attraction of straw and other light objects by rubbed amber (ēlektron) and jet (gagates), while medical authors (e.g., Scribonius Largus, Galen) reported the analgesic use of electric fish (torpedoes) [1–3]. Medieval lapidaries and encyclopedias widely transmitted these observations in descriptive form,

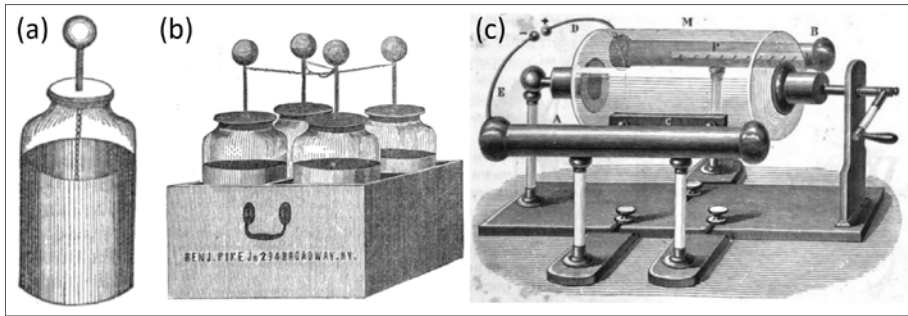


Figure 1. (a) Leyden jar: a glass vessel acting as the dielectric, with an inner tin-foil lining connected by a chain to the top terminal; an outer foil (grounded, not shown here) forms the second armature. Charge is stored between the two foils separated by the glass [19]. (b) Battery of Leyden jars (“Franklin battery”) in a wooden case. The inner electrodes of the jar are bus-bar connected; the outer foils are commoned through the box, forming a parallel array that increases total capacitance and stored energy for stronger discharges [19]. (c) Nairne’s cylinder electrical machine (c. 1770s). Hand-cranked glass cylinder rubbed by a cushioned exciter generates charge; collecting combs feed the insulated prime conductors (foreground bars). Polarity can be selected by connecting either end of the cylinder and a Leyden-jar terminal allows storage and discharge for demonstrations and experiments [20].

with Albertus Magnus’ *De mineralibus* being the emblematic example [4]. During the Renaissance, Girolamo Cardano (*De subtilitate*, 1550) and Giambattista della Porta (*Magia naturalis*, 1558/1589) expanded the inventory of “electric bodies” (amber, jet, diamond, sapphire) capable of attracting small particles after friction [5,6]. The thread of observation thus remained continuous until the end of the 16th century, but was essentially qualitative: there were no calibrated instruments and procedures were poorly standardized.

A conceptual consolidation began with William Gilbert’s work *De Magnete* (1600), who coined the term “electricus” and clearly distinguished electrical attractions from magnetism [7]. In the 17th and early 18th centuries, friction machines multiplied demonstrations and made the production of charges more reliable and visually convincing: Otto von Guericke’s sulfur globe (1660s) and Francis Hauksbee’s luminous glass globes (1705–1710) are canonical examples [8,9]. Stephen Gray’s experiments (1729) established conduction and insulation as distinct behaviors and Charles-François de Cisternay du Fay (1733) organized the effects under a “vitreous/resinous” duality [10,11]. Nevertheless, according to subsequent metrological standards and in the absence of sustainable charge storage and common measurement conventions, electricity remained a theater of demonstration (sparks, “electric kiss”, bristling hair).

It was only in the 1740s that advances in instrumentation created the conditions for cumulative experiments and comparative methods. The Leyden jar, developed independently by E.-G. von Kleist and P. van Musschenbroek (1745–1746), was the first reliable device for storing electrical charge, making it possible to repeat protocols and compare outcomes systematically (Figure 1a). Linking several jars in parallel to form a “battery” further increased storage capacity and enabled more powerful discharges (Figure 1b) [12–14]. At the same time, electrostatic machines became both more standardized and more powerful, exemplified by Nairne’s cylinder (1773; Figure 1c) and van Marum’s monumental generator (1784). These devices reflected not only the growing technical capacity of the sources but also a nascent ambition to measure and quantify electrical effects [15,16]. Public demonstrations provided a bridge between spectacle and experiment: on March 14, 1746, Abbé Nollet famously discharged a Leyden jar through a chain of the king’s guards at Versailles and then through Carthusian monks. Such iconic moments dramatized electricity as a visible, collective phenomenon while simultaneously consolidating experimental techniques and a shared community of practice [17,18].

In parallel, metrological tools multiplied and gradually shifted attention from spectacle to measurement. Franklin's demonstration of the equivalence between lightning and electricity and his promotion of the lightning rod (1750–1752), redirected interest toward the controlled delivery of charge. These claims also sparked a widely read debate with Nollet [17,21,22]. Building on this shift toward quantification, Lane's spark-reading electrometer (1767) allowed the quantification of Leyden jar discharge, while the Henley quadrant (1770) introduced a single-index measure of repulsion that was rapidly disseminated by Nairne and documented by Priestley (1772) [23–25]. H.-B. de Saussure extended electrometers to atmospheric studies during the 1760s–1780s [26]. This quantitative turn culminated with Coulomb's torsion balance (1785), which yielded the first precise law of electrical forces [27]. At the same time, synthesis works such as Priestley's *History and Present State of Electricity* (1767/1769), Cavallo's *Complete Treatise of Electricity* (1777) and Beccaria's *Dell'elettricismo artificiale e naturale* (1753) organized the expanding literature and, crucially, framed “artificial” and atmospheric electricity within a single analytic perspective [14,28–30]. Collectively, these developments established a proto-metrology of electricity: systematic measurement practices and conceptual unification were now in place, even if standardized units and calibrated scales were only beginning to emerge.

Having established tools for storage, delivery and measurement, the first applications to living systems began to emerge. In 1783, Bertholon's *De l'électricité des végétaux* introduced the “electro-végétomètre,” a device designed to capture and channel atmospheric electricity toward crop beds, as detailed in Section 2.3 [31]. In his treaty, Bertholon mentions a broader set of contemporary experiments that suggested electricity had a stimulating effect on vegetation. Stephen Demainbray in the 1740s electrified myrtles and observed accelerated growth, results confirmed by Abbé Nollet on mustard seeds and Jean Jallabert on hyacinth and daffodil bulbs. Georg Matthias Bose and Abbé Menon described similar effects on shrubs and buds. Later, Edouard-François Nunebert compared electrified and non-electrified onion bulbs, noting faster germination and taller stems, while Abbé d'Ormoys reported thicker bases and stronger roots across several species. Jean-Paul Marat claimed positive results on cress and lettuce and Franz Karl Achard made similar observations on crop plants [31].

By the close of the 18th century, a rudimentary metrology of electricity had thus taken shape: storage through the Leyden jar, delivery via standardized machines and conductors and measurement with electrometers and the torsion balance. This transition, from spectacular display to instrumented practice, prepared the ground for the galvanic and electrochemical breakthroughs of the 1790s (Section 1.2) and, more broadly, for later process-oriented uses where measurable inputs and controlled exposures would become central.

1.2. 1790–2000: From galvanism to controlled discharges and their processes

Following the debates at the end of the 18th-century debates, Volta's invention of the pile (1799–1800; Figure 2a) marked a decisive turning point. For the first time, experimenters had access to a continuous, controllable and reproducible source of current [32]. Through the 19th century, this foundation was reinforced by the standardization of instruments and units: precision galvanometers and bridges, standard cells and the practical volt–ohm–ampere system together provided a calibrated metrological framework. Electricity, once confined to episodic demonstrations, was transformed into a measurable flow, available on demand and suitable for serial, comparable protocols.

On this basis, Faraday formalized the laws of electrolysis in the 1830s, establishing both a conceptual and an operational framework for the conversion of electricity into chemistry [36]. In biology, the same stability of supply opened up new paths. In 1873, Burdon-Sanderson recorded action potentials in *Dionaea muscipula*, showing that plant movements could be associated

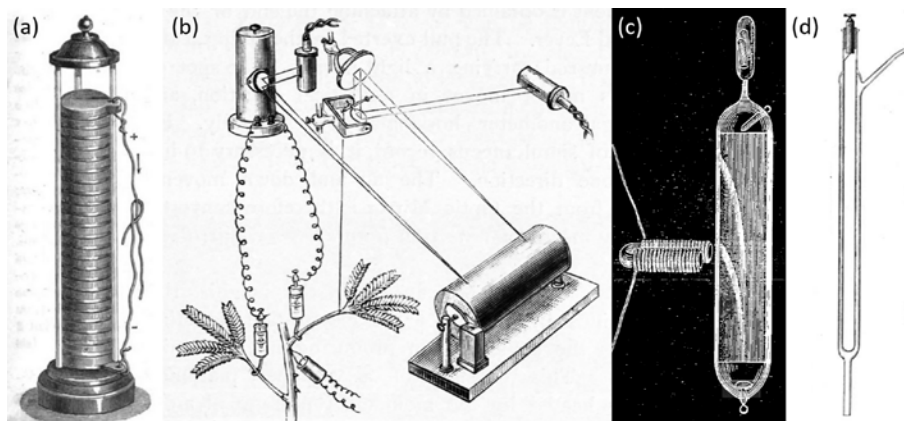


Figure 2. (a) Voltaic pile (1800): column of alternating zinc-copper disks separated by brine-soaked washers. Polarity is set by couple orientation: the end toward the zincs is negative, toward the coppers positive (modern convention). Removing terminal plates does not change polarity. Side leads provide (+)/(-) connections [20]. (b) Bose's apparatus for simultaneous mechanical and electrical responses: an induction-coil stimulator; a mirror galvanometer records the electrical trace, an optic lever the movement; lamp-reflected beams write on a rotating kymograph; latency yields stimulus-response relations [33]. (c) Crookes tube (high vacuum): a phosphorescent screen and a slotted mica diaphragm form a beam of cathode rays; a magnet deflects the beam, demonstrating negative charge and magnetic sensitivity [34]. (d) Werner von Siemens's first ozonizer (1857): glass discharge tube operating a "silent" dielectric-barrier discharge; dry air/oxygen traverses the annular gap where ozone is produced [35].

with discrete electrical signals [37]. A generation later, Bose extended this program into plant electrophysiology, developing instruments and methods to detect, transmit and analyze plant signals (Figure 2b) [33]. The idea that an electrical stimulus could modulate measurable plant functions (movements, conduction, responses to stress) was thereby firmly established, laying the groundwork for systematic bioelectrical experimentation.

From the second half of the 19th century, a true metrology of discharges began to emerge, extending far beyond the simple spark. In 1889, Paschen formulated his law relating breakdown voltage to pressure and electrode spacing, giving experimenters a predictive tool for designing and scaling apparatus [38]. A decade later, Townsend's ionization theory (1897–1901) clarified the avalanche multiplication of electrons and established the different regimes of gaseous discharge [39,40]. In parallel, new instruments opened wider experimental spaces: Geissler's tubes and Crookes's rarefied-gas experiments (Figure 2c) revealed the diversity of luminous and conductive phenomena under reduced pressure [34,41]. As early as 1857, Werner von Siemens described the dielectric barrier discharge (DBD) also known as "silent discharge", as a practical source for ozone generation (Figure 2d) [35]. By 1928, Langmuir gave this domain its modern vocabulary, introducing the term *plasma* to describe a quasi-neutral ionized gas [42]. Taken together, these advances transformed the conception of electrical discharge. What had once been understood as a fleeting spark now appeared as a controllable medium, with stabilizable regimes and tunable energy input.

On this metrological foundation, structured chemical applications quickly followed. Siemens's dielectric barrier discharge ozonizers, developed in the late 19th century, enabled large-scale water ozonation and gave the "silent discharge" its first industrial role [43,44]. A few years later, the Birkeland-Eyde arc (1903, Figure 3a) harnessed high-temperature plasmas to oxidize atmospheric nitrogen, producing nitrates and nitrous acids as precursors for fertilizers [45]. Alongside these advances, low-pressure mercury-vapor lamps systematized the germicidal use

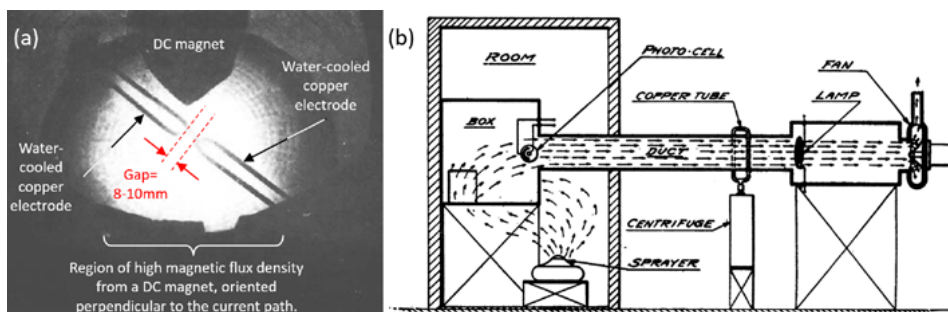


Figure 3. (a) Birkeland–Eyde disc flame. An AC arc between water-cooled copper tips is blown into a rotating circular sheet by a transverse magnetic field between the pole faces. The time-averaged luminous disc is the hot reaction zone used to form NO in air [45]. (b) UV-germicidal aerosol test duct (15 ft × 1 ft): room air seeded with atomized *E. coli* passes a mixing box and a low-pressure mercury lamp (UV-C ≈ 254 nm); a perforated copper traverse tube feeds Wells air centrifuges; a tantalum photocell monitors irradiance; an axial fan sets the flow [48].

of ultraviolet radiation: their characteristic 254 nm emission was applied to air and water disinfection in experimental setups such as Rentschler's (Figure 3b) [46–48].

At the beginning of the 20th century, electroculture experienced renewed interest, with attempts to exploit atmospheric electricity as a stimulus for plant growth. Devices ranged from Lemström's overhead networks of charged wires above fields to Christofleau's so-called “atmospheric” antennas [49,50]. As shown in Figure 4a, the latter were designed to channel “natural electricity” from diverse sources (wind, clouds, sunlight, rain and even telluric currents) into the soil. In practice, however, the antenna functioned primarily as a charged conductor exposed to atmospheric potential gradients, behaving more like a lightning rod than a genuine energy transfer system. Though scientifically unfounded, such instruments helped popularize the notion of directing “sky electricity” toward crops. Figure 4b depicts their application to grapevines, while Figure 4c illustrates reports of enhanced bean growth compared with controls fertilized only with manure. Yet these outcomes must be interpreted with caution: fertilization regimes, soil heterogeneity, seasonal effects, rainfall and cultivation practices were poorly controlled and device geometries and polarities varied considerably. Consequently, these trials are best understood as part of a genealogy of ideas and technical imagination, rather than as rigorous demonstrations of efficacy. Their true legacy lies in shaping the concept of a controlled transfer “sky → soil/plant” and in fostering agronomic observation (emergence, yields), foreshadowing later, quantitatively controlled approaches based on explicit, traceable dose metrics.

This historical current of electroculture, however, did not directly evolve into or compete with plasma-based technologies. The latter emerged independently much later, at the end of the 20th century, driven not by the legacy of “sky electricity” but by advances in plasma physics and its biomedical applications. Whereas electroculture remained speculative and pre-metrical, cold plasma research developed within a rigorous framework of controlled discharges and quantitative dosimetry. Hence, from the 1970s onward, cold plasmas began to be investigated as low-temperature agents for sterilization and surface decontamination. Initial work focused on low-pressure plasmas to inactivate microorganisms on medical materials and devices. By the 1990s, these methods entered healthcare practice, most notably through hydrogen peroxide gas-plasma sterilizers for heat-sensitive instruments [51,52]. In the mid-to-late 1990s, a further step was achieved with the emergence of atmospheric sources (including DBDs, glidarc reactors, plasma jets and RF discharges) that operated directly in open air. These systems demonstrated robust microbial inactivation and, crucially, allowed treatment conditions to be parameterized in terms of applied power, frequency, working gas and exposure time [53]. This trajectory, from biomedical

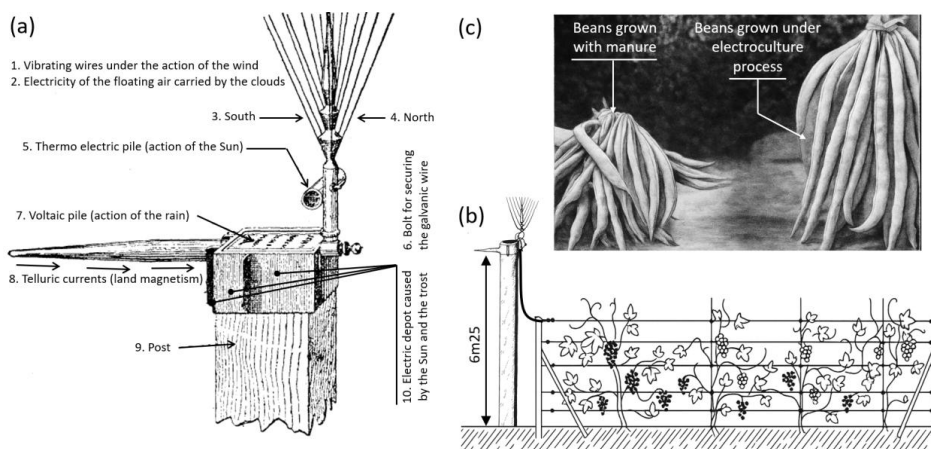


Figure 4. (a) Schematic diagram introducing Christofleau's atmospheric antenna: a passive mast with pointed collector, galvanic wire and ground network, claiming to harness atmospheric, thermoelectric, rain-galvanic and telluric sources to deliver weak fields/currents to crops [50]. (b) Christofleau-style atmospheric antenna for vines: mast tipped with a multi-point collector feeds a down-lead to a trellised network of horizontal wires around grapevines, forming a passive aerial-ground circuit intended to deliver weak atmospheric fields/currents to the crop. Adapted from [50]. (c) Digitally-restored photograph (for clarity) of beans either grown with manure (left) or grown without manure but under Christofleau's atmospheric electroculture antenna (right). Adapted from [50].

sterilization tools to well-characterized atmospheric plasmas, laid the groundwork for extending plasma technologies into agronomy, giving rise to the modern field of plasma agriculture.

1.3. *The 21st century: the rise of plasma agriculture in a physico-chemical framework*

Plasma agriculture designates a contemporary research field that applies cold plasma sources (and their derivatives such as afterglows and plasma-activated water) to seeds, plants, soils, irrigation systems and agri-food chains. Unlike earlier traditions of electroculture or electrostatic spraying, which relied on static fields or charge deposition, plasma agriculture is explicitly grounded in plasma chemistry, physico-chemical dosimetry and dose–response control. Bibliometric analysis (Figure 5a) shows that the term “plasma agriculture” gained traction only after the mid-2010s, marking the consolidation of a distinct research community and vocabulary.

Cold plasmas are non-thermal discharges whose efficacy arises from the co-action of five properties (Figure 5b):

- Electrical: transient fields, ionization fronts and pulsed currents govern initiation and charge transfer
- Chemical: cold plasmas generate reactive oxygen and nitrogen species (RONS) both short-lived (OH , O , NO) and long-lived (H_2O_2 , O_3 , $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$), with tunable lifetimes and fluxes
- Radiative: UV and VUV photons couple directly to DNA/protein targets or water interfaces
- Thermal: bulk gas remains near ambient, though local heating (10–50 °C above background) can be engineered or suppressed
- Fluid-mechanical: ionic wind and microjets enhance mass transfer at plasma–liquid and plasma–tissue boundaries.

Depending on the source (DBD, jet, corona, glidarc) and feed gas, these modalities combine to define the “plasma cocktail” at seed–water and plant–air interfaces [54–56].

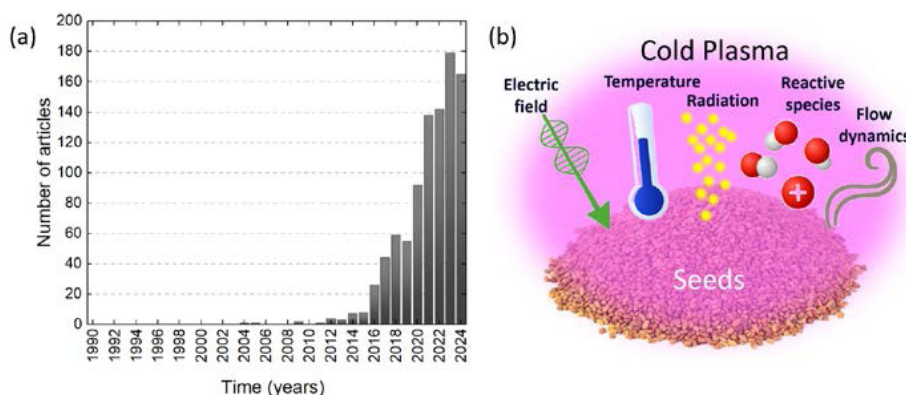


Figure 5. (a) Annual number of publications (1990–2024) containing the exact expression “plasma agriculture,” as indexed by Google Scholar (Results retrieved on 18 August 2025, patents and citations excluded). (b) Schematic of a pile of seeds treated by cold atmospheric plasma (CAP) with its 5 coupled properties: electrical, chemical (RONS), radiative (UV), thermal (near-ambient) and fluid-mechanical.

By 2025, plasma agriculture is organized around four application axes:

- Seed treatment exploits plasma-induced surface modification (enhanced hydrophilicity, micro-etching) and low-dose RONS/UV to accelerate germination kinetics and reduce microbial load [57]. Direct dry-seed exposure, post-imbibition treatment and immersion in plasma-activated water (PAW) are distinguished approaches [58]. PAW chemistry is now routinely quantified by dose tracers (H_2O_2 , $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$, pH, conductivity), providing reproducibility across laboratories [59].
- Plant treatment applies CAP, afterglows and PAW under strict thermal control to elicit signaling rather than damage. Contemporary work demonstrates redox priming that activates antioxidant and defense pathways and improves vigor in model and crop species (e.g., Ca^{2+} transients in *Arabidopsis* with PAW; tomato seedlings under CAP/PAW) [60–62]. Electrical inputs (kV, kHz, W), flow, gap, exposure time and effluent temperature are systematically coupled to PAW tracers, in line with international plasma-agriculture roadmaps.
- Media treatment focuses on irrigation water, soil and air. CAP and PAW enable gentle disinfection, dose-controlled inputs and modulation of microbial communities. Recent syntheses map PAW physico-chemistry and antimicrobial action across matrices [63]; field-adjacent studies demonstrate impacts on irrigation water, soil properties and crop stress responses [64].
- Agri-food treatment uses CAP (DBD, plasma jets) and PAW to sanitize produce, packaging and equipment while extending shelf life without thermal stress. Efficiency scales with dose (voltage, frequency, gas, flow/gap) and exposure time, primarily through RONS and UV [65]. “In-package” plasma retains reactive species in sealed headspaces, boosting microbial inactivation with limited quality loss [66]. On open lines, plasma jets reduce biofilms on food-contact surfaces while PAW complements as a produce wash with minimal residues. Industrial uptake by 2025 is contingent on validated protocols, material compatibility and maintaining organoleptic quality [67].

In contemporary plasma agriculture, progress is defined by a physics-based framework of explicit dosimetry: quantitative, traceable dose metrics (such as RONS concentrations in PAW ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), UV fluence ($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$), electrical or energy dose ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) and exposure time (min)) are measured at the target. These are coupled with controlled source parameters (voltage, frequency, power,

feed gas, flow, gap and effluent temperature) to establish reproducible dose–response relationships. This approach contrasts sharply with 18th-century electroculture, where no measurements of field strength, exposure time or chemical by-products were attempted. To appreciate the extent of this methodological shift, the following Section 2 revisits the early but pre-metrical program of Abbé Bertholon, one of the first to propose the systematic use of atmospheric electricity in agriculture.

2. Reappraising the Abbé Bertholon's contribution to agricultural electricity (1780s)

2.1. *A brief scientific biography*

Pierre-Nicolas Bertholon de Saint-Lazare (1741–1800), a priest, physicist and Enlightenment pedagogue, built his career in Montpellier (France), where he taught experimental physics at the chair of the *États de Languedoc* and within the *Royal Society of Sciences* [68]. During the 1780s he emerged as a central figure of experimental electricity in the city, notable for his focus on applications rather than spectacle. Appointed in 1782 to the Society's chair of physics, he combined public instruction with carefully staged demonstrations, framing his program around three domains: meteorological electricity, animal electricity and plant electricity, each approached with an emphasis on practical use [69].

As part of this program, Bertholon designed the *electro-végétomètre*, a device intended to capture and distribute “atmospheric electricity” to plants. He also promoted “medical electricity”, devising therapeutic practices such as positive and negative baths and even proposed a classificatory scheme for diseases like “electrical” or “non-electrical” [31,70]. His writings, first published in 1780, were widely circulated in both French and translated editions, extending his influence beyond Montpellier.

Bertholon also participated actively in civic and technical debates. He advocated for the adoption of lightning rods in Languedoc and, by analogy, suggested networks of pointed rods as earthquake prevention devices, a proposal that drew attention as far as Germany (Wiedebourg) [69]. He engaged in the early aerostatic movement, launching a hot-air balloon with Jean-Antoine Chaptal in Montpellier on 23 November 1783 and testing parachutes with Lenormand from the Babotte Tower.

His intellectual interests extended further, encompassing geology, volcanism and regional natural history, reflecting the broad culture of inquiry encouraged by the Montpellier Society. In 1787, together with Boyer, he co-edited the popular science journal *La nature considérée sous ses différents aspects*, underscoring his role as a mediator between scientific institutions, laboratories and wider publics [71].

2.2. *Bertholon's thesis: electricity as a stimulus to vegetation*

In the late 18th century, as Leyden jars, electrometers and electrostatic machines were establishing a first metrology of electricity (Section 1.1), Pierre-Nicolas Bertholon advanced a striking thesis: that atmospheric electricity was a constant reservoir of electricity capable of stimulating the entire physiology of plants. He argued that key functions (germination, sap circulation, nutrition, secretion, growth, flowering, fruiting and transpiration) could all be activated by this natural resource [31]. Moreover, artificial electricity generated by friction machines could, in his view, produce equivalent effects. Electricity was thus conceived as a subtle “fluid”, often likened to fire, whose action might be harnessed oriented and applied through engineered devices. Bertholon's treatise was structured in three parts:

- (1) To demonstrate the existence and influence of atmospheric electricity;

- (2) To catalogue its effects on plant functions (including germination, sap flow, secretions, sensory qualities in the 18th-century sense and “negative electricity”);
- (3) To operationalize these effects through dedicated instruments, most notably the *electro-végétomètre*, designed to capture, conduct and distribute atmospheric electricity to crops.

To substantiate this program, Bertholon assembled three types of evidence. First, qualitative correlations: storms, rain, snow, hail and fog were thought to deliver electrical fluid to plants. He noted that “more electrical days” coincided with faster germination, though without controlling for cofactors such as temperature, humidity, light or rainfall. Second, instrumented observations: he employed electrometers, kites and electroscopes to register atmospheric charge and compared these signals with stages of plant development. He described precautions (stable weather, humidity, temperature) yet acknowledged variability, preferring broad “general results” to unstable numerical series. Third, mechanistic conjectures: electricity was said to drive sap circulation and secretion through an “electrical affinity” between molecules and vessels: an attempt, within the conceptual vocabulary of his time, to articulate a theory of plant interfaces.

From a historical perspective, the strength of Bertholon’s work lies in its unifying vision. He sought to connect atmospheric phenomena with plant physiology and to design an agronomic technology of electricity. His vocabulary drew on engineering concepts such as insulation, pointed collectors, conductors and distribution networks and for his time this represented a genuine methodological effort. The limits were equally clear: no dosimetry of field strength, charge or energy was attempted, the roles of different agents (electric fields, ozone, UV) were not distinguished and much reasoning remained analogical rather than quantitative. Even Bertholon conceded that his “constant results” were better understood as tendencies than as conclusive data.

Yet the legacy is not negligible. By framing electricity in agronomic terms and articulating an operative vocabulary of capture, conduction and distribution, Bertholon anticipated the logic of controlled transfer that resonates with later traditions. In contemporary cold-plasma agriculture, electrical parameters, physico-chemical species and dose–response relations are explicitly integrated. Seen in this continuum, Bertholon’s program was not merely speculative electroculture but an early, if limited, attempt to transform atmospheric electricity into a measurable agronomic process.

2.3. Bertholon’s electroculture devices and operating procedures

The first electroculture devices to be technically described and illustrated appear in Bertholon’s *De l’électricité des végétaux* (1783). Because the original explanations, written in 18th-century French, are often obscure or misleading for modern readers, this section offers a reformulation in contemporary technical language. The goal is not to modernize the science, but to clarify the intended mechanisms, stabilize terminology and highlight the operational logic of these instruments.

2.3.1. Dry-route devices: the *electro-végétomètre* and the orchard discharge method

Bertholon’s flagship instrument was the *electro-végétomètre*: an apparatus which, despite its name, was not a measuring instrument: it recorded neither electric field, nor electrical charge, nor current. It was a passive collector–distributor of “atmospheric electricity”, designed to capture, conduct and spread charge over crops, with no readout and no dosimetry. Bertholon designed two models of this device.

The first model (Figure 6a) which may be termed the “single point, articulated arm”. It consisted of a wooden mast firmly anchored and protected against moisture. At the top, a single

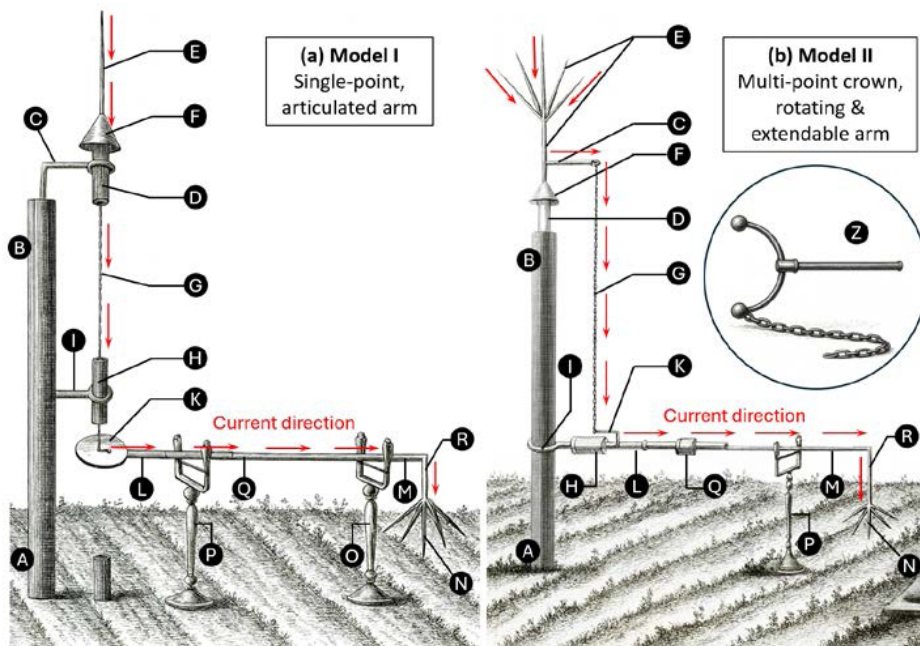


Figure 6. Bertholon's électro-végétomètre, devised in the 1780s to channel “atmospheric electricity” toward crops. Two variants are shown: (a) Model I, with a single-point collector and articulated arm distributing charge to pointed outlets; and (b) Model II, with a crown of points, a rotating extendable arm and broader reach. Both relied on slow diffusion of charge through sharp points, conceived as a gentle stimulus to vegetation and included a neutralization device (Z) for safety, represented in inset of (b). Adapted from [31].

iron point served as a collector. It was shielded from rain and insulated from the electrical ground by a glass tube filled with bituminous mastic. The captured charge descended via a conducting chain to an insulated, articulated horizontal arm that could be aimed over crop rows. The arm ended in a comb of points that release charge gradually as bluish corona glows (*aigrettes lumineuses*), which Bertholon believed would stimulate vegetation.

The second model (Figure 6b) which may be termed the “*multi-point crown, rotating and extendable arm*”. It kept the same logic while boosting collection and coverage. The mast head received a resin-impregnated insert to improve insulation from the ground and the single point was replaced by a cluster of sharp points to enhance charge extraction. The transmission still used a vertical chain that was connected to the horizontal arm. The arm could rotate 360° and was length-adjustable, allowing one to sweep the entire plot. Again, its tip carried diffusor points.

For clarity, Table 1 provides a comparative summary of the two variants, detailing their structural components, operating principles and distinctive features, in order to highlight both their shared logic and their technical differences.

Both models included a “C-shaped exciter”: a rudimentary grounding tool designed for operator safety and represented in the inset of Figure 6b. It consisted of a curved metallic rod with rounded ends, one of which carried a chain trailing on the soil to provide an earth connection. The user held the device by an insulated glass handle. When brought near the electro-végétomètre, the metallic arc collected excess atmospheric charge, which was harmlessly discharged through the chain into the ground. In modern terms, it functioned much like a primitive discharge wand still used in high-voltage laboratories to neutralize charged equipment safely.

Table 1. Comparison between the design and operation of Bertholon's electro-vegetometer (Figure 6): variant I ("single-point articulated arm") and variant II ("multi-point crown, rotating and extendable arm")

	Model I Single-point, articulated arm	Model II Multi-point crown, rotating and extendable arm
Purpose	Passive capture → Insulated conduction → Gentle diffusion over crops (no measurement)	
Mast/Base	Wooden mast (A–B): buried section fire-dried, tarred, wrapped in charcoal dust/ cement, then masonry footing; above-ground part painted/bitumen-coated for weather resistance	Mast (A–B) with resin-saturated head cylinder (C) treated with tar/pitch/turpentine to improve insulation from ground
Top insulation	- Thick glass tube packed with bituminous mastic (D) - Second glass insulator downstream (H)	Insulated rotary interface via resin insert (D) and glass/mastic sleeve (H)
Collector (at mast head)	Single pointed rod (E) mounted in D; protected by a tinplate funnel (F)	Multipoint collector (E) (sharp "crown") to maximize charge capture
Conduction path (vertical)	Conducting chain (G) suspended from E, guided through H to prevent leakage	Bent iron lever (C) carrying chain (G) to the arm interface
Regulation/buffer	Chain terminates at iron disk (K) acting as a small "condenser/regulator" to buffer atmospheric variations	No separate disk; regulation implicit (focus on mobility and reach)
Horizontal arm/distribution	Articulated conductor arm (K–L–M–N) hinged at L and Q, supported on insulating trestles (O, P) with stretched silk cords	Telescoping conductor arm (L–M) with its telescoping conductor (Q), supported on insulating trestle (P) with stretched silk cords
Terminal diffuser	Comb/cluster of sharp metal points at the arm tip (N, R), releasing charge as non-disruptive corona over the crop canopy/soil	
Mobility/coverage	Arm swings on hinges (L, Q) to cover a sector (row/strip)	Full 360 ° rotation via I–L–M and extend/retract (Q) to sweep a full circle and vary reach
Neutralization (on/off control)	Apply a chain (or vertical rod) between K and the ground to break insulation and bleed charge. Also used to null effect when "excess" of electricity is presumed	
Operation (per Bertholon)	Use when the air is "poor in electric fluid"; distribute via N; ground at K when "excess" is observed	
Safety	Sharp points release corona glows (no sparks). "C-shaped exciter" (copper/iron frame with glass handle + trailing ground chain) recommended to shunt charge during handling	

The letters (A to Z) correspond to the captions of the original figures. Both devices are passive collectors–distributors (no field/charge/current measurement); the terminal diffuser emits a charge in the form of a non-disruptive corona above the crop.

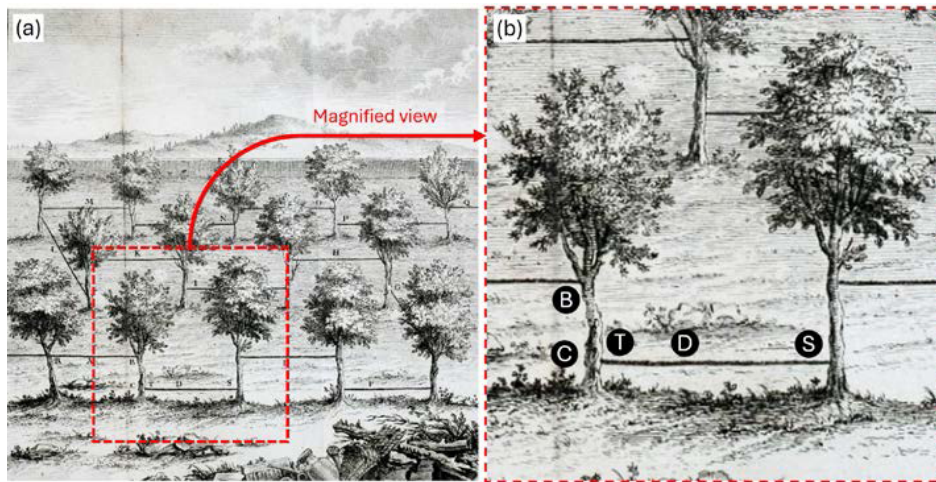


Figure 7. (a) General view of a fruit orchard where trees are interconnected by uninsulated iron wires forming a rectangular grid (segments A–Q). A Leyden jar (not shown) is discharged across the network, with its outer and inner coatings connected respectively to the first and last wire, so that a single electrical pulse traverses successive spans and penetrates branches, trunks or roots where boring larvae are suspected. Repeated discharges allow the operator to “sweep” the orchard, while roots can be included by inserting opposed wires directly into the soil. (b) Close-up of one grid interval: two wires bracket a trunk section (B–C), so that a Leyden discharge is forced through the wood, targeting larvae hidden in galleries. Additional labeled spans (e.g., T–D–S) illustrate continuity of the circuit to neighboring trees and plant parts. Adapted from [31].

Bertholon imagined a second “dry-route” method to target wood-boring insects hidden in branches, trunks or roots (Figure 7). He proposed to discharge a Leyden jar directly through the affected wood by positioning two iron wires on opposite sides and releasing the stored charge across the gap. This brief high-voltage pulse would result in a strong electric field forcing a transient current through the tissue, with the aim of killing larvae inside. By shifting the wires and repeating the operation, he imagined one could “sweep” the branch until the pest was eliminated. For orchards, he extended the design into a rudimentary electrical grid: trees were linked with bare iron wires so that a single discharge could propagate through successive spans, exposing multiple trunks at once. He even recommended driving current through soil paths to target roots or applying preventive shocks during the season when the infestation typically began. As with the *electro-végétomètre*, this was not measurement but mediation in intent: a scheme to channel atmospheric or stored electricity into plant structures. No dosimetry of voltage, current or energy was attempted, but the procedure illustrates Bertholon’s transition from abstract conjecture to technical intervention: building circuits, defining contact points and integrating electrical pulses into common agricultural practices.

2.3.2. Water-route devices: electrified irrigation and mobile systems

Bertholon also devised a second family of instruments based on irrigation with “electrified water”, this time powered by an electrostatic machine rather than relying on the atmosphere. Two main configurations were proposed (Figure 8).

The first, intended for trees (Figure 8a), placed the operator on an insulating stool holding a bucket and syringe pump. The bucket was directly connected to the electrostatic machine, rendering its contents conductive. Each spray of water was thus electrically charged before reaching the canopy. Safety depended entirely on insulation: as long as the operator remained

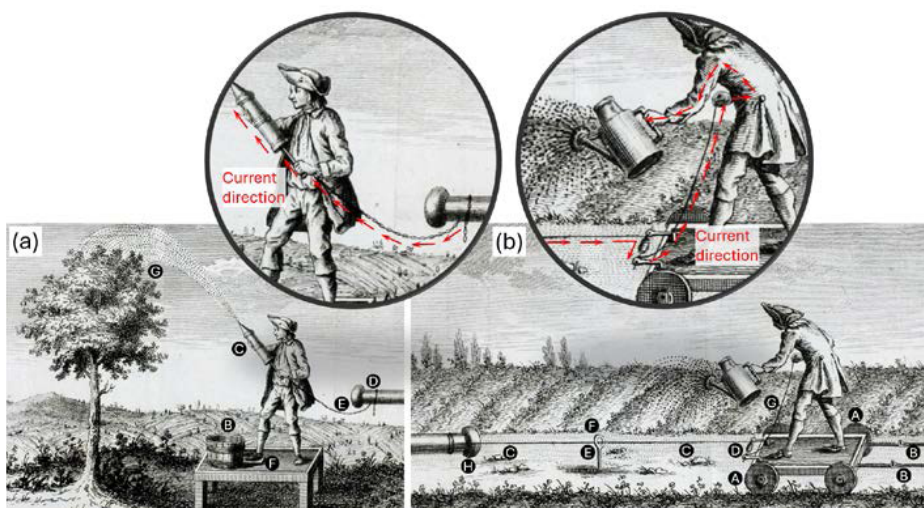


Figure 8. (Left) “Artificial electrical watering”. An electrostatic machine feeds a workstation on an insulating stool with bucket and syringe-pump; the spray is charged before reaching the canopy. The goal is practical (to integrate electricity into routine watering). Insulation keeps body current negligible and directs it with the jet into plants/soil. (Right) Mobile “electric watering” for beds. A resin-insulated cart unwinds a wire from the machine, supported on insulating posts. Holding the live cord, the operator pours from a can, producing “electric rain” along the row. Designed for cadence (assistant refills cans); insulation protects the operator; useful current travels with the water. Adapted from [31].

isolated from the ground, the body current was negligible, with visible sparks or tingling confined to the water jet.

The second system was designed for vegetable beds (Figure 8b). Here, an insulating resin cart carried a reel of wire connected to the machine. As the cart advanced along the rows, the operator, holding the live cord, poured from watering cans so that the falling stream produced an “electric rain”. The workflow was organized for efficiency: a second gardener refilled cans continuously while the cart advanced. Again, insulation ensured that the useful current traveled with the water into the plants and soil, rather than through the operator.

Both devices were described as inexpensive, adaptable and effective when applied repeatedly over several days to seeds or growing plants. Their operating principle was not metrological but practical: to embed the action of electricity into everyday irrigation routines. The comparative features of these two systems are summarized in Table 2, which contrasts their design, workflow, safety provisions and intended agronomic applications.

2.4. Technical and methodological limitations

By the late eighteenth century, Bertholon's program was limited above all by instrumentation. Lane's spark electrometer (1767) and Henley's quadrant (c. 1770) provided only coarse, qualitative indicators (spark counts or angular deflections) that could at best approximate the charge stored in a Leyden jar [72,73]. They offered no means to quantify the actual energy delivered to plant tissues or the flux of charge at a biological target. Coulomb's torsion balance (1785), though it established the first quantitative law of electrostatics, post-dated Bertholon's writings and measured forces rather than energy deposition, leaving no path toward calibrated protocols for agricultural electrification [74,75].

Table 2. Comparison of Bertholon's devices for electrifying irrigation water (Figure 8)

Feature	Tree-by-tree irrigation	Mobile cart for vegetable beds
Insulation of operator	Operator stands on insulating stool (A), a board supported by glass pillars	Operator stands on resin-molded insulating cart (A) drawn along garden rows
Water source	Bucket (B) placed on the stool platform	Watering cans refilled continuously by a second gardener
Irrigation device	Syringe-pump (C) sprays water onto tree canopy (G)	Operator pours from watering can while holding live cord (G), producing “electric rain” over crops
Electrical connection	Electrostatic machine connected by chain (E) from conductor (D) to workstation	Cart carries reel (D) with insulated axle, unwinding wire (C) connected to machine conductor (H)
Conduction to water	Tinplate plate (F) under operator's foot ensures bucket communicates with charge	Wire passes through insulating supports (E) with glass rings (F); additional supports can be added
Mode of electrification	Water in bucket becomes charged; sparks and tingling visible at jet or on a metal plate	Watering can and operator at same potential; electrified water falls as “electric rain” onto crops
Mobility/workflow	Device carried tree to tree; simple and inexpensive	Cart advances row by row; workflow optimized with continuous supply of full watering cans
Safety	Insulation of stool ensures current flows into water rather than operator. Minor tingling only if grounding path provided	Operator insulated on resin cart; negligible current through body unless contact with earth occurs. “C-shaped exciter” recommended for safe approach/withdrawal
Agronomic use	Claimed effective when repeated daily over seedlings or growing plants	Described as slightly slower than ordinary irrigation but with clear agricultural benefits when repeated over several days

Tree-by-tree irrigation (Figure 8a) used an insulating stool, bucket and syringe-pump, while the mobile cart system (Figure 8b) adapted the principle to vegetable beds, with a resin cart unwinding wire and electrifying watering cans. Both designs aimed to embed electricity into routine watering practices; safety relied on insulation from ground, with useful current carried by the water jet into soil and plants.

The conceptual framework was equally incomplete. Several major agents of electrical discharges remained unidentified: ozone, although its pungent odor was remarked by van Marum in 1785, was not recognized as a distinct chemical species until 1840 [76], while ultraviolet radiation was discovered only in 1801 [77,78]. Reactive oxygen and nitrogen species (RONS), as well as electrohydrodynamic flows, were entirely unknown. In this context, the functioning of Bertholon's

electro-végétomètre raises important retrospective questions: was its terminal diffuser (a comb or cluster of sharp metal points) capable of generating fields strong enough to act on vegetation? Could it have produced a form of cold plasma, even if the term was not yet available? In *De l'Électricité des Végétaux* (pp. 399, 401), Bertholon himself reported luminous and electrical *aigrettes* visible at night on the multi-point terminals of his device. Modern physics recognizes these bluish-violet glows as corona discharges: localized plasmas produced when strong fields at sharp tips accelerate electrons. Such discharges release charge gradually, without sparks and generate species unknown in Bertholon's time: ions, electrons, ozone and nitrogen oxides [31,79]. To Bertholon, however, they appeared as visible manifestations of the “electric fluid” nourishing plants.

Experimental practice, too, fell well short of modern standards. Bertholon relied on qualitative accounts of germination and growth, with no systematic replication, randomization or formal control groups. Trials were conducted in open air and thus remained fully exposed to meteorological variability, including humidity, temperature, soil conductivity, rainfall and illumination. Even the instruments available to him, such as Henley's or de Saussure's electrometers, yielded only relative indices rather than traceable measurements. The methodological tools required to stabilize inference (i.e. randomized designs, comparative statistics and variance analysis) would only appear in the 20th century [80,81].

Finally, the electrostatic machines themselves lacked regulation or stability. Their output depended on crank speed, ambient humidity and electrode condition. Accessories such as Leyden jars or pointed conductors could channel or limit discharges but did not measure them. Lane's discharger made it possible to fix a spark gap, yet it provided no information about the actual dose delivered to plants. As a result, pulse energy, repetition rate and source–plant geometry remained uncontrolled, precluding the establishment of reproducible dose–response curves.

In contrast, modern plasma agriculture defines “dose” through explicit, quantitative parameters: electric field strength integrated over time ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$), surface charge density ($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$) and specific or areal energy deposition ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ or $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), all referenced in carefully controlled source–target geometries [54,56,82]. Today, the respective contributions of fields, RONS, photons, localized heating and electrohydrodynamic flows can be separated and quantified, enabling reproducible mechanistic studies that were unattainable in Bertholon's time.

3. Modern physics of cold plasmas applied to agriculture

While Bertholon framed plant electrification through the metaphor of a subtle “electric fluid”, modern science grounds the discussion in plasma physics. The shift from qualitative impressions (such as visible *aigrettes* on metallic points) to quantitative descriptors of charge, fields and species requires defining what a plasma is, the parameters governing its behavior and the diagnostic methods that render it measurable.

3.1. Definition of cold plasma and key properties

Plasma is commonly known as the fourth state of matter, distinct from solids, liquids and gases. It is characterized by macroscopic quasi-neutrality (i.e., approximately balanced positive-ion and electron densities, as proposed in Equation (1)) and by collective dynamics dominated by long-range Coulomb interactions. Two fundamental parameters govern its electrostatic behavior: the Debye length λ_D (Equation (2)) and the electron plasma frequency ω_p (Equation (3)), which depend on the vacuum permittivity ϵ_0 , the Boltzmann constant k_B , the elementary charge e , the electron temperature T_e and of the electron density n_e [83]. A medium qualifies as a plasma when

the Debye length is much smaller than the system size L (Equation (4)), the number of particles in a Debye sphere N_D is $\gg 1$ (Equation (5)) and collective effects dominate over binary collisions (Equation (6)) [84].

$$n_i \approx n_e \quad (1)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (2)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (3)$$

$$\lambda_D \ll L \quad (4)$$

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_e \lambda_D^3 \quad (5)$$

$$N_D \gg 1 \quad (6)$$

Depending on density and temperature, plasmas range from strongly collisional (when the mean free path is comparable to or smaller than the system size) to weakly collisional, as in magnetospheric plasmas or low-pressure RF discharges. In air at terrestrial pressure, electrons of a few eV have a mean free path of approximately 0.1–1 μm . Near boundaries, quasi-neutrality breaks down within space-charge sheaths whose thickness is a few λ_D ; these sheaths control how current, energy and chemistry couple to surfaces [84,85].

A cold atmospheric plasma (CAP; also non-thermal plasma, NTP) is a non-equilibrium discharge in which the electron temperature T_e ($\approx 1\text{--}5$ eV, i.e., 11 600–58 000 K) greatly exceeds the gas temperature T_g ($\approx 300\text{--}350$ K). At atmospheric pressure, strong collisionality leads to regimes dominated by electron–molecule and ion–molecule collisions and to thin sheaths at electrode–gas or gas–solid interfaces. Depending on configuration and excitation, one observes streamer regimes (channeled micro-discharges < 10 ns, reduced field $E/N \approx 100\text{--}300$ Td) and dielectric-barrier discharges (DBDs), which may be filamentary ($E/N \approx 150\text{--}200$ Td) or diffuse (< 100 Td) [84]. The reduced field E/N ($1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ V}\cdot\text{m}^2$) shapes the electron energy distribution function (typically non-Maxwellian) and thus the probabilities of excitation, ionization and dissociation through energy-dependent cross sections, directly influencing overall reaction kinetics [86].

CAPs couple multiple processes. The electric field drives charge transport and interface polarization while the chemical component is carried by reactive oxygen and nitrogen species (RONS). Those include short-lived (e.g., $\text{O}(^3\text{P})$ $\mu\text{s--ms}$, $\text{OH}^\bullet \approx \mu\text{s}$, $^1\text{O}_2 \approx \text{ms}$, $\text{NO}^\bullet \approx \mu\text{s}$) and long-lived (e.g., O_3 s–min, H_2O_2 s–h, $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ stable in aqueous phase) [87,88]. These species are produced and transported together with UV/visible emission from molecular bands (e.g., N_2 second positive system, $\text{OH}^\bullet$) and with electrochemical gradients at plasma–gas, plasma–solid and plasma–liquid interfaces. The energy chain can be summarized: source $\rightarrow$ electrons $\rightarrow$ elementary reactions $\rightarrow$ reactive species $\rightarrow$ interfacial fluxes [89].

Common atmospheric sources include DBDs (planar, coaxial or reactor geometries) driven sinusoidally or in pulsed mode (kHz–MHz; ns– μs pulses) [90] and atmospheric pressure plasma jets (APPJ) operating in helium or argon with small $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ admixtures [91]. Control parameters (gap and geometry, dielectric material and thickness, waveform, amplitude, frequency, duty cycle, gas composition and flow, relative humidity) set E/N , the specific energy deposition, discharge morphology (filamentary vs. diffuse, streamer density) and the spectrum of species produced.

Metrological qualification is essential for reproducibility and inter-comparison. Electrical diagnostics include recording $V(t)$ and $I(t)$, estimating average power via Lissajous figures and evaluating energy per pulse [92]. Temporal dynamics are resolved with ICCD imaging (ns– μs

gates) to visualize streamer propagation and discharge morphology [93]. Gas temperature can be inferred from rotational spectroscopy of N_2 or OH bands and surface temperature by infrared thermography [94–96]. Physico-chemical analysis uses optical emission spectroscopy to identify excited species and, with kinetic modeling, to estimate effective electron energies. In the aqueous phase, routine tracking includes H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- , pH and conductivity, with attention to their temporal stability [87].

Across applications, good practice entails arc suppression, monitoring sheath evolution and controlling surface heating. Reporting conditions in terms of specific energy (e.g., $J\cdot cm^{-3}$ of treated gas or activated liquid) and/or equivalent chemical indicators enables robust links between process, dose and response, independent of the particular agricultural use case.

3.2. Technologies and laboratory protocols

In agronomy, cold atmospheric plasma (CAP) is implemented through three complementary routes that target different biological compartments: seeds, seedlings, leaves/canopies, whole plants, fruits, soils and waters. These are:

- DDS (Direct Dry-Surface exposure): plasma applied directly to tissues with no intentional free water at the interface.
- DWS (Direct Wet-Surface exposure): plasma applied in the presence of a thin aqueous film at the interface.
- PAW (Plasma-Activated Water): water or nutrient solution treated ex situ by plasma, then applied via soaking, spraying, irrigation/fertigation, hydroponics or postharvest rinsing [58].

In practice, laboratories mainly rely on DBD and APPJ for DDS/DWS. DBD panels or meshes are suitable for trays, awnings and fruit lines; APPJs (He or Ar with traces of O_2/H_2O) offer directional diffusion to localized tissues (wounds, grafts) and hard-to-reach geometries. Corona arrays not only release charge but also generate a small electrohydrodynamic (EHD) airflow, which disturbs the still boundary layer of air on leaf surfaces and thereby improves the delivery of plasma-generated species to plant tissues. For PAW generation and process-water treatment, sliding arcs and DBD/pin-to-liquid jets are commonly employed [90,91,97]. The indicative operating ranges include:

- DBD: 6–20 kV_{pp} , 5–50 kHz, gap 0.5–5 mm, exposure 0.5–60 s.
- APPJ: 2–10 kV_{pp} , 10–200 kHz or RF, 0.5–5 $L\cdot min^{-1}$ He/Ar with traces of O_2/H_2O , nozzle-to-tissue distance of 5–30 mm.

The dose is expressed in units that are independent of the device and related to the exposed entity.

- For direct exposures (DDS/DWS), it can be expressed in specific energy relative to the biological load, for example $J\cdot m^{-2}$ for leaves and $J\cdot kg^{-1}$ for seed lots, as well as electrical operating conditions (waveform, pulse width and repetition frequency, peak-to-peak voltage, energy per pulse and average power), gas composition/flow rate, source-target distance, scan speed, exposure time and effluent temperature. Where applicable, quantification of UV fluence at the tissue level and emitted gas concentrations (O_3 , NO_2/NO) can further clarify the regime [98,99].
- For PAW, characterization generally includes the specific electrical energy transmitted to the liquid ($J\cdot L^{-1}$), the chemical state at the time of application (H_2O_2 , NO_2^-/NO_3^- , pH, conductivity) and the dose applied ($mL\cdot m^{-2}$ or per plant, with contact time) [87,100,101]. Where possible, a surface-normalized marker load (e.g., $\mu mol\ H_2O_2\ m^{-2}$) is informative.

In all cases, noting the time between activation and use (t_0 , $t_0 + \Delta t$) and reporting measurement uncertainties facilitates comparison between devices and laboratories.

3.3. *Effects of cold plasma on seeds*

CAP exerts three major, interdependent influences on seeds. First, they alter the physico-chemistry of the seed coat, increasing surface hydrophilicity and effective permeability. Second, they reduce (sometimes nearly eliminate) microbial load and seed-borne pathogens. Third, they trigger early physiological and molecular responses, including hormonal adjustments, activation of antioxidant defenses and transcriptional reprogramming. These processes are interlinked and together help explain the consistent improvements in germination and early growth reported across species. The following sections detail each of these three aspects in turn.

3.3.1. *Seed-coat modification and wettability*

Microscopy studies (AFM/SEM) consistently show that cold atmospheric plasma (CAP) alters the outer surface of seeds by roughening and restructuring the coat through processes such as etching, ablation and nano/micro-structuring. These changes directly improve the ability of the seed to absorb water. In wheat and barley, for instance, Figure 9 shows that Ar–O₂ plasma treatments produced visibly fissured, rougher surfaces that correlated with increased water uptake, though the magnitude of this effect depended on the treatment protocol [102,103]. Glow discharge regimes produced strong etching and nanostructuring, whereas afterglow exposures had little measurable effect [104]; extending the exposure time further enhanced surface roughness [105]. Comparable modifications have been observed in maize exposed to Ar/O₂ low-frequency glow discharges [106]. Surface chemistry is also transformed. Analyses using XPS and FTIR have shown that plasma introduces oxygen-containing functional groups on the seed surface, indicating oxidation. This chemical modification increases surface energy and is stable over time, with no hydrophobic recovery after treatment [107,108]. One of the clearest experimental signatures of these changes is the dramatic reduction in water contact angle (WCA). In lentil, bean and wheat, RF air plasma reduced WCA values from 127°, 98° and 115° down to 20°, 53° and nearly 0° (complete wetting), respectively (Figure 10) [109]. This sustained increase in hydrophilicity accelerates imbibition, the crucial first step in breaking dormancy and promoting uniform germination [108,110].

3.3.2. *Decontamination and pathogen control*

CAP treatments frequently achieve substantial reductions in surface microbial loads for a wide variety of seeds (maize, wheat, sunflower, ...) [111]. For instance, Figure 11a demonstrates effective fungal decontamination of sunflower seeds following a 5-min plasma treatment achieved in ambient air. Similarly, Figure 11b indicates that 2–5 minutes of CAP exposure in chickpea (*Cicer arietinum*) lowered natural microbiota by 1–2 log units, with a 1-minute treatment proving optimal by both maximizing germination (89.2%) and reducing median germination time to 2.7 days [112]. On hazelnuts, low-pressure SF₆ plasma achieved up to a 5-log reduction of *Aspergillus parasiticus*, as highlighted in Figure 11c [113]. However, complete microbial inactivation remains uncommon and strongly species-dependent. In sweet basil, DBD treatments applied for 10–15 minutes significantly reduced *Fusarium oxysporum* f. sp. *basilici* colony-forming units in a clear dose–response pattern, yet viable colonies persisted within seed recesses, highlighting the limited penetration of RONS and the resilience of certain propagules (e.g., chlamydospores). Extended treatment durations further decreased germination capacity, particularly after 6 months of storage, underscoring a trade-off between effective decontamination and seed

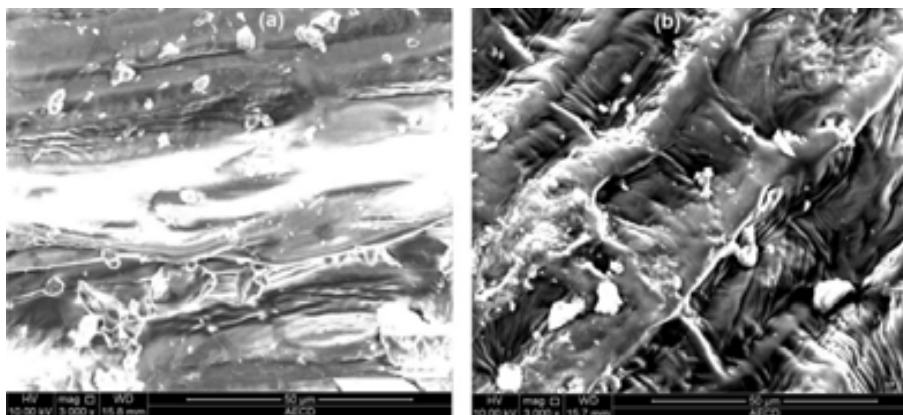


Figure 9. SEM images of wheat seed surfaces treated for 90 s with (a) control (no plasma), (b) Ar/O₂ plasma. Scale bar is 50 µm. Reproduced from Rahman et al. *Scientific Reports*, Springer Nature, 2018, licensed under CC BY 4.0 [102].

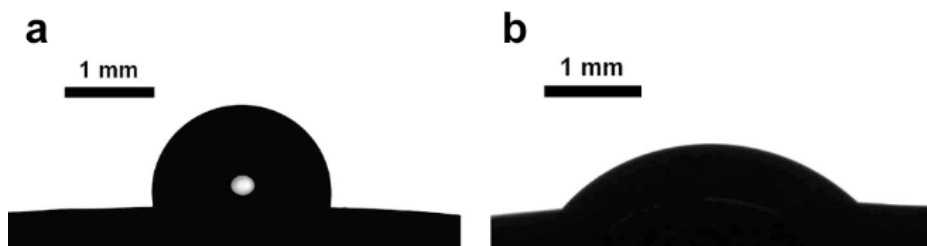


Figure 10. Water droplet deposited on a bean seed which is (a) untreated or (b) plasma-treated. Reproduced from Bormashenko et al. *Scientific Reports*, Springer Nature, 2012, licensed under CC BY 4.0 [109].

viability [114]. At the community level, taxa such as *Alternaria* and *Epicoccum* show comparatively high tolerance and in buckwheat species, exposure beyond 90–120 s led to sharp declines in germination, rendering treatments unsuitable for sowing when doses are miscalibrated [115].

3.3.3. Physiological and molecular responses

Mechanistically, plasma-generated RONS promote abscisic acid (ABA) catabolism, enhance gibberellic acid (GA) signaling, interact with nitric oxide (NO) and induce the expression of cell wall-weakening genes in the endosperm and testa, thereby lowering barriers to dormancy release. In *Arabidopsis*, Grainge et al., demonstrated that PAW breaks dormancy through combined NO₃⁻, H₂O₂, •NO and •OH signals, with distinct responses observed in ABA/GA pathway mutants (e.g., *cyp707a2*, *nlp8*, *pri6*), alongside activation of cell wall remodeling genes [116]. A companion study by the same group showed that PAW also modulates very low- and low-fluence phytochrome responses (VLFR/LFR; *PHYA/PHYB*), thereby extending benefits to photodormant seeds [117].

At the physiological level, one of the most consistent outcomes is the up-regulation of antioxidant defenses. In oilseed rape seeds exposed to drought, CAP improved germination parameters and also enhanced post-germinative physiological responses. As reported in Figure 12, the superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities were enhanced while lipid peroxidation (MDA) was reduced and the accumulation of osmoprotectants was enhanced [118]. In rice under cold stress, argon DBD accelerated germination and seedling growth, elevated

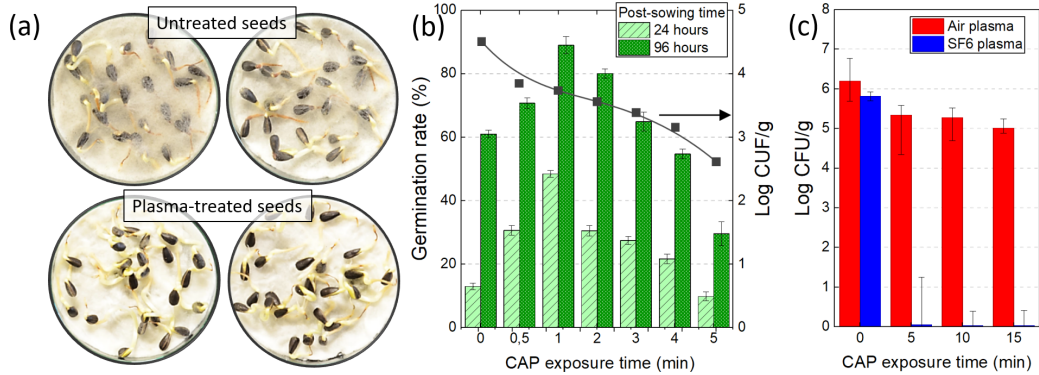


Figure 11. (a) Photographs of sunflower seeds contaminated by *Rhizopus* either untreated or plasma-treated for 5 min (T. Dufour, LPP). (b) Influence of CAP treatment on the germination of *Cicer arietinum* seeds (left axis) and on the survival of surface micro-organisms (right axis). The bars show mean value $\pm$ SEM germination (%) ($n = 6$; $p < 0.05$) Adapted from [112]. (c) Reduction effect of air plasma and SF₆ plasma on *A. parasiticus* contaminated hazelnuts for 15 min inoculation. Adapted from [113].

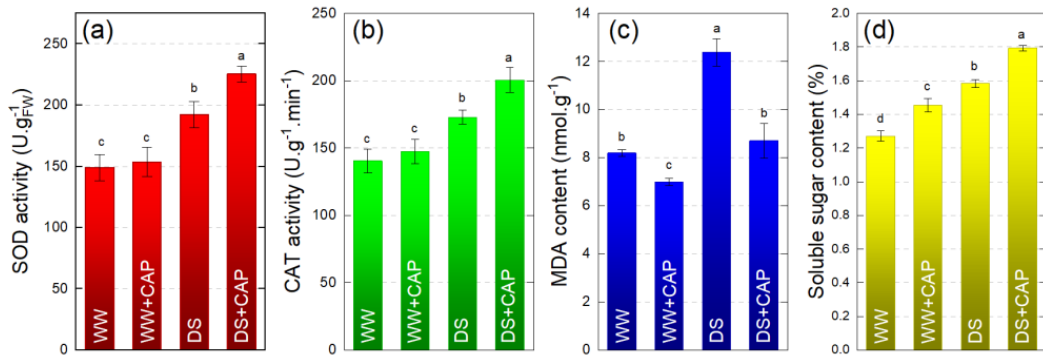


Figure 12. Effect of drought stress and cold plasma treatment on 4 biomarkers of physiological state and stress response in the case of oilseed rape seedlings. (a) SOD activity, (b) CAT activity, (c) MDA contents, (d) soluble sugar contents. In all subfigures: WW: well watered; WW + CAP: well watered + plasma; DS: drought stress; DS + CAP: drought stress + plasma. Error bars indicate standard error ($n = 3$). Different lowercase letters denote statistical differences between treatment groups at the 5% level according to Duncan's test. Adapted from [118].

SOD/CAT/peroxidase (POD) activity and triggered transcriptomic shifts involving thousands of differentially expressed genes, including suppression of *NCED3* (ABA biosynthesis) and induction of stress-tolerance genes [119]. Similar trends were reported in soybean, where CAP induced dose-dependent increases in SOD, CAT and ascorbate peroxidase (APX), improving both germination indices and vigor [120].

Overall, these effects often extend beyond germination. In wheat, PAW enhanced early establishment by increasing photosynthetic pigments and soluble protein content, suggesting a metabolic “pre-priming” effect beyond simple microbial decontamination [121]. In maize, gliding-arc exposure modified hormone pools while simultaneously stimulating seedling establishment [122].

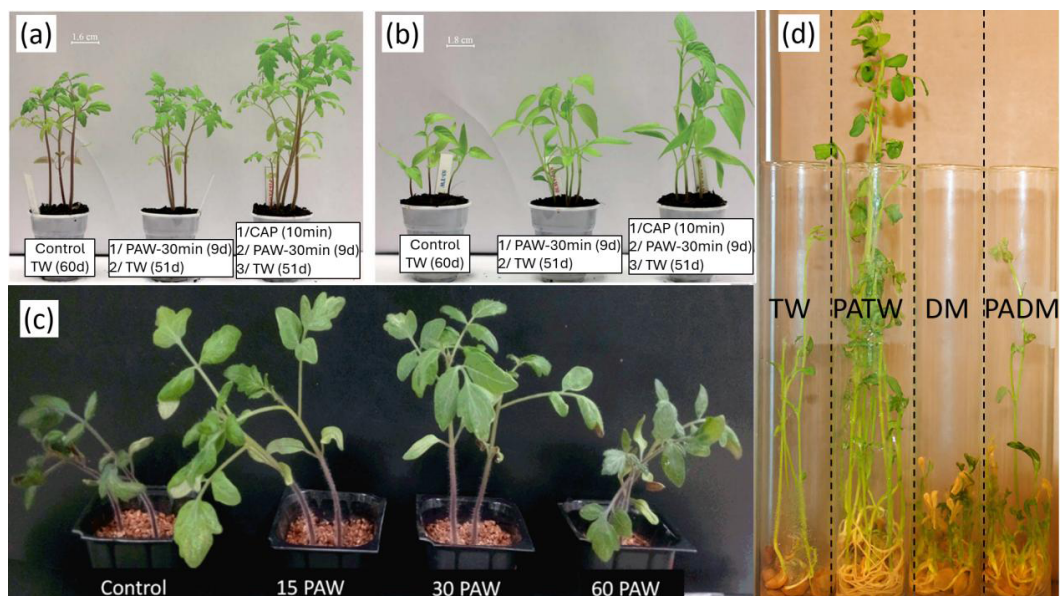


Figure 13. (a–b) Long-term effect of PAW on tomato seedlings with/without seed priming, observed on 60th day after sowing. (b) Same protocol as (a) for pepper plants. Reproduced from L. Sivachandiran et al., *RSC Adv.* (2017). Licensed under CC BY 3.0 [125]. (c) Effect of PAW on the growth of tomato seedlings for different exposure times: 0, 15, 30 and 60 min (28 days old). Reproduced from Adhikari et al. *Scientific Reports*, Springer Nature, licensed under CC BY [123]. (d) Lentil seedlings irrigated either with tap water (TW), plasma-activated tap water (PATW), demineralized water (DM) or plasma-activated demineralized water (PADM). Observation on 18th day. Reproduced from Zhang et al., *RSC Adv.* (2017). Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported Licence [126].

3.4. Effects of cold plasma on seedlings and plants

CAP (whether through DDS, DWS or PAW) can stimulate growth and stress tolerance in multiple plant species, though outcomes remain strongly dose- and context-dependent. Across species, CAP or PAW can increase seedling biomass, leaf area and chlorophyll indices. For example, PAW promoted tomato seedling growth and nutritional quality (polyphenols, lycopene), while basil exposed to DBD showed elevated chlorophylls, carotenoids and antioxidant activity with reduced ionic leakage [123,124]. Long-term benefits of PAW irrigation are visible in tomato and pepper, where seedlings treated with PAW (with or without seed priming) remained larger and more vigorous even 60 days after sowing (Figure 13a for tomato plants, Figure 13b for pepper plants) [125]. In tomato, growth stimulation was also shown to depend on exposure time: moderate PAW treatments (15–30 min) maximized seedling development at 28 days, while longer exposures became less effective (Figure 13c) [123]. Similarly, lentil seedlings irrigated with plasma-activated water (both tap and demineralized) displayed stronger growth compared with controls at 18 days (Figure 13d) [126].

Plasma also affects photosynthetic performance, particularly photosystem II (PSII). Low doses improve photochemical parameters (ΦE_0 , ET_0/RC), while higher doses inhibit them. For example, proso millet exposed to low discharge power showed enhanced electron transport, but stronger discharges suppressed it [127]. Repeated PAW irrigation in barley improved chlorophyll content and quantum yield, suggesting a potential for longer-term acclimation [128].

Beyond growth promotion, CAP/PAW often upregulates antioxidant enzymes (SOD, CAT, POX) and modulates secondary metabolism. In basil, plasma increased antioxidant activity and

peroxidase while stabilizing membranes [124]. In tomato, PAW stimulated salicylic and jasmonic acid pathways and induced pathogenesis-related (PR) gene expression [129]. These responses highlight plasma's role as a defense primer: tomato seedlings sprayed with PAW showed up to 61% reduced disease severity against *Xanthomonas*, despite no direct antibacterial effect *in vitro*, clearly indicating host-defense activation [130]. Similar priming effects have been reported against pests, e.g., increased spider mite mortality in PAW-treated tomato [131].

The redox-active chemistry of PAW (H_2O_2 , $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$, mild acidification) has also been linked to improved tolerance to salinity and drought. In hydroponic bok choy, plasma-treated nutrient solutions enhanced growth and stress markers, with intracellular RONS implicated [132]. In barley, PAW irrigation supported photosynthetic performance and antioxidant adjustments under saline stress [128]. At the root level, maize showed accelerated endodermal lignification and finer branching under arsenic exposure, suggesting plasma-induced anatomical “fortification” that may improve water and ion uptake [133].

Although the body of evidence supports plasma as a growth and stress-priming tool, responses are highly species- and dose-specific. Beneficial outcomes are typically observed at low exposures, while excessive treatment can impair photosynthesis and growth. Moreover, most studies remain limited to controlled environments, with little information on field robustness, reproducibility across cultivars or long-term yield effects. Clarifying these boundaries is essential before practical deployment in agriculture.

4. Conclusion and outlooks

This article has traced a continuous, if discontinuous, line from 18th-century “electrizations” to today's cold-plasma agronomy. The pivot is metrology. Where Bertholon engineered pathways for an indivisible “electric fluid” (capture → conduction → distribution) without access to dose or agents, contemporary plasma agriculture defines sources, quantifies interfacial transfers and measures dose under controlled conditions. Tunable atmospheric DBDs and plasma jets, together with electrical ($V(t)/I(t)$, Lissajous/Manley) and optical diagnostics (OES/absorption), have transformed demonstration into experiment: dose–response curves can be mapped, efficacy windows identified and results replicated across laboratories.

Reappraised in this light, Bertholon's contribution is methodological rather than evidentiary: he supplied an operative vocabulary and the intuition that moderate electrical regimes might beneficially modulate plant functions. Modern work explains when and why that intuition holds. Cold plasmas co-generate fields, RONS, UV radiation, mild heating and electrohydrodynamic flows; diagnostics separate and tune these components. At seed and plant interfaces this yields a coherent mechanistic picture: controlled redox priming and surface conditioning (hydrophilization, micro-etching) accelerate imbibition and germination, reduce surface bioburden, elevate antioxidant capacity and, within defined windows, improve photosynthetic function and stress tolerance. The same platform extends to media (irrigation water/PAW) and the agri-food chain (product and equipment hygiene), provided chemistry and exposure are tracked.

The rupture with historical electroculture is therefore threefold: the nature of the electrical object (from a unitary essence to a multi-physics process), the means of measurement and control (from qualitative signs to chemical/energetic dosimetry) and the standards of validation (from compelling trials to randomized, replicated designs with device-independent reporting). These differences do not validate 18th-century claims; they render them intelligible and, where appropriate, transferable.

Looking ahead, four priorities define an applied agenda. First, anchor practice in traceable dosing for both CAP and PAW routes, reporting source parameters, environmental conditions, seed-lot water status and RONS markers. Second, scale up with eco-designed, air-fed sources

and low-energy PAW reactors, evaluating energy cost per agronomic gain. Third, integrate plasma processes within agroecological itineraries, sequencing disinfection with inoculation, pairing with coatings and steering dose by field-relevant indicators. Fourth, ensure safe and robust adoption through ozone/NO_x and UV limits, arc protection, effluent management and multicenter trials across species, varieties and sites.

Seen across three centuries, the motif of an “électricité vivifiante” endures, but its status is transformed. It is no longer a regulative idea grounded in atmospheric reservoirs; it is a mechanistic toolbox (controlled redox signaling, interface engineering, gentle sanitation) capable of delivering lower-input, traceable and potentially more resilient crop systems. The historical bridge matters not as ornament, but as orientation: it reminds us that a sound intuition becomes technology only when it is instrumented, dosed and shared.

Declaration of interests

The author does not work for, advise, own shares in, or receive funds from any organization that could benefit from this article, and has declared no affiliations other than their research organization.

References

- [1] Theophrastus, in *De Lapidibus* (D. E. Eichholz, ed.), Clarendon Press: Oxford, 1965. Online at https://stuff.mit.edu/afs/athena/course/21/21h.401/www/local/theophrastus_on.stones.eng.pdf.
- [2] Pliny the Elder, in *Natural History, Book 37, Sections 1–106* (D. E. Eichholz, ed.), Attalus/LOEB: Roma, AD77, 1962. Online at https://www.attalus.org/translate/pliny_hn37a.html.
- [3] J. Francis and J. Dingley, “Electroanaesthesia - from torpedo fish to TENS”, *Anaesthesia* **70** (2015), no. 1, pp. 93–103.
- [4] A. Magnus, in *De mineralibus, Book II (“On gagate/jet” and “On succinum/electrum [amber]”)* (D. Wyckoff, ed.), Clarendon Press: Oxford, 1967. Albertus Magnus: Book of Minerals. Passages: pp. 71–73 (jet), pp. 105–107 (amber).
- [5] G. della Porta, in *Magia naturalis (1558, éd. augmentée 1589), Livre VII, chap. 16 (pierres et propriétés d’attraction)* (N. Magick, ed.), Thomas Young: London, 1658. Online at <https://archive.org/details/magianaturalis00dell>.
- [6] G. Cardano, *De subtilitate, Book VII, Opera Omnia*: Lyon, 1663. Online at <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k50540x>.
- [7] W. Gilbert, *De Magnete*, 1600. Online at <https://archive.org/details/1600-william-gilbert-de-magnete> (accessed on August 30, 2025).
- [8] N. H. de V. Heathcote, “Guericke’s sulphur globe”, *Ann. Sci.* **6** (1950), no. 3, pp. 293–305.
- [9] F. Hauksbee, *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, Fac-similé, Internet Archive*, R. Brugis: London, 1709. Online at <https://archive.org/details/b30512839> (accessed on August 30, 2025).
- [10] S. Gray, “A letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. containing several experiments concerning electricity”, *Philos. Trans. R. Soc.* **37** (1731), no. 417, pp. 18–44.
- [11] C.-F. Du Fay, “Vitreous/resinous electricity. Note historiographique”, *Nature* **144** (1939), p. 105.
- [12] L. Heilbron John, “A propos de l’invention de la bouteille de Leyde”, *Rev. Hist. Sci. Appl.* **19** (1966), no. 2, pp. 133–142.
- [13] C. Dorsman and C. A. Crommelin, *The invention of the Leyden jar*, 1957. Online at <https://archive.org/details/39002010411123.med.yale.edu> (accessed on August 30, 2025). Amsterdam.
- [14] J. Priestley, *The History and Present State of Electricity*, Cambridge University Press: London, 1767, pp. 179–181. Online publication 2015.
- [15] E. Nairne, *Experiments on Electricity Being an Attempt to Shew the Advantage of Elevated Pointed Conductors*, J. Nichols: London, 1779.
- [16] W. D. Hackmann, “The researches of Dr. Martinus Van Marum (1750–1837) on the influence of electricity on animals and plants”, *Med. History* **16** (1972), no. 1, pp. 11–26.
- [17] J.-A. Nollet, *Lettres sur l’électricité*, Hippolyte-Louis Guérin & Louis-François Delatour, rue S. Jacques, vis-à-vis les Mathurins, à Saint-Thomas d’Aquin: Paris, 1753.
- [18] J.-A. Nollet, *Essai sur l’Electricité des Corps*, Frères Guérin: Paris, 1765.

- [19] B. Pike, *Pike's Illustrated Descriptive Catalogue of Optical, Mathematical and Philosophical Instruments*, 2nd edition, vol. 1, 1856, pp. 260 and 269. New York.
- [20] A. Ganot, in *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée et de météorologie. Livre I de la matière, des forces et du mouvement*, 9th edition, vol. 12, l'auteur-éditeur. Rue de l'éperon: Paris, 1860, pp. 567 and 691.
- [21] B. Franklin, *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America*, 1751. Online at <https://www.gutenberg.org/files/45515/45515-h/45515-h.htm> (accessed on August 30, 2025). Communicated in several letters to Mr. P. Collinson of London, F. R. S. Printed and sold by E. Cave, at St. Johns Gate, London.
- [22] E. P. Krider, "Benjamin Franklin and lightning rods Free", *Phys. Today* **59** (2006), no. 1, pp. 42–48.
- [23] T. Lane, "XLIV. Description of an electrometer invented by Mr. Lane; with an account of some experiments made by him with it: in a letter to Benjamin Franklin, LL. D. F. R. S.", *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **57** (1767), pp. 451–460.
- [24] J.-A. Sigaud De La Fond, *Précis historique et expérimental des phénomènes électriques*, 2nd edition, vol. 1er Volume in-8° avec Figures, broché 6 liv, rue et hotel Serpente: Paris, 1785. (revue et augmentée).
- [25] *Philosophical Transactions Giving Some Account of the Present Undertakings, Studies and Labours of the Ingenious, in Many Considerable Parts of the World*, vol. LXII, Lockyer Davis: Holbourn, London, 1772, p. 359. Online at https://archive.org/details/bim_eighteenth-century_philosophical-transactio_royal-society-great-bri_1789_79.
- [26] J. Lacki, "The physical tourist. Geneva: from the science of the enlightenment to CERN", *Phys. Perspect.* **9** (2007), no. 2, pp. 231–252.
- [27] C. A. Coulomb, "Mémoires sur l'électricité et le magnétisme", in *Extraits des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris, publiés dans les années 1785 à 1789, avec planches et tableaux. Premier mémoire*, vol. 55, Bachelier, libraire, quai des Augustins: Paris, 1785, pp. 569–577. Online at <https://library.si.edu/digital-library/book/mmoioressurlelectr00coul>.
- [28] J. Priestley, *The History and Present State of Electricity with Original Experiments*, 2nd edition, J. Dodsley in Pall-Mall, J. Johnson, J. Payne in Pater-Noster Row, and T. Cadell in the Strand: London, 1769.
- [29] T. Cavallo, *A Complete Treatise of Electricity in Theory and Practice: With Original Experiments*, 3rd edition, C. Dilly, In The Poultry: London, 1786.
- [30] G. Beccaria, *Dell'elettricismo artificiale e naturale libri due di Giambatista Beccaria de' CC. RR. delle Scuole pie*, Nella stampa di Filippo Antonio Campana: Torino, 1753.
- [31] P. Bertholon, *De l'électricité des végétaux*, P. F. Didot Jeune, quai des Augustins: Paris, 1783.
- [32] L. Fabbrizzi, "Strange case of signor volta and mister nicholson: how electrochemistry developed as a consequence of an editorial misconduct", *Angewandte* **58** (2019), no. 18, pp. 5810–5822.
- [33] J. C. Bose, *Comparative Electro-Physiology*, Longmans, Green, and Co.: New York, Bombay and Calcutta, 1907.
- [34] W. Crookes, "On radiant matter", *Am. J. Sci.* **s3-18** (1879), no. 106, pp. 241–262.
- [35] W. von Siemens, "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen", *Ann. Phys.* **178** (1857), no. 9, pp. 66–122.
- [36] M. Faraday, "XXVIII. Experimental researches in electricity—fifth series", *Philos. Trans. R. Soc.* **123** (1833), pp. 675–710.
- [37] J. Burdon-Sanderson, "Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *dionaea muscipula*", *Proc. R. Soc.* **21** (1873), pp. 495–496.
- [38] F. Paschen, "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz", *Ann. Phys.* **273** (1889), no. 5, pp. 69–96.
- [39] J. S. Townsend, "The conductivity produced in gases by the motion of negatively charged ions", *Nature* **62** (1900), pp. 340–341.
- [40] J. S. Townsend, *The Theory of Ionization of Gases by Collision*, Constable: London, 1901.
- [41] A. W. Hofmann, "Dr. Heinrich Geissler", *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **12** (1879), pp. 147–148.
- [42] I. Langmuir, "Oscillations in ionized gases", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **14** (1928), no. 8, pp. 627–637.
- [43] C. von Sonntag and U. von Gunten, *Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Applications*, Iwa Publishing: London, 2012. ISBN 9781780400839.
- [44] C. Gottschalk, J. A. Libra and A. Saupe, *Ozonation of Water and Waste Water*, Wiley-VCH: Weinheim, 2010.
- [45] K. Birkeland, "On the oxidation of atmospheric nitrogen in electric arcs", *Trans. Faraday Soc.* **2** (1906), pp. 98–116.
- [46] A. M. W. Downing and T. P. Blunt, "Researches on the effect of light upon Bacteria and other organisms", *Proc. R. Soc. Lond.* **26** (1878), no. 179–184, pp. 488–500.
- [47] M. Luckiesh and L. Holladay, *Applications of Germicidal, Erythemat and Infrared Energy*, D. Van Nostrand Company, Inc.: New York, 1946. Library Catalog: MMS ID 991555293406676; NLM Unique ID 09720620R.
- [48] H. C. Rentschler and R. Nagy, "Bactericidal action of ultraviolet radiation (air)", *J. Bacteriol.* **44** (1942), no. 1, pp. 85–94.
- [49] S. Lemström, *Electricity in Agriculture and Horticulture*, The "Electrician" Printing & Publishing Company, Ltd: Salisbury Court, Fleet Street, London, 1904.

- [50] J. Christofleau, *Electroculture*, Alex. Trouchet & Son: Perth, 1925.
- [51] M. S. Kyi, J. Holton and G. L. Ridgway, "Assessment of the efficacy of a low temperature hydrogen peroxide gas plasma sterilization system", *J. Hosp. Infect.* **31** (1995), no. 4, pp. 275–284.
- [52] W. A. Rutala, M. F. Gergen and D. J. Weber, "Comparative evaluation of the sporicidal activity of new low-temperature sterilization technologies: Ethylene oxide, 2 plasma sterilization systems and liquid peracetic acid", *Am. J. Infect. Control* **26** (1998), no. 4, pp. 393–398.
- [53] M. Laroussi, "Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma", *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** (1996), no. 3, pp. 1188–1191.
- [54] I. Adamovich, S. D. Baalrud, A. Bogaerts, et al., "The 2017 plasma roadmap: low temperature plasma science and technology", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** (2017), no. 32, article no. 323001.
- [55] P. Ranieri, N. Sponsel, J. Kizer, M. Rojas-Pierce, R. Hernández, L. Gatiboni, A. Grunden and K. Stapelmann, "Plasma agriculture: review from the perspective of the plant and its ecosystem", *Plasma Process. Polym.* **18** (2021), no. 1, article no. 2000162.
- [56] D. B. Graves, "The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** (2012), no. 26, article no. 263001.
- [57] D. Yan, L. Lin, M. Zvansky, L. Kohanzadeh, S. Taban, S. Chriqui and M. Keidar, "Improving seed germination by cold atmospheric plasma", *Plasma* **5** (2022), no. 1, pp. 98–110.
- [58] M. A. Benabderrahim, I. Bettaie, H. Hannachi, M. Rejili and T. Dufour, "Cold plasma treatment boosts barley germination and seedling vigor: insights into soluble sugar, starch and protein modifications", *J. Cereal Sci.* **116** (2024), article no. 103852.
- [59] K. S. Wong, N. S. L. Chew, M. Low and M. K. Tan, "Plasma-activated water: physicochemical properties, generation techniques and applications", *Processes* **11** (2023), no. 7, article no. 2213.
- [60] E. Cortese, A. G. Settimi, S. Pettenuzzo, et al., "Plasma-activated water triggers rapid and sustained cytosolic Ca^{2+} elevations in arabidopsis thaliana", *Plants* **10** (2021), no. 11, article no. 2516.
- [61] S. M. E. Sultan, A. F. Yousef, W. M. Ali, et al., "Cold atmospheric plasma enhances morphological and biochemical attributes of tomato seedlings", *BMC Plant Biol.* **24** (2024), article no. 420.
- [62] Y. Zambon, N. Contaldo, R. Laurita, E. Várallyay, A. Canel, M. Gherardi, V. Colombo and A. Bertaccini, "Plasma activated water triggers plant defence responses", *Sci. Rep.* **10** (2020), article no. 19211.
- [63] Y. Gao, K. Francis and X. Zhang, "Review on formation of cold plasma activated water (PAW) and the applications in food and agriculture", *Food Res. Int.* **157** (2022), article no. 111246.
- [64] J. Šimečková, F. Krčma, D. Klofáč, L. Dostál and Z. Kozáková, "Influence of plasma-activated water on physical and physical-chemical soil properties", *Water* **12** (2020), no. 9, article no. 2357.
- [65] B. A. Niemira, "Cold plasma decontamination of foods", *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **3** (2012), pp. 125–142.
- [66] N. N. Misra, S. Patil, T. Moiseev, P. Bourke, J. P. Mosnier, K. M. Keener and P. J. Cullen, "In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries", *J. Food Eng.* **125** (2014), pp. 131–138.
- [67] M. Bayati, M. N. Lund, B. K. Tiwari and M. M. Poojary, "Chemical and physical changes induced by cold plasma treatment of foods: a critical review", *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **23** (2024), no. 4, article no. e13376.
- [68] M. François and F. Fourmaux, *Note on Abbé Pierre Bertholon de Saint Lazare*, Committee for Historical and Scientific Works (CTHS): Institute affiliated with the École nationale des chartes, 2011. Online at <https://cths.fr/an/savant.php?id=104741> (accessed on August 30, 2025).
- [69] L. Dulieu, "Le mouvement scientifique montpelliérain au XVIII^e siècle", *Rev. Hist. Sci. Appl.* **11** (1958), no. 3, pp. 227–249.
- [70] M. l'Abbé Bertholon, *De l'électricité du corps humain dans l'état de santé et de maladie*, P. F. Didot le jeune, Libraire, quai des Augustins: Paris, 1780.
- [71] M. l'Abbé Bertholon and M. Goyer, *La nature considérée sous ses différents aspects ou journal d'histoire naturelle*, vol. Premier, Périsse, libraire, Pont Saint-Michel au Soleil d'Or: Paris, 1787.
- [72] J. Priestley, "XXVI. An account of a new electrometer, contrived by Mr. William Henly and of several electrical experiments, made by him, in a letter from Dr. Priestley, F. R. S. to Dr. Franklin, F. R. S.", *Philos. Trans. R. Soc.* **62** (1772), pp. 359–364.
- [73] A. Guillemin, in *Electricity & Magnetism* (S. P. Thompson, ed.), London MacMillan and Co.: New York, 1891.
- [74] C. A. Coulomb, "Mémoires sur l'électricité et le magnétisme", in *Extraits des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris, publiés dans les années 1785 à 1789, avec planches et tableaux. Deuxième mémoire*, vol. 55, Bachelier, libraire, quai des Augustins: Paris, 1785, pp. 577–611.
- [75] A. Martinez, "Replication of Coulomb's torsion balance experiment", *Arch. Hist. Exact Sci.* **60** (2006), pp. 517–563.
- [76] M. B. Rubin, "The history of ozone. The Schönbein period, 1839–1868", *Bull. Hist. Chem.* **26** (2001), no. 1, pp. 40–56.
- [77] D. Tarasick, I. E. Galbally, O. R. Cooper, et al., "Tropospheric ozone assessment report: tropospheric ozone from 1877 to 2016, observed levels, trends and uncertainties", *Elem. Sci. Anth.* **7** (2019), article no. 39.

- [78] J. Barth, "Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) und die Entdeckung der UV-Strahlung vor 185 Jahren [Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) and the discovery of ultraviolet irradiation 185 years ago]", *Hautarzt* **38** (1987), no. 5, pp. 301–303. Online at <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3301744/>. PMID: 3301744.
- [79] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann: Newnes, 2000. ISBN 0 7506 3634 3.
- [80] R. A. Fisher, *The Design of Experiments*, Hafner Press: A Division of MacMillan Publishing Co., Inc., Collier MacMillan Publishers: New York, London, 1971.
- [81] I. Chalmers, "Why the 1948 MRC trial of streptomycin used treatment allocation based on random numbers", *J. R. Soc. Med.* **104** (2011), no. 9, pp. 383–386.
- [82] P. Bourke, D. Ziuzina, D. Boehm, P. J. Cullen and K. Keener, "The potential of cold plasma for safe and sustainable food production", *Trends Biotechnol.* **36** (2018), no. 6, pp. 615–626.
- [83] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, 3rd edition, Springer: Cham, 2019, pp. XII, 490. Softcover ISBN: 978-3-319-79391-7.
- [84] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg and New York, 1991, p. 460. ISBN-10: 3540194622.
- [85] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc., 2005. ISBN: 9780471724254.
- [86] L. C. Pitchford, L. L. Alves, K. Bartschat, et al., "LXCat: an open-access, web-based platform for data needed for modeling low temperature plasmas", *Plasma Process. Polym.* **14** (2016), no. 1–2, article no. 1600098.
- [87] F. Judée, S. Simon, C. Bailly and T. Dufour, "Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms", *Water Res.* **15** (2018), no. 133, pp. 47–59.
- [88] P. Bruggeman and C. Leys, "Non-thermal plasmas in and in contact with liquids", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (2009), no. 5, article no. 053001.
- [89] P. J. Bruggeman, M. J. Kushner, B. R. Locke, et al., "Plasma-liquid interactions: a review and roadmap", *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (2016), no. 5, article no. 053002.
- [90] U. Kogelschatz, "Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics and industrial applications", *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** (2003), pp. 1–46.
- [91] J. Winter, R. Brandenburg and K.-D. Weltmann, "Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions", *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** (2015), no. 6, article no. 064001.
- [92] T. C. Manley, "The electric characteristics of the ozonator discharge", *Trans. Electrochem. Soc.* **84** (1943), no. 1, pp. 83–96.
- [93] H. Decauchy and T. Dufour, "Transmission and multiple reflection mechanisms of guided streamers propagating through grounded annular electrode and interacting with grounded surface electrode", *Plasma Sources Sci. Technol.* **31** (2022), no. 11, article no. 115017.
- [94] J. H. Kim, Y. H. Kim, Y. H. Choi, W. Choe, J. J. Choi and Y. S. Hwang, "Optical measurements of gas temperatures in atmospheric pressure RF cold plasmas", *Surf. Coat. Technol.* **171** (2003), no. 1–3, pp. 211–215.
- [95] N. Masoud, K. Martus, M. Figus and K. Becker, "Rotational and vibrational temperature measurements in a high-pressure cylindrical dielectric barrier discharge (C-DBD)", *Contrib. Plasma Phys.* **45** (2005), no. 1, pp. 32–39.
- [96] A. Herrmann, P. M. Krebaum, S. Bera, M. N. Tsampas and M. C. M. van de Sanden, "Enhanced catalytic probe design for mapping radical density in the plasma afterglow", *J. Phys. Chem. A* **128** (2024), no. 46, pp. 10080–10086.
- [97] R. R. Brandenburg, "Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments", *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** (2017), no. 5, article no. 053001.
- [98] L. L. Alves, M. M. Becker, J. van Dijk, et al., "Foundations of plasma standards", *Plasma Sources Sci. Technol.* **32** (2023), no. 2, article no. 023001.
- [99] J. R. Bolton and K. G. Linden, "Standardization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments", *J. Environ. Eng.* **129** (2003), no. 3, pp. 209–215.
- [100] D. Tsikas, "Analysis of nitrite and nitrate in biological fluids by assays based on the Griess reaction: appraisal of the Griess reaction in the l-arginine/nitric oxide area of research", *J. Chromatogr. B* **851** (2007), no. 1–2, pp. 51–70.
- [101] J.-Y. Han, S.-H. Park and D.-H. Kang, "Effects of plasma bubble-activated water on the inactivation against foodborne pathogens on tomatoes and its wash water", *Food Control* **144** (2023), article no. 109381.
- [102] M. M. Rahman, S. A. Sajib, M. S. Rahi, et al., "Mechanisms and signaling associated with LPDBD plasma mediated growth improvement in wheat", *Sci. Rep.* **8** (2018), article no. 10498.
- [103] N. Dawood, "Effects of air plasma treatment on water uptake of wheat and barley seeds", *J. Taibah Univ. Sci.* **15** (2021), no. 1, pp. 1094–1100.

- [104] P. Starič, S. G. Mlakar and I. Junkar, "Response of two different wheat varieties to glow and afterglow oxygen plasma", *Plants* **10** (2021), no. 8, article no. 1728.
- [105] P. Starič, J. Mravlje, M. Mozetič, R. Zaplotnik, B. S. Batič, I. Junkar and K. Vogel Mikuš, "The influence of glow and afterglow cold plasma treatment on biochemistry, morphology and physiology of wheat seeds", *Int. J. Mol. Sci.* **23** (2022), no. 13, article no. 7369.
- [106] S. Karmakar, M. Billah, M. Hasan, et al., "Impact of LFGD (Ar + O₂) plasma on seed surface, germination, plant growth, productivity and nutritional composition of maize (*Zea mays* L.)", *Heliyon* **7** (2021), article no. e06458.
- [107] R. Molina, A. Lalueza, C. López-Santos, R. Gobeira, P. Cools, R. Morent, N. de Geyter and A. R. González-Elipe, "Physicochemical surface analysis and germination at different irrigation conditions of DBD plasma-treated wheat seeds", *Plasma Process. Polym.* **18** (2021), no. 1, article no. 2000086.
- [108] N. Recek, M. Holc, A. Vesel, R. Zaplotnik, P. Gselman, M. Mozetič and G. Primc, "Germination of *Phaseolus vulgaris* L. Seeds after a short treatment with a powerful RF plasma", *Int. J. Mol. Sci.* **22** (2021), no. 13, article no. 6672.
- [109] E. Bormashenko, R. Grynyov, Y. Bormashenko and E. Drori, "Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds", *Sci. Rep.* **2** (2012), article no. 741.
- [110] N. Khamsen, D. Onwimol, N. Teerakawanich, S. Dechanupaprittha, W. Kanokbannakorn, K. Hongesombut and S. Srisonphan, "Rice (*Oryza sativa* L.) seed sterilization and germination enhancement via atmospheric hybrid nonthermal discharge plasma", *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** (2016), no. 30, pp. 19268–19275.
- [111] J. Mravlje, M. Regvar and K. Vogel-Mikus, "Development of cold plasma technologies for surface decontamination of seed fungal pathogens: present status and perspectives", *J. Fungi* **7** (2021), no. 8, article no. 650.
- [112] A. Mitra, Y. F. Li, T. G. Klämpfl, T. Shimizu, J. Jeon, G. E. Morfill and J. L. Zimmermann, "Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma", *Food Bioprocess Technol.* **7** (2014), pp. 645–653.
- [113] P. Basaran, N. Basaran-Akgul and L. Oksuz, "Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment", *Food Microbiol.* **25** (2008), pp. 626–632.
- [114] K. Homa, W. P. Barney, W. P. Davis, D. Guerrero, M. J. Berger, J. L. Lopez, C. A. Wyendandt and J. E. Simon, "Cold plasma treatment strategies for the control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *basilici* in sweet basil", *HortScience* **56** (2020), no. 1, pp. 42–51.
- [115] J. Mravlje, M. Regvar, P. Starič, M. Mozetič and K. Vogel-Mikuš, "Cold plasma affects germination and fungal community structure of buckwheat seeds", *Plants* **10** (2021), no. 5, article no. 851.
- [116] G. Grainge, K. Nakabayashi, T. Steinbrecher, S. Kennedy, J. Ren, F. Iza and G. Leubner-Metzger, "Molecular mechanisms of seed dormancy release by gas plasma-activated water technology", *J. Exp. Bot.* **73** (2022), no. 12, pp. 4065–4078.
- [117] G. Grainge, K. Nakabayashi, F. Felipe Iza, G. Leubner-Metzger and T. Steinbrecher, "Gas-plasma-activated water impact on photo-dependent dormancy mechanisms in *Nicotiana tabacum* seeds", *Int. J. Mol. Sci.* **23** (2022), no. 12, article no. 6709.
- [118] L. Ling, L. Jiangang, S. Minchong, Z. Chunlei and D. Yuanhua, "Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress", *Sci. Rep.* **5** (2015), article no. 13033.
- [119] J.-Y. Bian, X.-Y. Guo, D. H. Lee, et al., "Non-thermal plasma enhances rice seed germination, seedling development and root growth under low-temperature stress", *Appl. Biol. Chem.* **67** (2024), article no. 2.
- [120] K. Sayahi, A. H. Sari, A. Hamidi, B. Nowruzi and F. Hassani, "Evaluating the impact of Cold plasma on Seedling Growth properties, seed germination and soybean antioxidant enzyme activity", *BMC Biotechnol.* **24** (2024), article no. 93.
- [121] K. Kučerová, M. Henselová, L. Slováková and K. Hensel, "Effects of plasma activated water on wheat: germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content and antioxidant enzymes activity", *Plasma Process. Polym.* **16** (2019), no. 3, article no. 1800131.
- [122] B. Šerá, R. Vanková, K. Roháček and M. Sery, "Gliding arc plasma treatment of maize (*Zea mays* L.) grains promotes seed germination and early growth, affecting hormone pools, but not significantly photosynthetic parameters", *Agronomy* **11** (2021), no. 10, article no. 2066.
- [123] B. Adhikari, M. Adhikari, B. Ghimire, G. Park and E. H. Choi, "Cold atmospheric plasma-activated water irrigation induces defense hormone and gene expression in tomato seedlings", *Sci. Rep.* **9** (2019), no. 16080.
- [124] F. M. Abarghuei, M. Etemadi, A. Ramezani, A. Esehaghbeygi and J. Alizargar, "An application of cold atmospheric plasma to enhance physiological and biochemical traits of basil", *Plants* **10** (2021), no. 10, article no. 2088.
- [125] L. Sivachandiran and A. Khacef, "Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment", *RSC Adv.* **7** (2017), article no. 1822.
- [126] S. Zhang, A. Rousseau and T. Dufour, "Promoting lentil germination and stem growth by plasma activated tap water, demineralized water and liquid fertilizer", *RSC Adv.* **7** (2017), article no. 31244.

- [127] J. Perner, J. Matousek and H. A. Malinska, “Cold plasma treatment influences the physiological parameters of millet”, *Hotosynthetica* **62** (2024), no. 1, pp. 126–137.
- [128] F. Bussmann, A. Krüger, C. Scholz, H. Brust and C. Stöhr, “Long-term effects of cold atmospheric plasma-treated water on the antioxidative system of hordeum vulgare”, *J. Plant. Growth Regul.* **42** (2023), pp. 3274–3290.
- [129] K. Panngom, S. H. Lee, D. H. Park, G. B. Sim, Y. H. Kim, H. S. Uhm, G. Park and E. H. Choi, “Non-thermal plasma treatment diminishes fungal viability and up-regulates resistance genes in a plant host”, *PLoS One* **9** (2014), no. 6, article no. e99300.
- [130] S. M. Perez, E. Biondi, R. Laurita, M. Proto, F. Sarti, M. Gherardi, A. Bertaccini and V. Colombo, “Plasma activated water as resistance inducer against bacterial leaf spot of tomato”, *PLoS One* **14** (2019), no. 5, article no. e0217788.
- [131] P. J. Savi, S. Robertson, A. Mantri, B. A. Mattar Carciofi, G. A. Annor and C. Nansen, “Plasma-activated water irrigation increases mortality of immature spider mites (*Tetranychus urticae*) on tomato plants”, *Sci. Rep.* **15** (2025), article no. 22118.
- [132] M. Veerana, W. Ketya, E.-H. Choi and G. Park, “Non-thermal plasma enhances growth and salinity tolerance of bok choy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) in hydroponic culture”, *Front. Plant Sci.* **15** (2024), article no. 1445791.
- [133] Z. Lukacova, R. Svubova, P. Selvekova and K. Hensel, “The effect of plasma activated water on maize (*Zea mays* L.) under arsenic stress”, *Plants* **10** (2021), no. 9, article no. 1899.



Research article

At the origins of electroculture: a retrodictive modelling of Bertholon's 18th-century electrovegetometer in the pre-corona regime

Thierry Dufour^{✉,a}

^a Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), Sorbonne Université, Ecole Polytechnique, CNRS, 75005, Paris, France

E-mail: thierry.dufour@sorbonne-universite.fr

Abstract. Pierre-Nicolas Bertholon's 18th-century electrovegetometer was conceived to harness "atmospheric electricity" for plant growth, yet its physical capabilities have never been quantified within the context of today's understanding of the Earth atmospheric electric system. This study addresses the lack of quantitative assessment of such a historical "electroculture" device and its plausible influence on the near-canopy electrical environment. It aims to reinterpret Bertholon's apparatus using contemporary atmospheric electrodynamics, asking under which realistic fair-weather and storm-like conditions a purely passive collector-distributor could generate fields and ion fluxes of physical significance. A two-dimensional, quasi-steady ohmic model has been developed in which the atmosphere is a resistive column carrying the global conduction current, the metal structure is a floating conductor supported by leaky wooden insulators and space charge and corona are excluded so that all results describe pre-onset upper bounds. The simulations show that in fair weather the single upper point and the lower multi-point crown of the electrovegetometer enhance the background field by two to three orders of magnitude, yet only within millimetric-centimetric regions around the tips and with total currents limited to the $\text{pA-nA}\cdot\text{m}^{-2}$ range. Under storm-like forcing, peak fields at the crown reach $10^5\text{--}10^6\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, approaching or exceeding empirical corona-onset thresholds, while remaining largely insensitive to uncertainties in apex angle or collector geometry as long as an elevated mast is present. These results make Bertholon's reports of luminous "aigrettes" physically plausible, but suggest that any fair-weather agronomic impact was subtle and highly localized and that modern "electroculture" claims require careful, coupled electrostatic and biological studies beyond the pre-corona regime.

Keywords. Abbé Bertholon, Electroculture, Cold atmospheric plasmas, Corona, Retrodictive model.

Note. Article submitted by invitation.

Manuscript received 26 November 2025, accepted 12 January 2026.

1. Introduction

1.1. *An interdisciplinary impetus: from the Montpellier colloquium to the present study*

The present study was initiated in the aftermath of the French colloquium « *Hommage à Pierre Bertholon, savant et électricien des Lumières* », held in Montpellier in October 2023 thanks to Alumni-ONERA and the University of Montpellier. This event gathered historians of science, physicists, atmospheric-electricity specialists and scholars of 18th-century natural philosophy,

communities that rarely interact even though their combination holds unsuspected and significant interdisciplinary potential. Discussions with participants during and after the meeting revealed a shared interest in reassessing Bertholon's electrovegetometer using the tools of modern atmospheric electrodynamics, while remaining faithful to its historical context and material constraints. The present article is therefore partly a product of this interdisciplinary encounter, illustrating the scientific value of such colloquia in bridging distinct research cultures and stimulating new lines of inquiry across disciplinary boundaries.

1.2. *Historical framing*

To situate this renewed interest within its original scientific context, it is necessary to revisit the historical foundations of Bertholon's work. In 1783, Pierre-Nicolas Bertholon de Saint-Lazare, commonly known as Abbé Bertholon, published *De l'électricité des végétaux*, a treatise in which he asserted that "atmospheric electricity" acts continuously on plants and might be harnessed to improve germination, growth, flowering and fruiting [1]. His key practical proposal, the electrovegetometer (*électro-végétomètre*), was a passive apparatus intended to collect charge from the atmosphere and redistribute it gently over crops through "aigrettes lumineuses": a historical French expression that can be understood today as faint, luminous corona discharges.

Although Bertholon interpreted the operation of his apparatus through the 18th-century notion of an "electric fluid", the physical principle he was appealing to can be expressed clearly in modern electrodynamic terms: sharp conductors immersed in an ambient electric field can act as sources (or sinks) of space charge, modifying local ion densities and weak airflows and thereby altering the microphysical environment near leaves and soil. In Bertholon's descriptions, the electrovegetometer consisted essentially of a vertical, insulated mast that elevated a collecting structure into the atmospheric electric field. A conductive path brought the intercepted charge down to a distribution arm, which terminated in a crown of fine points suspended over crop rows. The points were intended to release charge via non-disruptive discharges, subtly modifying the potential gradient and charge environment around the canopy.

Bertholon described two closely related configurations of this electrovegetometer:

- The Configuration I "single-point rod, articulated arm" (Figure 1a), combined a relatively simple collector with a mechanically versatile diffuser. A tall wooden mast, carefully insulated from the soil by tar, resins and glass elements, carried a single iron point at its head, shielded by a tin funnel to favour upward collection. A suspended chain conducted the intercepted "electric fluid" to a small iron disk where the collected charge was expected to accumulate before being redistributed. From there, a hinged metal arm, horizontally supported on insulated trestles, could be swung over selected rows of crops. At its far end, a crown of fine points could release charge like a diffuse corona just above the canopy. A removable grounding chain allowed the whole device to be neutralized when the air was judged "overcharged".
- The Configuration II "multi-point crown, rotating and extendable arm" (Figure 1b) is characterized by a crown of sharp points mounted on a resin-treated, glass-insulated hub, to increase the effective collection area of *electrical fluid* while maintaining high insulation. A bent lever and chain connected this hub to a rotary, telescopic arm that could sweep a full circle and be extended or retracted to adjust the treated footprint. As in Configuration I, a terminal crown of points was expected to diffuse charge gently onto the vegetation.

In both configurations, the apparatus was entirely passive: it neither measured voltage nor current and it injected no external power. Since modern concepts such as electrical potential,

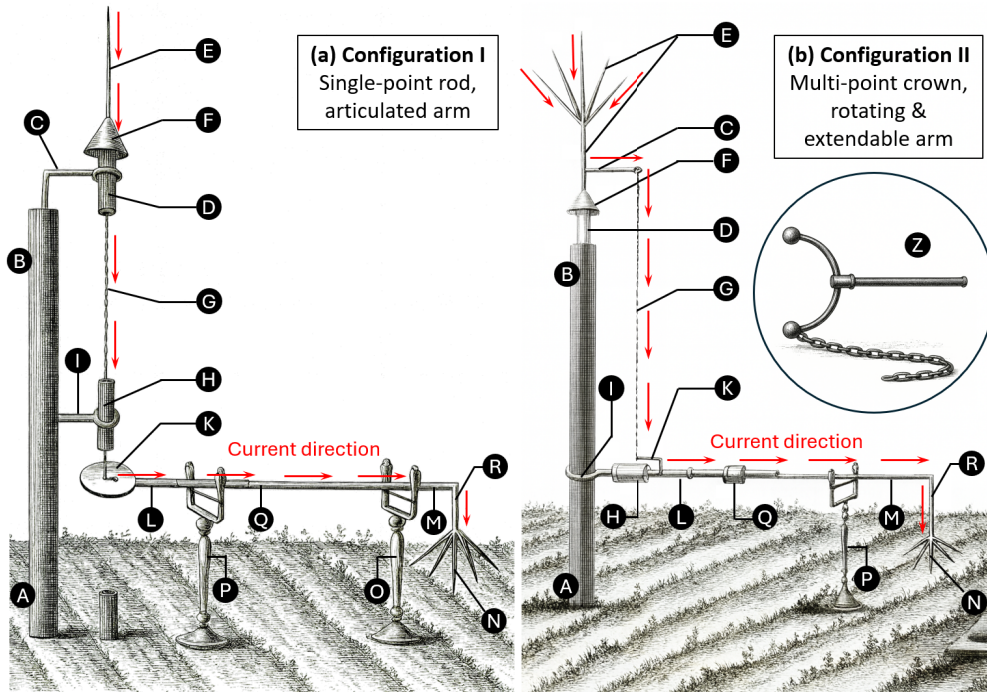


Figure 1. Bertholon's electrovegetometer, a passive apparatus intended to channel “atmospheric electricity” toward crops. (a) Configuration I, featuring a single-point rod collector (E) at the mast head and an articulated arm that distributed charge through a multi-point crown (N). (b) Configuration II, equipped with a multi-point crown collector (E), a rotating and extendable arm and a larger treatment footprint terminating by a multi-point crown distributor (N). A neutralization device (Z), shown in the inset of (b), could provide safety and on/off control. Adapted from [1].

current and standardized units were not yet available, Bertholon reasoned qualitatively with notions of “more” or “less” electricity. The individual components of each configuration are detailed in Table 1.

1.3. From enlightenment ideas to modern atmospheric electrodynamics

By the late 18th century, several essential aspects of atmospheric electricity were already recognised. Experiments by Stephen Gray and Charles François de Cisternay Du Fay had already distinguished conductors from insulators and introduced the idea of two opposite electrical states, later renamed “positive” and “negative” [2]. Benjamin Franklin synthesised these ideas, defined the polarity convention and argued, on the basis of laboratory similarities and field experiments, that lightning was an electrical discharge of the same nature as sparks from machines [3]. His proposals were confirmed in France by Dalibard and Le Monnier who utilized elevated and well-insulated iron conductors to draw sparks during thunderstorms, hence confirming that storm clouds carry electrical charge [4]. Soon afterwards, systematic electroscope measurements by John Canton in London and Giambattista Beccaria in Turin showed that even cloudless air was rarely neutral: slow “silent” discharges, diurnal variations of the field and luminous glows such as sailors’ St Elmo’s fire revealed that the lower atmosphere was persistently electrified [5]. From a modern standpoint, St Elmo’s fire was understood as a low-current corona discharge from sharp conductors in a strong ambient field [6]. Yet these 18th-century insights were local and qualitative. A quantitative, global framework, in which thunderstorms, fair-weather regions and the

Table 1. Comparison between the design and operation of Bertholon's electrovegetometer (Figure 1): Configuration I ("single-point rod, articulated arm") and Configuration II ("multi-point crown, rotating and extendable arm")

	Configuration I Single-point rod, articulated arm	Configuration II Multi-point crown, rotating and extendable arm
Purpose	Passive capture → Insulated conduction → Gentle diffusion over crops (no measurement)	
Mast/Base	Wooden mast (A–B): buried section fire-dried, tarred, wrapped in charcoal dust/cement, then masonry footing; above-ground part painted/bitumen-coated for weather resistance	Mast (A–B) with resin-saturated head cylinder (C) treated with tar/pitch/turpentine to improve insulation from ground
Top insulation	- Thick glass tube packed with bituminous mastic (D) - Second glass insulator downstream (H)	Insulated rotary interface via resin insert (D) and glass/mastic sleeve (H)
Collector (at mast head)	Single-point rod (E) mounted in D; protected by a tinplate funnel (F)	Multipoint crown (E) to maximize charge capture
Conduction path (vertical)	Conducting chain (G) suspended from E, guided through H to prevent leakage	Bent iron lever (C) carrying chain (G) to the arm interface
Regulation/buffer	Chain terminates at iron disk (K) acting as a small "condenser/regulator" to buffer atmospheric variations	No separate disk; regulation implicit (focus on mobility and reach)
Horizontal arm/distribution	Articulated conductor arm (K–L–M–N) hinged at L and Q, supported on insulating trestles (O, P) with stretched silk cords	Telescoping conductor arm (L–M) with its telescoping conductor (Q), supported on insulating trestle (P) with stretched silk cords
Terminal diffuser	Crown of sharp metal points at the arm tip (N, R), releasing charge as non-disruptive corona over the crop canopy/soil	
Mobility/coverage	Arm swings on hinges (L, Q) to cover a sector (row/strip)	Full 360° rotation via I–L–M and extend/retract (Q) to sweep a full circle and vary reach
Neutralization (on/off control)	Apply a chain (or vertical rod) between K and the ground to break insulation and bleed charge. Also used to null effect when "excess" of electricity is presumed	
Operation (per Bertholon)	Use when the air was "poor in electric fluid"; distributed via N; grounded at K when "excess" was observed	
Safety	Sharp points released corona glows (no sparks). "C-shaped exciter" (copper/iron frame with glass handle + trailing ground chain) recommended to shunt charge during handling	

The letters (A–Z) correspond to the captions of the original figures. Both devices were passive collectors-distributors (no field/charge/current measurement).

ionosphere are coupled through a single atmospheric electric circuit, emerged only in the early 20th century, particularly through C. T. R. Wilson work and later syntheses of the “global atmospheric electrical circuit” [7].

Modern atmospheric electrodynamics frames these phenomena in terms of the global electric circuit (GEC). The Earth-ionosphere system behaves as a leaky spherical capacitor: thunderstorms and electrified clouds maintain the ionosphere at roughly +250/+300 kV relative to the surface, while “fair-weather” regions close the circuit through the weak electrical conductivity of the air [8,9]. Under clear undisturbed conditions, the atmospheric column carries a small, nearly steady downward conduction current density, described locally by Ohm’s law:

$$J_z(z) = \sigma(z)E_z(z), \quad (1)$$

where $\sigma(z)$ is the electrical conductivity and $E_z(z)$ the vertical electric field (taken positive upward). Near the surface, typical values of $E_z(0) = E_{0,\text{atm}}$ are comprised between -150 to $-100 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ and $J_z(0) = J_{0,\text{atm}}$ between -3 and $-1 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$ [10]. Conductivity increases by many orders of magnitude with altitude (from about $10^{-14} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ near the ground to $10^{-7} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ in the lower thermosphere), so that $|E_z|$ decreases correspondingly and the potential $V(z)$ rises from 0 V to the ground toward the ionospheric level of a few $\times 10^5 \text{ V}$ [11].

Under disturbed or stormy conditions, this simple vertical structure is strongly modified. Charge separation in thunderclouds produces large quasi-static fields at the surface (up to several $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$), enhances ion production and alters the conductivity profile [12]. The vertical current density can increase into the $\text{nA}\cdot\text{m}^{-2}$ range and strong, locally variable fields develop near sharp objects, creating conditions favourable for corona discharges and leaders [13]. These disturbed states form the storm branch of the global circuit are crucial for interpreting how a protruding conductor, such as Bertholon’s electrovegetometer, might experience both modest fair-weather forcing and episodic, much stronger storm-time forcing.

Owing to its limited height (Figure 1), Bertholon’s apparatus can only interact with the lowest few meters of the atmosphere, where the idealised one-dimensional GEC picture breaks down and local processes dominate. Topography, aerosol loading, vegetation, humidity, surface conductivity and proximity to storm charge all influence the local electric field. For a passive collector-distributor such as the electrovegetometer, this near-surface layer controls both the magnitude of intercepted current and the likelihood of initiating discharges at the tips. For clarity, two idealized regimes can be distinguished, as summarized in Table 2:

- Fair-weather (“sunny”) conditions, representing undisturbed atmospheric states with weak fields and very small conduction currents;
- Stormy-weather conditions, representing periods beneath electrified clouds or near active storm cells, where fields and currents can increase by orders of magnitude.

1.4. Knowledge gap and research questions

Historical accounts describe Bertholon’s electrovegetometer as a purely passive apparatus: the ambient atmospheric conduction current was collected on a sharp upper point and redistributed through a conductor by a lower crown of points, without any external power source or means of regulating or measuring the electrical state. What remains uncertain is whether such a passive configuration could, even in principle, generate ion or charge fluxes large enough to have physical significance at canopy height. No previous study has embedded the electrovegetometer explicitly in the framework of the global atmospheric electric circuit, with realistic fair-weather and storm-time fields, currents and conductivity profiles, nor quantified how far from the tips its influence on the electrical microenvironment of crops can extend.

Table 2. Idealized near-surface regimes used as atmospheric boundary conditions

Parameter	Fair weather conditions	Stormy weather conditions
Electric field direction	Downward (negative)	Upward (positive)
Vertical electric field $E_{0,\text{atm}}$	$-100 \rightarrow -150 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$	$+1 \rightarrow +10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$
Electric potential	Increases with altitude	Decreases with altitude
	$\frac{dV}{dz} = -E_z > 0$	$\frac{dV}{dz} = -E_z < 0$
	$V(1 \text{ m})$	$-1 \text{ kV} \rightarrow -10 \text{ kV}$
	$V(10 \text{ m})$	$-10 \text{ kV} \rightarrow -100 \text{ kV}$
Conductivity at surface $\sigma(0)$	$(1-5) \times 10^{-14} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$	$(1-10) \times 10^{-12} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$
σ variation with height (0–20 m)	Increases gradually ($\approx 10\times$) due to ionization by cosmic rays and radioactivity	Increases sharply ($\approx 100\times$) near ground due to field-induced ionization and space charge
Conduction current density J	$\approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$ (downward, negative)	$+0.1 \rightarrow +10 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ (upward, positive)
Surface potential reference $V(0)$	0 V (by convention)	0 V (by convention)
Breakdown electric field (E_{bd})	$\approx 3.0 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$	$2.5-2.8 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$

A second gap concerns the absence of a systematic distinction between fair-weather and storm-affected regimes. Modern atmospheric electricity recognises that typical fair-weather conditions (e.g. $E_{0,\text{atm}} \approx -120 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, $J_{0,\text{atm}} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$) are associated with weak, quasi-steady conduction currents, whereas storm-time conditions can support much stronger and more structured electric fields. Yet, existing historiographical and experimental discussions of the electrovegetometer do not quantify how these regimes would differentially drive a floating metal structure, nor do they estimate pre-corona upper bounds on the fields and currents attainable at the upper collector and the lower crown. This makes it difficult to judge whether historical reports of luminous “aigrettes” correspond to fields that plausibly exceed diffuse-corona onset thresholds.

Finally, the electrodynamic consequences of geometric uncertainty remain unexplored. Historical engravings constrain the general architecture of the electrovegetometer but not the precise mast height, arm length, tip spacing or apex angles. It is therefore unknown how strongly the background column current can be concentrated into the canopy layer by a realistic crown, over what distance above the soil the enhanced electric field and current density persist (e.g. within the first 0.2–0.5 m) and how sensitive these quantities are to collector and mast geometry.

The present work addresses these gaps by developing a simplified two-dimensional conduction model of the air-device system, in which the electrovegetometer is treated as a floating metal structure polarised by the global electric circuit. Within this pre-corona, ohmic framework, we calculate the potential, electric field and current density around idealised reconstructions of Bertholon’s device under both fair-weather and storm-like forcing, for several plausible combinations of mast height, arm length and tip spacing. The simulations quantify (i) the maximum local fields and enhancement factors at single-point and multi-point collectors, (ii) the concentration of background column current into the canopy layer and the resulting vertical and horizontal gradients of $|E|$ and $|J|$ and (iii) the atmospheric and geometric conditions under which the computed fields approach or exceed empirical diffuse-corona onset criteria. Because space charge

accumulation and ionisation feedback are not modelled, these results should be interpreted as controlled, pre-onset upper bounds rather than predictions of discharge behaviour.

These considerations lead to the following research questions:

- Under realistic fair-weather forcing, what potentials, electric-field magnitudes and current densities are established around the upper collector and lower crown and over what length scales do these perturbations decay above the canopy?
- Under enhanced background fields representing pre-storm or storm-affected conditions, can a purely passive electrovegetometer reach electric-field levels at its tips that approach diffuse-corona onset thresholds, making historical luminous “aigrettes” physically plausible?
- How do field enhancement, current concentration into the canopy layer and proximity to corona-onset thresholds depend on mast height, arm length, tip spacing and collector design within the range consistent with historical descriptions?

2. Model

All numerical computations were performed using GNU Octave (version 10.3.0), employing custom scripts for the finite-difference discretization, relaxation scheme, and post-processing.

2.1. *Physical assumptions and scope*

The electrostatic environment around Bertholon’s electrovegetometer is modeled as a quasi-steady, ohmic atmosphere carrying the global weather conduction current. The key assumptions are as follows:

- The atmosphere behaves as a linear, resistive medium characterized by a prescribed conductivity $\sigma(x, z)$, dominated by its altitude dependence $\sigma(z)$.
- The vertical conduction current is approximately conserved ($\vec{\nabla} \cdot \mathbf{J} = 0$) in the absence of sources or sinks.
- Space charge ρ and ionization feedback are not explicitly resolved; instead, their net effect on conductivity is encoded in $\sigma(z)$.
- The metallic parts of the device are treated as perfect conductors, each connected metallic region being equipotential. The structure is electrically floating: no external voltage is imposed, and its potential adjusts self-consistently under the imposed global-circuit forcing.
- The ground is represented as a conducting, equipotential boundary. The crop canopy is not explicitly resolved (fields are evaluated in the air above flat ground), so fine-scale field distortions by individual plants are neglected.
- The problem is solved in two-dimensional Cartesian geometry, assuming invariance in the out-of-plane direction. As a consequence, the computed enhancement factors are specific to this 2D approximation; a truly axisymmetric or fully 3D representation of the device would generally yield quantitatively different near-tip field concentrations, although the qualitative trends discussed here are expected to remain the same. The wooden supports are represented as weak conductors (very low σ_{wood}) that can leak current but are highly resistive compared to metal.

2.2. *Governing equations and conductivity profile*

The electric potential $V(x, z)$ satisfies the stationary conduction Equation (2) throughout all materials, while the electric field and current density are given by Equations (3) and (4). The atmosphere is described using the altitude-dependent conductivity profile of Equation (5), where

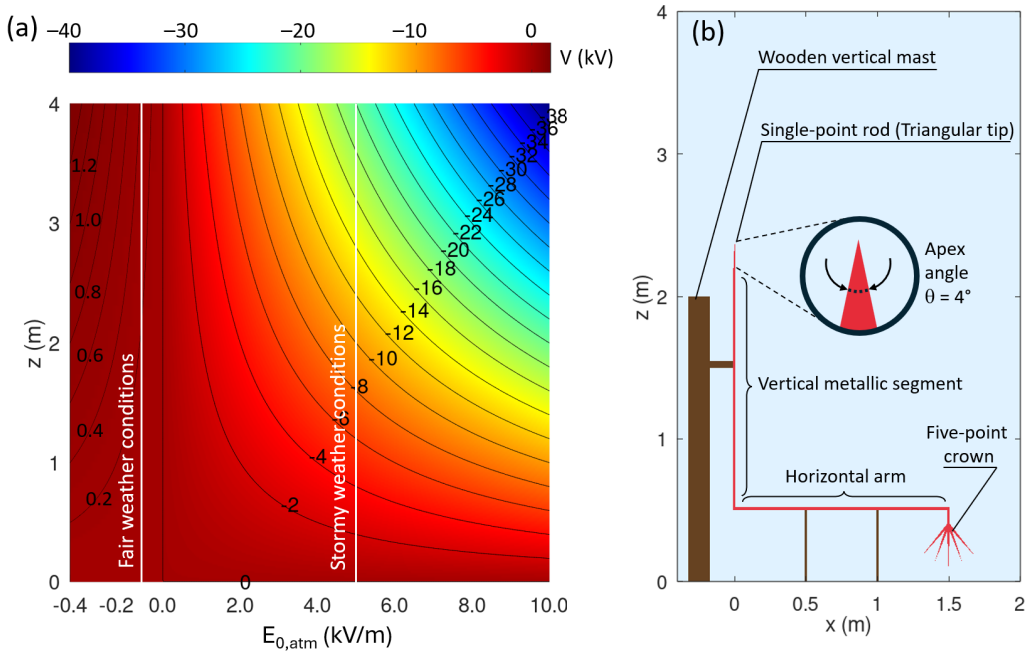


Figure 2. (a) Electric potential $V(E_z, z)$ in the atmosphere above the ground, shown as colored contours (in kV) and black isopotential lines. The horizontal axis represents the imposed vertical electric field E_z , ranging from fair-weather values ($E_z < 0$) to storm-time values ($E_z > 0$). The two white vertical lines correspond to the fair-weather and stormy-weather atmospheric conditions for this study. (b) Geometrical model of Bertholon's electrovegetometer as implemented in configuration I, which includes the wooden insulating mast and supports (brown), the conductive L-shaped structure (red) and the multi-point crown. The computational domain represents a 2 m $\times$ 4 m vertical cross-section of the surrounding atmosphere.

$\sigma_0 = J_{0,atm}/E_{0,atm}$ is determined by the imposed near-surface atmospheric electric field $E_{0,atm}$ and the corresponding column current density $J_{0,atm}$. Figure 2a displays the resulting isopotential structure for values of $E_{0,atm}$ ranging from $-0.4 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ to $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. Two physically distinct atmospheric regimes appear in this range and are therefore considered in the simulations:

- Fair-weather conditions, characterized by $E_{0,atm} \approx -120 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ and $J_{0,atm} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$, yielding weak potential gradients and gently curved isopotentials (left side of Figure 2a).
- Stormy-weather conditions, associated with much stronger positive electric fields, are here represented by $E_{0,atm} = +5 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ and $J_{0,atm} = 5 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$, which produce steep potential drops with altitude and tightly packed isopotentials (right side of Figure 2a).

A conductivity scale height of $H_\sigma = 6 \text{ km}$ is adopted. In a vertically uniform atmospheric column, current conservation (6) then leads to the electric-field profile of Equation (7). Through Gauss law, the corresponding diagnostic space charge density is given by Equation (8).

$$\vec{\nabla} \cdot [\sigma(x, z) \vec{\nabla} V(x, z)] = 0 \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{air}}(z) = \sigma_0 \exp\left(\frac{z}{H_\sigma}\right) \quad (5)$$

$$J_z(z) = \sigma(z) \cdot E_z(z) = J_{0,atm} \quad (6)$$

$$E_z(z) = -E_{0,\text{atm}} \exp\left(-\frac{z}{H_\sigma}\right) \quad (7)$$

$$\rho(z) = \varepsilon_0 \frac{dE_z}{dz} = -\varepsilon_0 \frac{E_z(z)}{H_\sigma}. \quad (8)$$

The space charge density $\rho(z)$ is not explicitly solved. Instead, $\sigma(z)$ is prescribed and the solver remains purely ohmic and pre-corona. For storm-like surrogate cases, the same form is considered although the magnitudes of $|E_{0,\text{atm}}|$, $|J_{0,\text{atm}}|$ and σ_0 are increased to match the idealized values in the “storm-like” regime. The solid regions are air with $\sigma_{\text{air}}(z)$ given by Equation (5), wood supports with $\sigma_{\text{wood}} \approx 10^{-15} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (strongly insulating but not perfectly) and metal conductor: $\sigma_{\text{metal}} = 1 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Owing to this strong conductivity mismatch, the metallic structure is treated as a single floating conductor with an effectively uniform internal potential.

2.3. Geometry and computational domain

The problem is solved in two dimensions over $x \in [-0.4, 2.0] \text{ m}$ and $z \in [0.0, 4.0] \text{ m}$ on a uniform grid of $N_x = 6000$, $N_z = 10\,000$ nodes ($\Delta x = \Delta z = 400 \text{ }\mu\text{m}$). This 2D formulation represents an infinitely long structure in the out-of-plane direction; results are therefore cross-sections with unit depth.

The Bertholon-type apparatus is modeled as shown in Figure 2b. A vertical wooden mast, 2.0 m high and 0.15 m wide, forms the central support. A short horizontal wooden element is placed at $z = 1.5 \text{ m}$ and two wooden feet, each 0.5 m high and 1.5 cm thick, provide support at ground level beneath the conductor. The metallic conductor is represented by an L-shaped structure with triangular tips. At the top, a 0.30-m-high, 0.02-m-wide triangular tip located at $z = 2.2 \text{ m}$ serves as the upper single-point collector, with an apex angle of 4° . From the base of this tip, a vertical metallic segment extends 1.70 m downward with a thickness of 0.02 m. This segment connects to a horizontal arm 1.50 m long positioned approximately 0.5 m above the ground. At the end of this arm, a terminal crown composed of five triangular points (each 0.30 m high and 0.02 m at the base) is arranged with angular orientations of -40° , -20° , 0° , $+20^\circ$ and $+40^\circ$ relative to the vertical. This stylized geometry corresponds to sharp apex radii of order 1 mm.

2.4. Boundary conditions and numerical implementation

The top and bottom boundaries enforce the imposed vertical current density $J_{0,\text{atm}}$ following Equations (9) and (10) while lateral boundaries are symmetric, as expressed by Equation (11).

$$\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{J_{0,\text{atm}}}{\sigma(0)} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right|_{z=H} = -\frac{J_{0,\text{atm}}}{\sigma(H)} \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{\text{left/right}} = 0. \quad (11)$$

One air node is fixed at $V = 0$ to set the reference potential. This choice enforces the column current but does not impose a perfectly equipotential Earth at $z = 0$; near-ground potentials can therefore vary horizontally, an approximation acceptable here but not exact.

The governing Equation (2) is discretized on a two-dimensional five-point finite-difference stencil. To ensure continuity of the current density across sharp changes in conductivity, the conductivity at each cell face is computed with Equation (12) which provides the harmonic mean between adjacent cells. This averaging scheme preserves flux conservation and numerical stability

in regions where materials of very different conductivities meet (e.g., air/wood or air/metal interfaces). The resulting discrete system is solved by Jacobi relaxation, in which the potential at the node (i, j) is updated iteratively according to Equation (13) with boundary updates and gauge enforcement after each sweep.

$$\sigma_{\text{face}} = \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2 + \varepsilon} \quad (12)$$

$$V_{i,j}^{(n+1)} = \frac{\sigma_e V_{i,j+1} + \sigma_w V_{i,j-1} + \sigma_n V_{i+1,j} + \sigma_s V_{i-1,j}}{\sigma_e + \sigma_w + \sigma_n + \sigma_s}. \quad (13)$$

Initialization uses the analytic fair-weather profile in Equation (14) and metal regions are seeded with the average potential of neighbouring air cells. Iterations stop once Equation (15) is satisfied or when 2000 iterations are reached. This criterion yields good agreement with the 1D analytic column and current conservation (top vs bottom flux differ by <0.01%), but peak fields remain somewhat sensitive to grid resolution and tip geometry. They should be interpreted as approximate pre-corona values rather than fully converged quantities. Iterations continue until the maximum change in V between two successive steps falls below a prescribed tolerance, ensuring convergence of the electrostatic potential field.

$$V^{(0)}(z) = E_{0,\text{atm}} H_\sigma \left(1 - e^{-\frac{z}{H_\sigma}}\right) \quad (14)$$

$$\text{Max}|V^{(n+1)} - V^{(n)}| < 10^{-3}. \quad (15)$$

Electric field and current density are computed after convergence using centered finite differences. The horizontal and vertical components of the electric field follow directly from the potential gradients (Equations (16), (17)) and the field magnitude is obtained from Equation (18). The current-density components are then derived from Ohm's law (Equations (19), (20)) using the local conductivity and the total current-density magnitude is computed from Equation (21). These quantities are visualized in units of $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ for the electric field and $\text{pA}\cdot\text{m}^{-2}$ or $\text{nA}\cdot\text{m}^{-2}$ for the current density, with solid regions masked.

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad (16)$$

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (17)$$

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_z^2} \quad (18)$$

$$J_x = -\sigma \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \quad (19)$$

$$J_z = -\sigma \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \quad (20)$$

$$|J| = \sqrt{J_x^2 + J_z^2}. \quad (21)$$

2.5. Mesh and convergence

To verify that the reported results are not sensitive to the grid spacing, a mesh-refinement study has been performed using five successively refined meshes (Figures 3a, 2b–f) while keeping the physical domain size and all model parameters unchanged. For each mesh, the key quantities discussed in the manuscript are monitored: (i) the floating potential of the metallic structure V_{cond} , (ii) the maximum electric field magnitude in air E_{max} and (iii) the maximum current density in air J_{max} . Since the field at an idealized sharp apex may exhibit mesh-dependent amplification, near-tip values were evaluated either (i) after excluding the metal region and its immediate neighboring cells, or (ii) at a fixed physical distance above the apex (e.g., 5–10 mm),

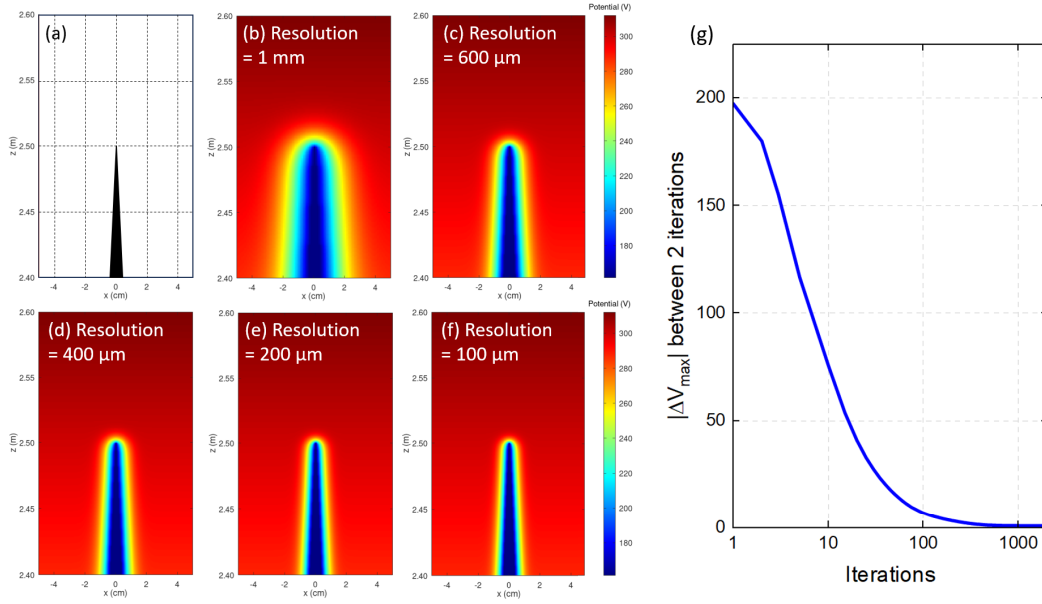


Figure 3. (a) Zoomed view of the modeled tip geometry (black) in the (x, z) plane. (b–f) Computed potential distribution $V(x, z)$ in the air around the tip in fair weather conditions, and for progressively finer spatial resolutions (1 mm, 600 μm , 400 μm , 200 μm and 100 μm). As the grid is refined, the representation of the tip and the associated near-tip potential gradients become sharper; the potential pattern changes markedly from 1 mm to 400 μm , while the 200 μm and 100 μm results are visually very similar, indicating grid-independence at these resolutions. (g) Convergence of the iterative solver for a 400 μm resolution: the maximum absolute change in potential between two successive iterations decreases monotonically with iteration number, showing rapid initial reduction followed by a slower asymptotic approach to a converged solution.

which provides a mesh-consistent diagnostic. The differences between the baseline (Resolution = 400 μm) and fine meshes were below 6.5% for V_{cond} , 4.8% for E_{max} , and 4.9% for J_{max} , indicating mesh independence within the accuracy required for the present pre-corona, ohmic upper-bound analysis. In addition, the iterative solver is run until the maximum change in potential between two successive iterations satisfied $\Delta V_{\text{max}} = \max |V^{(n)} - V^{(n-1)}| < 5 \text{ V}$, ensuring numerical convergence on each mesh, as supported in Figure 3g.

3. Results

3.1. Fair-weather (“sunny”) conditions

Here, we examine Configuration I of the electrovegetometer (Figure 1a), which consists of a conductive L-shaped structure combining a single-point collector at the upper extremity with a five-point crown near ground level. The response of this geometry is evaluated under fair-weather forcing, characterized by an imposed downward conduction current $J_{0,\text{atm}} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$ and a background electric field $E_{0,\text{atm}} \approx -120 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ applied at the lower boundary.

The steady-state potential, electric-field magnitude and current-density magnitude in the vicinity of the upper single-point collector are shown in Figure 4. Figure 4a illustrates that the atmospheric potential ranges from approximately 260–305 V over the vertical extent of the domain. Near the metallic point, the potential drops sharply to ≈ 260 –265 V, whereas the surrounding air at the same altitude lies around 290–300 V. This 30–40 V lateral depression is tightly confined to a region only a few millimeter wide, forming a narrow potential funnel aligned

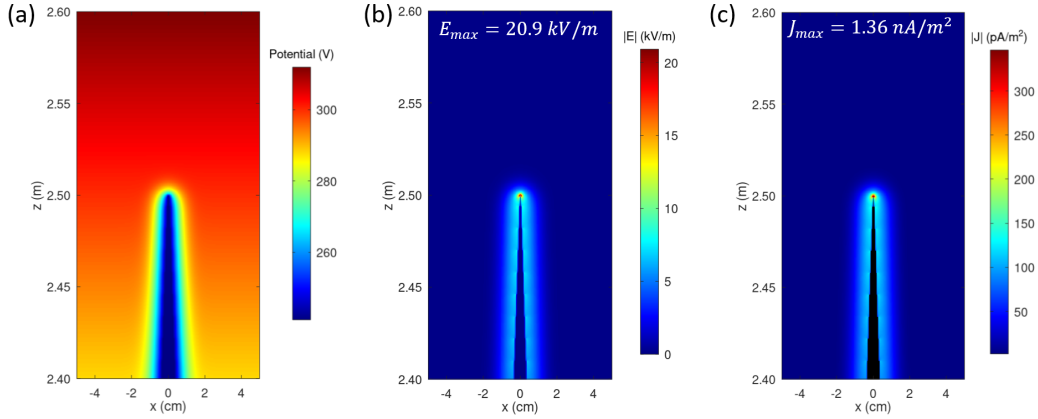


Figure 4. Pre-corona response of the upper single-point rod collector (apex angle $\theta = 4^\circ$) under fair-weather forcing ($E_{0,\text{atm}} \approx -120 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, $J_{0,\text{atm}} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$). (a) Steady potential V showing strong equipotential compression near the floating metal apex. (b) Electric-field magnitude $|E|$ with geometric enhancement to $E_{\max} = 20.9 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. (c) Current-density magnitude $|J|$ peaking at $J_{\max} = 1.36 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ and relaxing to the background within centimeters.

with the tapered geometry of the rod. Because the conductor is electrically floating, its potential ($\approx 240 \text{ V}$ at the base of the point) emerges self-consistently as the value required to satisfy the imposed column current. Outside the immediate tip region, equipotential contours relax back to their nearly uniform fair-weather spacing.

Figure 4b reveals the resulting electric-field enhancement. The gradient associated with the 30–40 V drop over sub-centimeter distances produces local fields exceeding $20 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ with the simulation giving a peak value of $E_{\max} = 20.9 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. This corresponds to an enhancement factor of roughly:

$$\frac{E_{\max}}{|E_{0,\text{atm}}|} \approx \frac{2.1 \times 10^4}{1.2 \times 10^2} \sim 175.$$

This value is purely due to geometric concentration at the apex. The elevated field decays rapidly: within 1 cm of the tip it falls to the kV/m range and within a few centimeters it returns to ambient fair-weather values.

Figure 4c shows the associated current-density magnitude. The strongest currents are confined to a narrow axial plume emerging from the single-point rod, with a peak of $J_{\max} = 1.36 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$. This value is consistent with Ohm's law $J = \sigma E$, using the local fair-weather surface conductivity $\sigma_0 \approx 1.7 \times 10^{-14} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Although small in absolute terms, such a current corresponds to a microscopic flux of:

$$\dot{N} \approx \frac{J_{\max}}{e} \approx 8 \times 10^9 \text{ charges}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pm}^{-2},$$

showing that even nanoampere currents involve billions of charge carriers per second. As expected in the ohmic, pre-corona regime, the spatial pattern of $|J|$ mirrors that of $|E|$ and merges smoothly into the background atmospheric current $J_{0,\text{atm}} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$ over centimeter scales.

The steady-state potential, electric-field magnitude and current-density magnitude surrounding the lower multi-point crown are represented in Figure 5. On the scale of the entire crown (Figure 5a), each of the five metallic points produces a distinct depression in the potential field. These local “funnels”, typically 20–40 V deeper than the surrounding air at the same height, merge into a single broader perturbation a few centimeters away from the crown. The zoom near the central point (Figure 5b) shows a narrow, vertically elongated potential channel whose minimum

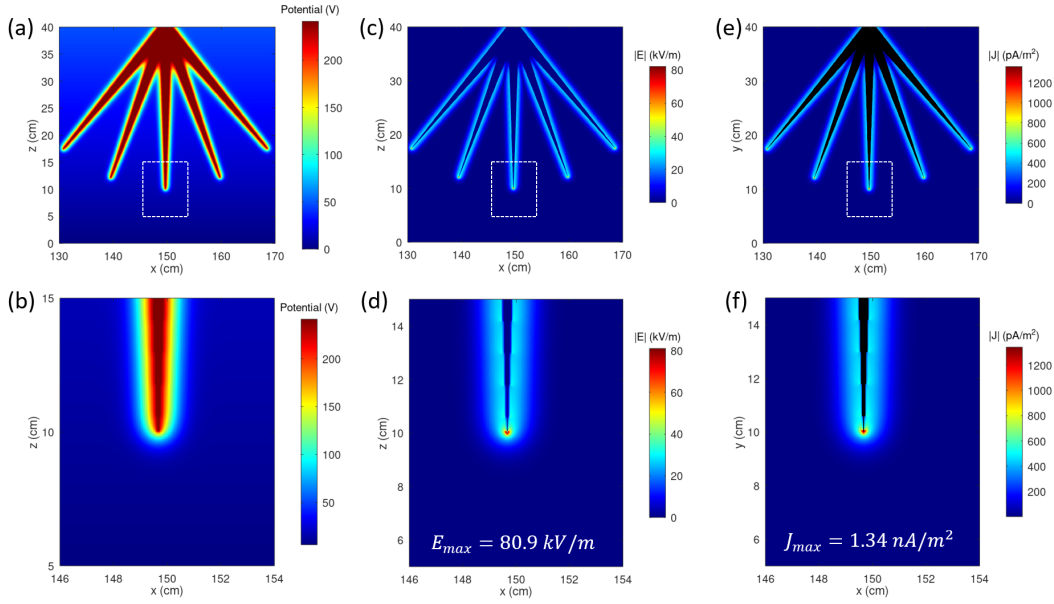


Figure 5. Pre-corona response of the lower five-point crown under fair-weather forcing ($E_{0,\text{atm}} \approx -120 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, $J_{0,\text{atm}} \approx -2 \text{ pA}\cdot\text{m}^{-2}$) with apex angle $\theta = 4^\circ$. (a,b) Potential V showing local depressions around each apex and a narrow, deep potential funnel at the central tip. (c,d) Electric-field magnitude $|E|$ forming five interacting high-field lobes, with a localized maximum $E_{\text{max}} = 80.9 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. (e,f) Current-density magnitude $|J|$ revealing five focused conduction channels and a peak $J_{\text{max}} = 1.34 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$. All values remain within the linear, conduction-dominated regime.

lies around 250–260 V, corresponding to a lateral potential drop of 30–40 V over millimeter-to-centimeter scales. This results from both the sharp curvature of the central apex and the lateral confinement imposed by neighboring points of the crown.

The electric-field magnitude (Figure 5c and especially 5d) exhibits five distinct high-field lobes, one per apex. Their superposition forms a structured envelope rather than an isolated maxima, reflecting strong inter-point interactions. Within the central zoom (Figure 5d) the field reaches $E_{\text{max}} \approx 80.9 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, nearly 700 times the ambient fair-weather field. This field drops to a few kV/m within about 1 cm, returning to near-ambient values within several cm. The enhancement remains at least one order of magnitude below typical corona-onset thresholds for sharp conductors at ground pressure, confirming operation in the pre-corona, ohmic regime.

The current-density maps (Figure 5e,f) indicate the structure of the electric field. Each point of the crown generates a narrow current plume that diffuses downward and merges with the background conduction current. The central apex again produces the highest value, $J_{\text{max}} \approx 1.34 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ which corresponds to a microscopic flux similar to that estimated at the single-point rod collector, i.e. $\dot{N} \approx 8 \times 10^9 \text{ charges}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Because the conductivity varies only weakly within the 5–15 cm region surrounding the crown, the structure of $|J|$ is governed almost entirely by geometric field shaping rather than atmospheric stratification.

Under fair-weather forcing, all simulated fields remain well below air-breakdown thresholds, confirming operation in a linear, ohmic pre-corona regime. Field enhancement arises solely from geometric concentration at the metallic points, producing smooth, monotonic patterns of electric field and current density consistent with $J = \sigma E$. These results define a quantitative baseline for potentials, enhancement factors and conduction plumes, against which stronger

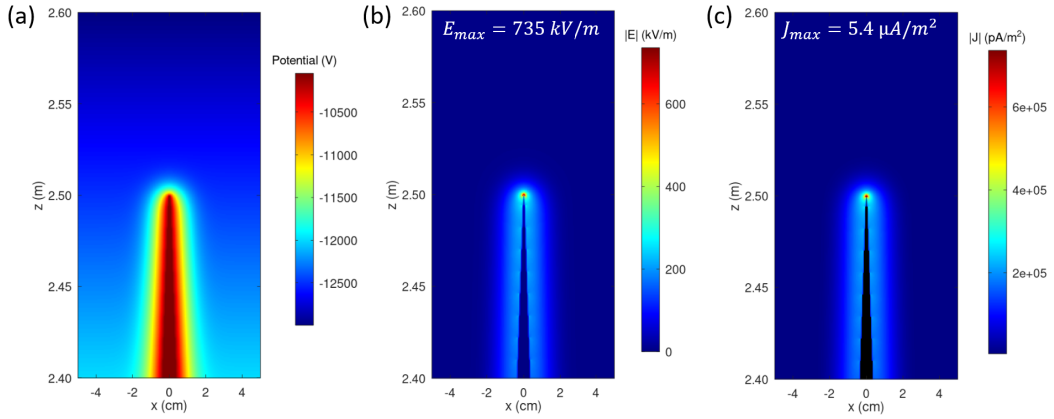


Figure 6. Response of the single-point rod collector under idealized storm-like forcing ($E_{0,\text{atm}} \approx 5 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, $J_{0,\text{atm}} \approx 5 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$). (a) Steady potential V showing deep compression of equipotentials near the floating metal apex. (b) Electric-field magnitude $|E|$ reaching $E_{\text{max}} = 735 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, approaching empirical corona-onset ranges. (c) Current-density magnitude $|J|$ peaking at $J_{\text{max}} = 5.4 \text{ }\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$. Values represent pre-corona upper bounds within the linear, space-charge-free model.

forcing can be compared. We now examine how the geometry responds under idealized storm-like conditions, where ambient fields increase dramatically.

3.2. Stormy weather conditions

The response of the upper single-point rod is studied under an idealized storm-like forcing, using the parameters of Table 2. The background electric field is increased to $E_{0,\text{atm}} \approx 5000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ and the imposed conduction current reverses direction, reaching $J_{0,\text{atm}} \approx +5 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$. This configuration provides a linear surrogate for storm-enhanced fields without explicitly modelling cloud charge, space charge or the three-dimensional electrostatic structure of thunderclouds. As a consequence, the fields obtained near the points represent the upper bounds of the pre-corona state; a real atmosphere would transition to space charge dominated corona before such fields are maintained.

Figure 6 shows the steady potential, electric-field magnitude and current-density magnitude around the upper tip for this storm-like scenario. The potential well around the apex (Figure 6a) is significantly deeper and more compressed than under fair weather, reflecting both the stronger forcing and the higher upward current. Local potential near the single point apex falls below -12 kV , compared with the -260 V range seen previously, indicating an order-of-magnitude intensification of the gradients. The resulting electric field (Figure 6b) reaches a peak of $E_{\text{max}} \approx 735 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ localized to a sub-centimeter region. This value is still below canonical breakdown estimates for air at ground pressure ($\sim 2.5\text{--}2.8 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$) but it falls within the lower range of empirical corona-onset measurements for sharp conductors under humid or pre-storm conditions. Within 1 cm of the apex, the field drops to a few hundred kV/m and returns to background values within a few centimeters, preserving the strongly localized enhancement pattern observed in fair weather.

The corresponding current-density magnitude (Figure 6c) peaks at $J_{\text{max}} \approx 5.4 \text{ }\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ consistent with the scaling $J = \sigma E$, given the elevated conductivity at the tip altitude. This represents an increase of nearly three orders of magnitude relative to fair-weather values ($\sim 1.36 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$), yet the spatial structure remains a narrow axial plume diffusing smoothly into the background upward current.

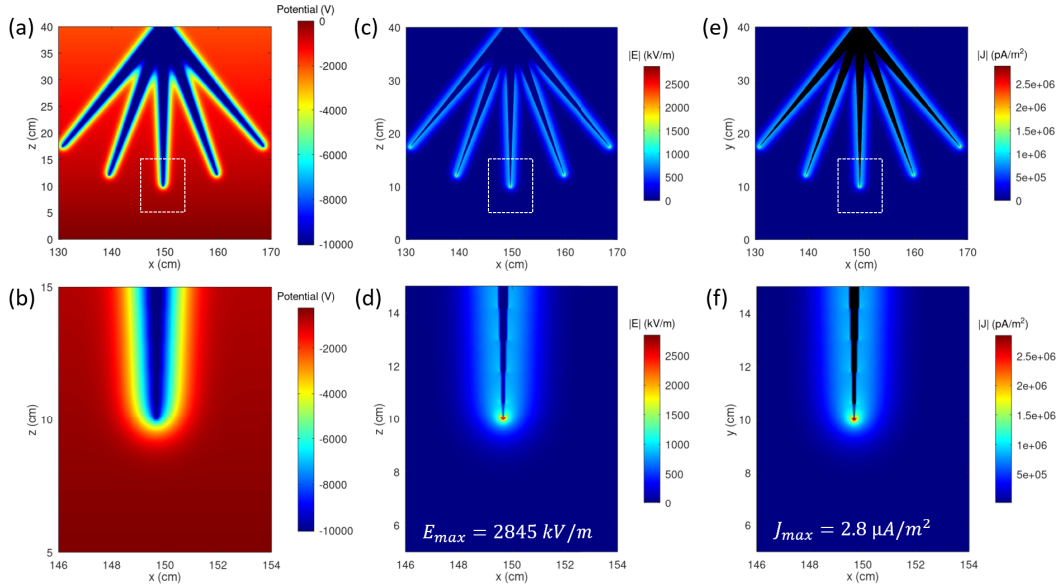


Figure 7. Response of the lower five-point crown under idealized storm-like forcing ($E_{0,\text{atm}} \approx 5 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, $J_{0,\text{atm}} \approx 5 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$) with apex angle $\theta = 4^\circ$. (a,b) Potential V showing a deeply collapsed well and strong confinement of equipotentials around each apex. (c,d) Electric-field magnitude $|E|$ with a localized maximum $E_{\text{max}} = 2.84 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$, approaching empirical breakdown ranges. (e,f) Current-density magnitude $|J|$ peaking at $J_{\text{max}} = 2.8 \text{ }\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$. These values represent upper-bound, pre-discharge fields within the linear, space charge free model.

Despite the large absolute fields and currents, the computed solution retains the qualitative signature of a linear conduction regime: equipotential surfaces continue to converge monotonically, $|E|$ increases smoothly toward the apex and no field clamping or plateau forms. This behaviour indicates that, within the limitations of a space charge free model, the system remains mathematically ohmic even at intensities where a real atmosphere would have already initiated corona. The results should therefore be interpreted as a near-threshold pre-corona state, with physical discharge onset inferred from external criteria, not from deviations within the simulated fields.

The response of the five-point crown distributor under storm-like forcing is shown in Figure 7. Compared with the fair-weather case, the stronger background field and reversed conduction current produce a markedly deeper and more confined potential well around each apex. On the scale of the full crown (Figure 7a), equipotential surfaces collapse tightly around all five metallic points, with local potentials in the zoom region (Figure 7b) falling to around -10 kV . As in the previous single-point rod, these minima form narrow, vertically elongated channels, but the lateral confinement imposed by neighbouring peaks sharpens the gradients even further.

The corresponding electric-field magnitude (Figure 7c,d) displays a set of 5 high-field lobes. Their superposition produces a structured envelope of enhanced field, with the central peak reaching $E_{\text{max}} \approx 2845 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. This value is roughly 40 times larger than the storm-like single-point rod maximum and lies squarely within the empirical breakdown range for humid air at ground level. It also exceeds typical diffuse-corona onset estimates for sharp conductors. Because the model is strictly linear and excludes space-charge or ionization processes, these simulated fields should be interpreted as upper bounds on the pre-discharge state; a real atmosphere would begin corona formation and field clamping before such values were sustained. Spatially,

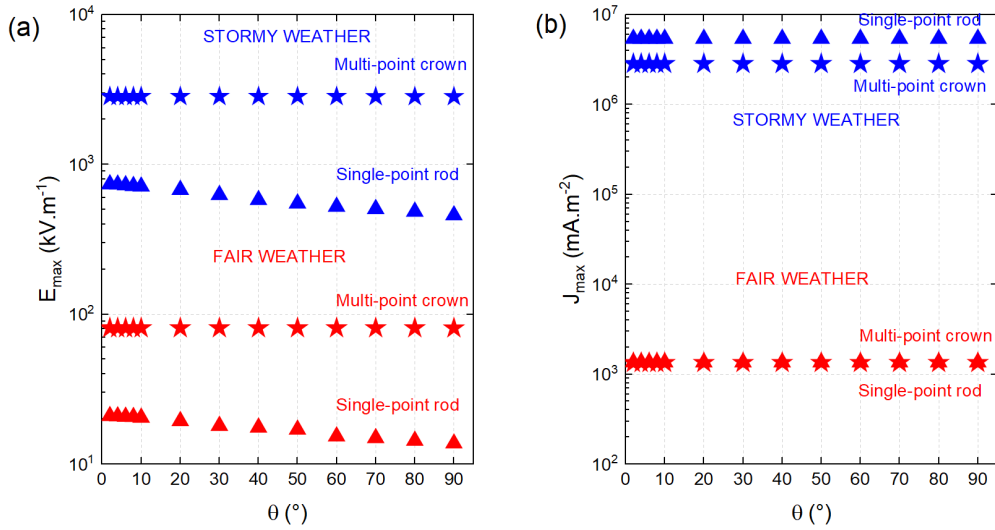


Figure 8. (a) Maximum electric field $E_{\max}$ and (b) current density $J_{\max}$ as functions of apex angle for the upper single-point rod (θ), under fair-weather (red) and storm-like (blue) forcing. Fair-weather values show weak dependence on tip geometry, whereas storm-like conditions produce strong geometric amplification. The lower crown achieves the highest fields ($2.8 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$) and currents ($5 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$), representing upper-bound pre-discharge estimates in the linear ohmic model.

the enhancement remains confined to a sub-centimeter region around the apex, decaying to the 100-of-kV/m range within ~ 1 cm and to background levels within a few centimeters.

The current-density maps (Figure 7e,f) reproduce this structure. A sharply focused axial jet emerges from each point, with the central one producing $J_{\max} \approx 5.4 \text{ }\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$, over three orders of magnitude above its fair-weather counterpart and consistent with the elevated $E_{\max}$ through $J = \sigma E$. Although extremely large for a conduction-only model, the spatial pattern remains smooth and monotonic, without the field clamping or non-linear features that would accompany real corona onset.

Taken together, these results show that the multi-point crown acts as an exceptionally efficient field concentrator under storm-like forcing, much more so than the upper single-point collector. However, because the model neglects space charge, ionization and discharge physics, the predicted MV/m-scale peaks represent idealized upper limits rather than realistic operational values; in practice, corona, streamer activity and associated charge regulation would intervene well before the simulated fields could be reached.

3.3. Influence of apex angle

To evaluate the sensitivity of the electrovegetometer response to the sharpness of Bertholon's upper collector, a parametric sweep is achieved for different values of the apex angle θ of the single-point rod, keeping all other geometric and atmospheric parameters unchanged. The angle θ is defined here as the full opening angle of the triangular tip in the 2-D configuration (Figure 2b). Values from 2° to 90° (blunt, right-angle wedge) were explored. For each θ , the maximum electric-field magnitude ($E_{\max}$) is extracted from the air adjacent to the upper tip and to the lower crown. Besides, the maximum conduction current density ($J_{\max}$) is also extracted in those same regions. The results are summarized in Figure 8.

Figure 8a shows that the peak field near the single-point rod decreases monotonically as the tip is blunted. Under fair-weather forcing (red triangles), $E_{\max}$ drops from roughly 20 kV/m for

very sharp apices to 13 kV/m at 90°. The dependence is smooth and relatively weak: over the entire 0–90° range, the variation remains within a factor $\lesssim 1.5$. The same trend holds under storm-like forcing (blue triangles), with $E_{\max}$ decreasing from 800 kV/m for acute tips to 450 kV/m for the bluntest wedge. Thus, sharpening the apex enhances the local field, but only at the tens-of-percent level for realistic angles. This mild angular sensitivity is expected in a floating-conductor configuration dominated by large-scale column forcing: changing θ modifies the local curvature, hence the geometric amplification factor, but the overall potential of the metal adjusts self-consistently to satisfy the imposed atmospheric conduction current. In other words, the tip sharpness controls how a nearly fixed potential drop is concentrated into millimeter–centimeter gradients, rather than changing the global voltage available to the structure.

For comparison, Figure 8a also reports the maximum field at the five-point crown (stars). In both atmospheric regimes, the crown peak field remains essentially constant as θ varies. Under fair weather, it stays near 80 kV/m and under storm-like forcing near 2700–3000 kV/m. This insensitivity indicates that the lower crown is controlled almost entirely by its own apex geometry and by the ambient forcing, with only negligible coupling to the sharpness of the distant upper collector. Practically, this means that uncertainties in the historical manufacturing of the top point do not propagate into the near-canopy field enhancement produced by the terminal crown.

The corresponding maxima in conduction current density is shown in Figure 8b. As predicted by the ohmic relation, $J_{\max}$ near the upper tip follows the same monotonic decrease with θ as $E_{\max}$. In fair weather (red triangles), the peak current density decreases gently (again by less than a factor of two) between sharp and blunt apices. In storm-like conditions (blue triangles) the same reduction occurs, but at values that are three orders of magnitude higher than in fair weather, reflecting the imposed increase in both background field and conductivity. As for the electric field, the crown current maxima (stars) are essentially flat with θ , confirming that the lower distributor behaviour is decoupled from the collector sharpness in this pre-corona regime.

An additional feature of Figure 8b is that, under storm-like forcing, the upper tip exhibits a larger $J_{\max}$ than the crown even though the crown reaches a higher $E_{\max}$. This reversal arises from conductivity stratification: the upper collector operates at a higher altitude where $\sigma(z)$ is larger, so a given field produces a proportionally larger conduction current. In contrast, the stronger field of the crown sits in a lower- σ layer and therefore carries a smaller ohmic current density despite its higher geometric amplification.

Altogether, the apex-angle sweep shows that the pre-corona predictions for the upper collector are robust to plausible uncertainties in tip sharpness. Whether the 18th-century metal point was needle-sharp or moderately blunt changes $E_{\max}$ and $J_{\max}$ only by a modest factor, rather than by orders of magnitude. Therefore, the qualitative conclusions drawn from the baseline $\theta = 4^\circ$ geometry (namely that fair-weather operation remains safely sub-coronal while storm-time forcing can push the tip toward onset ranges) do not depend critically on an exact reconstruction of point shape. The strong enhancement produced by the multi-point crown, on the other hand, is governed by the crown's own sharpness and spacing and is effectively independent of the collector angle. Finally, it should be recalled that these angular trends are obtained in a 2-D wedge approximation. A fully 3-D conical tip would yield different absolute amplification factors, but the monotonic, weak sensitivity to θ is expected to persist, since it reflects the floating-potential adjustment and the localization of the potential drop rather than any peculiarity of the 2-D geometry.

3.4. Influence of conductor geometry

Configuration I of the electrovegetometer appears effective under storm-time conditions but essentially inactive in fair weather. To explore whether alternative geometries could improve

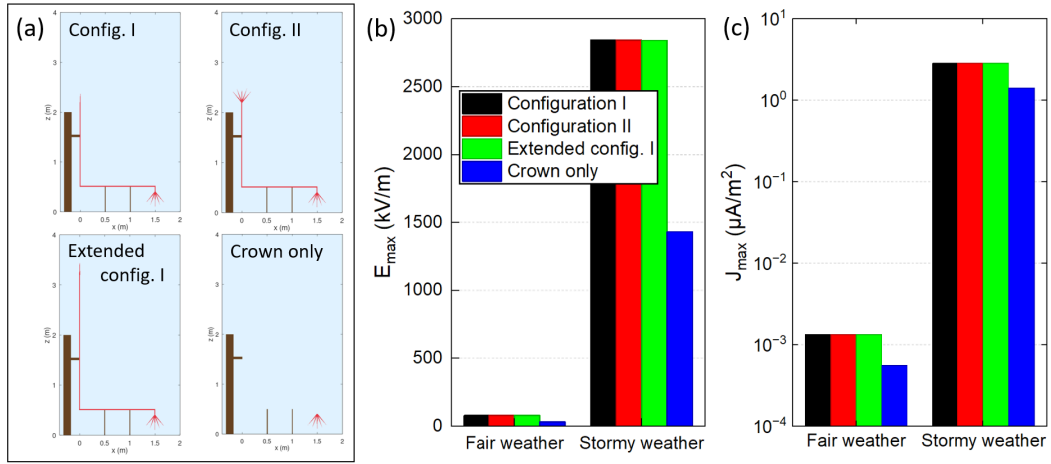


Figure 9. (a) Four distinct geometries of the electrovegetometer used in the simulations. Brown regions denote wooden supports, red lines metallic conductors. (b) Maximum electric field at the lower crown distributor, $E_{\max}$, under fair-weather and storm-like forcing, showing that all mast-bearing configurations produce similar peak fields while the crown-only case remains lower in the storm regime. (c) Corresponding maximum conduction current density, $J_{\max}$, on a logarithmic scale, illustrating the three-order-of-magnitude increase from fair to storm conditions and the enhanced currents obtained when an elevated metallic mast is present.

its fair-weather response, four variants of the conductor's layout were examined, as sketched in Figure 9a:

- The configuration I with single-point rod collector and crown distributor.
- The configuration II: the single upper point is replaced by a small crown of sharp tips mounted at the mast head, while the lower distributor remains unchanged.
- The extended configuration I: it retains a single upper point but extends the metallic mast by approximately 1 m, so that the tip now protrudes higher into the atmospheric column. The lower crown and supports are unchanged. This configuration does not correspond to a specific historical drawing but serves to test the sensitivity of the device to collector height and to the associated changes in background potential and conductivity.
- The isolated crown configuration: the entire metallic mast-arm assembly is removed so as to leave only the five-point crown at canopy height. This “minimal” configuration provides a control case in which the crown interacts directly with the ambient field without any guidance or concentration by an elevated conductor.

For the four configurations, the maximum electric field values obtained at the lower crown are presented in Figure 9b under fair-weather and storm-like forcing. In fair weather, all configurations yield nearly identical peak fields of order 10^2 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$, indicating that the local crown geometry dominates field enhancement and that the presence, shape or height of the upper collector has only a minor influence in the weak-field regime. Under storm-like forcing, however, the three mast-bearing configurations (I, II and extended-I) all reach comparable peak fields of about $2.5\text{--}3 \times 10^3$ $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$, whereas the crown-only configuration remains significantly lower (roughly one half of that value). This contrast shows that the elevated metallic mast efficiently funnels the storm-enhanced column potential into the crown region, but that replacing a single-point collector with a multi-point collector or modestly extending its height does not materially change the local maximum field at the distributor.

The corresponding maxima in conduction current density, $J_{\max}$, are shown in Figure 9c on a logarithmic scale. In fair-weather conditions, all four configurations cluster around

$J_{\max} \approx 10^{-3} \mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$, confirming that the weak, sub-coronal currents are essentially set by the ambient atmospheric conduction current and by the crown geometry. When storm-like forcing is applied, $J_{\max}$ increases by nearly three orders of magnitude, reaching a few $\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ for the three mast-bearing configurations, while the crown-only case again remains lower by about a factor of two. The parallel behaviour of $E_{\max}$ and $J_{\max}$ across the four configurations is consistent with the ohmic scaling $J = \sigma E$ and confirms that the main role of the mast and upper collector is to increase the amount of background current intercepted and channelled through the crown, rather than to introduce strong qualitative differences between the specific collector designs.

4. Discussion

The simulations presented above provide a first quantitative bridge between Bertholon's qualitative description of his electrovegetometer and modern concepts of the global atmospheric electric circuit and pre-corona field enhancement. Several points emerge regarding (i) the physical plausibility of Bertholon's original narrative, (ii) the expected magnitude and localisation of electrical effects near the canopy and (iii) the limitations of the present modelling framework and its implications for both historical interpretation and modern “electroculture” claims.

4.1. Fair-weather operation: localized but modest enhancement

Under fair-weather forcing, the reconstructed electrovegetometer behaves as a weak perturbation of the global conduction current. The upper collector and lower crown both generate strong local field enhancements (by two to three orders of magnitude relative to the ambient $\approx 10^2 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ field) but these enhanced regions remain confined to millimeter–centimeter neighbourhoods around the tips. The single upper point concentrates the background potential drop into a narrow funnel and attains peak fields of order a few $\times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, while the five-point crown reaches about $8 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ near the central apex.

From a purely electrodynamic standpoint, these fields are high enough to significantly distort ion trajectories and to locally increase ionisation and attachment rates, if the atmosphere is already weakly ionised. However, the associated ohmic current densities remain in the $\text{pA}\cdot\text{m}^{-2}$ to low- $\text{nA}\cdot\text{m}^{-2}$ range, only moderately above the background conduction current. The total current that can be channelled through a realistic crown footprint therefore remains extremely small.

For the plant microenvironment, this implies that, in undisturbed weather, the device could plausibly create narrow “hot spots” of enhanced field and ion flux immediately around each tip, but these perturbations would decay to near-background values over distances comparable to or smaller than, typical leaf and canopy length scales. Any direct electrodynamic forcing on plant tissue (through induced surface charges, field-driven ion flows at the leaf boundary layer or modification of aerosol deposition patterns) would thus be highly localised and likely intermittent.

Consequently, the fair-weather regime appears compatible with Bertholon's qualitative idea of a continuous but “gentle” influence of atmospheric electricity, yet the present results suggest that this influence is physically subtle: the electrovegetometer does not act as a strong injector of charge or as a significant sink/source in the global circuit. Rather, it reshapes the local pre-existing conduction current into narrow plumes without greatly increasing its magnitude.

4.2. Storm-time forcing and the plausibility of luminous “aigrettes”

Under idealised storm-like forcing, the same geometry operates in a very different regime. When the background field and conductivity are increased to values representative of pre-storm or

storm-affected conditions, the upper point and lower crown can reach peak electric fields ranging from several $10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ up to the $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ scale in the linear model. These levels are comparable to or exceed, empirical corona-onset thresholds for sharp conductors at ground pressure and approach conventional breakdown estimates.

It is important to emphasise that, because the model neglects space charge and ionisation feedback, these $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ -scale values should be interpreted as *upper bounds* on the pre-corona state rather than as realistic sustained fields: in a real atmosphere, corona would be triggered earlier and the resulting space charge would partially screen the tips, limiting further field growth. Nonetheless, the fact that the ohmic pre-corona solution naturally approaches corona-onset thresholds under enhanced GEC forcing is significant. It provides a quantitative rationale for Bertholon's reports of faint luminous glows ("aigrettes lumineuses") at the points under disturbed weather and for historical observations of St Elmo's fire on ship masts and church spires.

In this picture, the electrovegetometer can act as a facilitator for corona discharges during periods when the atmospheric column is already highly stressed by nearby storm charge. The elevated mast ensures that the upper collector samples a region of slightly higher conductivity and potential, while the lower multi-point crown concentrates this potential drop at canopy height. The simulations show that storm-time currents may increase by roughly three orders of magnitude compared with fair weather while retaining smooth, monotonic conduction-like profiles around the tips. Once corona onset is reached, ion production and charge transport near the canopy could be substantially greater than in the fair-weather regime, potentially producing visible glows and enhanced ion fluxes.

However, this enhanced operation would remain episodic, tied to the presence of nearby electrified clouds and may not correspond to the benign, steady-state "improvement" of vegetation that Bertholon had in mind. Moreover, corona can produce localised chemical and mechanical stresses (ozone, NO_x , UV, micro-scale heating and ion-wind shear) whose impacts on plants are complex and not necessarily beneficial. The present model cannot address these aspects and thus cannot directly support or refute any claimed agronomic benefits of storm-time operation.

4.3. *Robustness to geometric uncertainties and the role of the mast*

The parametric sweeps indicate that several aspects of the device response are relatively robust to historical uncertainties in geometry. Varying the apex angle of the upper collector over a wide range only alters the maximum field and current density near the tip by factors of order unity, not by orders of magnitude. This reflects the fact that the global potential available to the floating structure is set by the imposed atmospheric column, while the tip sharpness controls how that potential drop is localized on millimeter scales. Likewise, replacing the single upper point with a small crown or extending the mast modestly, barely affects the peak fields at the lower crown in either fair or storm-like conditions. The simulations show that, in the storm regime, all mast-bearing configurations (Configurations I, II and extended-I) yield similar E_{max} and J_{max} at the canopy-level crown, whereas an isolated crown with no mast reaches significantly lower maxima. This suggests that the primary electrodynamic role of the mast is to intercept an enhanced portion of the background column current and potential, funnelling it into the distributor, rather than to sensitively encode the details of the collector design.

From a historical reconstruction perspective, this is reassuring: even if Bertholon's actual hardware deviated from the stylised geometry used here, the qualitative conclusions about fair- versus storm-time operation, localisation of fields and the relative importance of collector versus distributor are unlikely to change drastically. The multi-point crown near the crop canopy emerges as the dominant feature for local field enhancement, while the mast and collector primarily set the voltage "voltage" delivered to it.

4.4. *Limitations of the present model*

Despite its usefulness as an exploratory tool, the present 2-D, linear, ohmic model has several important limitations that constrain the interpretation of the results:

- The model assumes a prescribed conductivity profile and linear Ohm's law, with no explicit treatment of charge production, attachment, recombination or drift beyond what is encoded in $\sigma(z)$. Once fields approach corona-onset thresholds, this approximation breaks down. The simulated peak fields in the storm-like regime should therefore be viewed as indicative of where onset is likely, not as literal predictions of sustained $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ values.
- The cross-sectional configuration of the electrovegetometer represents an infinitely long structure, leading to wedge-like tips rather than realistic 3-D conical points. This affects local amplification factors and field line topology near the apices. A full 3-D simulation would likely yield different absolute E_{max} values and possibly broader high-field regions, though the basic trends (localised enhancement, decimetric decay to background, relative insensitivity to the collector apex angle) should remain qualitatively similar.
- The wooden supports are modelled with fixed, low conductivities and the soil is treated implicitly through boundary conditions rather than as a stratified, moisture-dependent conductor. In practice, however, Bertholon devoted considerable attention to improving insulation: the buried mast section was fire-dried, tarred, wrapped in charcoal dust and cement, then set in masonry, while the above-ground part was painted or bitumen-coated; the mast head was further protected by resin-saturated inserts and glass/mastic sleeves and the horizontal arms were carried on insulated trestles with silk cords (Table 1). These measures likely reduced leakage and increased support resistance, yet their properties still depended on humidity, ageing and contamination, so leakage paths and the floating potential (and thus E_{max} and J_{max}) may have shifted only by moderate factors.
- The “fair weather” and “storm-like” regimes are represented by simple, horizontally uniform profiles with prescribed $J_{0,\text{atm}}$ and $E_{0,\text{atm}}$. Actual atmospheric electric environments over agricultural fields are influenced by topography, nearby structures, aerosol loading and horizontal inhomogeneities in storm charge. The local field at the electrovegetometer could therefore deviate significantly from the idealised profiles adopted here, especially under complex convective conditions.
- The simulations do not include explicit representations of vegetation. Leaves, stems and canopy structure can distort the field and act as additional conductors or partial insulators, redistributing currents and modifying the near-surface potential landscape. They can also participate in charge exchange through surface conduction films, stomatal apertures or wetting layers. The present results therefore provide a first-order picture of the field “in the air”, not a complete description of plant-field coupling.

4.5. *Implications for the history and modern practice of “electroculture”*

Within these limitations, the modelling results support a nuanced re-assessment of Bertholon's electrovegetometer. On the one hand, the device is physically capable of generating strong local field enhancements and, under storm-time conditions, of approaching or exceeding corona-onset thresholds, making luminous “aigrettes” plausible. On the other hand, in its primary fair weather operating state (which would dominate day-to-day exposure) the structure appears to act mainly as a passive field concentrator with small total currents and highly localised perturbations.

This dual picture suggests that Bertholon's conceptual intuition about the existence of a persistent electrical influence on vegetation was not entirely misplaced, but that his expectations regarding the strength and agronomic consequences of this influence might have been optimistic. The electrovegetometer is better interpreted as a delicate probe of the global electric circuit in the near-surface layer and as a demonstrator of field concentration and corona phenomena, than as a robust agricultural “enhancer” in the modern engineering sense.

For contemporary discussions of “electroculture”, a term that has recently resurfaced in popular and sometimes pseudoscientific contexts, the present work underscores the need for careful, quantitative modelling and controlled experiments. Devices that resemble historical electrovegetometers may indeed modify the local electric environment around plants, but the magnitude, sign and biological relevance of these modifications cannot be inferred from qualitative analogies alone. They require a combination of atmospheric-electric measurements, detailed plant-physiology studies and models that extend beyond the pre-corona, linear regime considered here.

5. Conclusion

Re-examining Bertholon's 18th-century electrovegetometer within the framework of modern atmospheric electrodynamics, this study has developed a quasi-steady, two-dimensional, resistive model of the air-device system, in which the atmosphere is treated as an ohmic medium carrying the global conduction current and the metallic structure is represented as a floating conductor supported by leaky wooden insulators. Solving the stationary conduction equation with altitude-dependent conductivity and realistic configurations has yielded quantitative estimates of potentials, electric fields and current densities around the electrovegetometer under idealised fair weather and storm-like forcing.

The main findings can be summarised as follows:

- Under typical fair weather conditions, the electrovegetometer's sharp points enhance the local electric field by two to three orders of magnitude relative to the background atmospheric field, reaching tens of $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ at the upper single point and about $80\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ at the lower multi-point crown. The associated current densities remain in the $\text{pA}\text{--}\text{nA}/\text{m}^2$ range, consistent with weak conduction in a slightly ionised medium. Field and current perturbations are strongly localised and decay to near-ambient values within cm.
- When the background field and conductivity are increased to values representative of pre-storm or storm-affected conditions, the same geometry yields peak fields in the $10^5\text{--}10^6\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ range. These levels approach or exceed empirical corona-onset thresholds and encroach on breakdown estimates, particularly at the lower crown. Within the limits of a linear, space charge free approximation, these results indicate that Bertholon's device could have produced corona glows and enhanced ion fluxes during disturbed weather, providing a plausible physical basis for historical reports of luminous “aigrettes”.
- Parametric variations of the upper apex angle and collector geometry show that fair weather and storm-time peak fields and currents near the lower crown are largely insensitive to the fine details of the collector, as long as an elevated mast is present. The principal function of the mast is to intercept a portion of the atmospheric column potential and funnel it to the distributor, while the multi-point crown near canopy height remains the dominant feature controlling local field enhancement.
- The results are contingent on the assumptions of a 2-D geometry, linear ohmic conduction, prescribed conductivity profiles and simplified material properties. They should therefore be viewed as pre-corona upper bounds rather than fully realistic predictions of discharge behaviour. Within these limits, the study suggests that Bertholon's

electrovegetometer was physically capable of concentrating atmospheric electricity and occasionally producing visible corona under storm-time forcing, while its fair weather influence on plants was likely subtle, localised and difficult to quantify with 18th-century instruments.

Finally, this work illustrates how modern numerical modelling of the global atmospheric electric circuit, even in a simplified pre-corona form, can sharpen our understanding of historical electrotechnical devices and their plausible modes of operation. Future extensions could include fully 3-D simulations, explicit treatment of space charge and corona dynamics, more realistic representations of soil and vegetation and coupled experiments in controlled atmospheric-electric environments. Such studies would not only refine the retrospective assessment of Bertholon's electrovegetometer but also inform contemporary debates on the physical and biological significance of weak atmospheric-electric perturbations in agricultural settings.

Declaration of interests

The author does not work for, advise, own shares in, or receive funds from any organization that could benefit from this article, and has declared no affiliations other than their research organization.

References

- [1] Bertholon, *De l'électricité des végétaux*, P. F. Didot Jeune, quai des Augustins: Paris, 1783.
- [2] A. G. Bailey, "The charging of insulator surfaces", *J. Electrostat.* **51–52** (2001), pp. 82–90.
- [3] E. R. Williams, "C.T.R. Wilson versus G.C. Simpson: fifty years of controversy in atmospheric electricity", *Atmos. Res.* **91** (2009), no. 2–4, pp. 259–271.
- [4] J. H. Winkler, B. Franklin, T. F. Dalibard and L. G. Le Monnier, *Ueber Luftelektricität. Neudruck Von Schriften Und Karten Über Meteorologie Und Erdmagnetismus Herausgegeben Von Professor Dr. G. Hellmann*, vol. 11, A. Asher & Co.: Berlin, 1898.
- [5] K. B. H. Herbert, "John Canton—pioneer investigator of atmospheric electricity", *Weather, RMetS* **52** (1997), no. 9, pp. 286–290.
- [6] B. P. S. McGinness, R. Giles Harrison, K. L. Aplin and M. W. Airey, "The role of point discharge in the historical development of atmospheric electricity", *Hist. Geo Space Sci.* **16** (2025), pp. 51–63.
- [7] K. L. Aplin, R. G. Harrison and M. J. Rycroft, "Investigating Earth's atmospheric electricity: a role model for planetary studies", *Space Sci. Rev.* **137** (2008), pp. 11–27.
- [8] B. A. Tinsley, G. B. Burns and L. Zhou, "The role of the global electric circuit in solar and internal forcing of clouds and climate", *Adv. Space Res.* **40** (2007), no. 7, pp. 1126–1139.
- [9] E. A. Mareev and E. M. Volodin, "Variation of the global electric circuit and Ionospheric potential in a general circulation model", *Geophys. Res. Lett.* **41** (2014), no. 24, pp. 9009–9016.
- [10] A. Guha, B. K. De, S. Gurubaran, S. S. De and K. Jeeva, "First results of fair-weather atmospheric electricity measurements in Northeast India", *J. Earth Syst. Sci.* **119** (2010), pp. 221–228.
- [11] I. G. Kudintseva, A. P. Nickolaendro, M. J. Rycroft and A. Odzimek, "AC and DC global electric circuit properties and the height profile of atmospheric conductivity", *Ann. Geophys.* **59** (2016), no. 5, article no. A0545.
- [12] W. Kundt and G. Thuma, "Goelectricity: atmospheric charging and thunderstorms", *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **61** (1999), pp. 955–963.
- [13] R. B. Standler and W. P. Winn, "Effects of coronae on electric fields beneath thunderstorms", *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **105** (1979), no. 443, pp. 285–302.



Article de recherche / *Research article*

La face cachée des orages

The hidden face of storms

Serge Soula ^a

^a Laero, Université de Toulouse, CNRS, IRD, Toulouse, France

Courriel : serge.soula@univ-tlse3.fr

Résumé. Les orages sont associés à des nuages de fort développement vertical appelés cumulonimbus qui abritent des régions chargées électriquement. Ils produisent des éclairs au sein du nuage et entre celui-ci et le sol. Au-dessus du nuage, plusieurs types de décharges électriques peuvent se produire et sont regroupés sous le terme TLE, de l'anglais *Transient Luminous Event* : les *blue starters*, les *blue jets* et les *jets* géants émergent du sommet nuageux et se différencient par l'altitude qu'ils atteignent (environ 20 km, 40 km et 90 km, respectivement), la région du nuage où ils démarrent et la polarité de la charge qu'ils transfèrent; les *sprites* (farfadets en français) qui se déclenchent aux alentours de 70 km d'altitude au-dessus des régions stratiformes suite à un éclair nuage-sol positif; les Elves sous la forme d'un anneau lumineux à la base de l'ionosphère (90 km la nuit) produites par des puissants éclairs nuage-sol. Cet article décrit les principales caractéristiques et les mécanismes de formation de ces TLEs.

Abstract. Thunderstorms are associated with clouds of strong vertical development called cumulonimbus which contain electrically charged regions. They produce lightning flashes within the cloud and between it and the ground. Above the cloud, several types of electrical discharges can occur and are grouped under the term TLE, from the English *Transient Luminous Event*: blue starters, blue jets and giant jets emerge from the cloud top and are differentiated by the altitude they reach (around 20 km, 40 km and 90 km, respectively), the region of the cloud where they start and the polarity of the charge they transfer; sprites (farfadet in French) which are triggered at about 70 km altitude above the stratiform regions following a positive cloud-to-ground flash; Elves in the form of luminous rings at the base of the ionosphere (90 km at night) produced by powerful cloud-to-ground lightning. This article describes the main characteristics and formation mechanisms of these TLEs.

Mots-clés. Orage, Décharge électrique, Phénomène lumineux transitoire, Éclairs, Cumulonimbus.

Keywords. Thunderstorm, Electrical discharge, Transient luminous event, Lightning flash, Cumulonimbus.

Manuscrit reçu le 19 mars 2025, accepté le 5 mai 2025.

1. Introduction

L'orage est un phénomène météorologique qui s'accompagne d'une part d'un nuage spécifique, le cumulonimbus, d'autre part d'une manifestation électrique bien particulière, l'éclair. Le cumulonimbus est un nuage à fort développement vertical qui se forme dans des conditions de forte instabilité atmosphérique [1]. Il atteint la tropopause, voire la dépasse avec des excroissances (*overshoot* en anglais), aux alentours de 12 km d'altitude aux latitudes tempérées et à plus de 15 km dans les régions tropicales. C'est donc un nuage qui contient une grande diversité d'espèces microphysiques liquides et glacées, des courants ascendants et descendants, mais aussi des charges électriques des deux signes et portées par les hydrométéores dans certaines régions

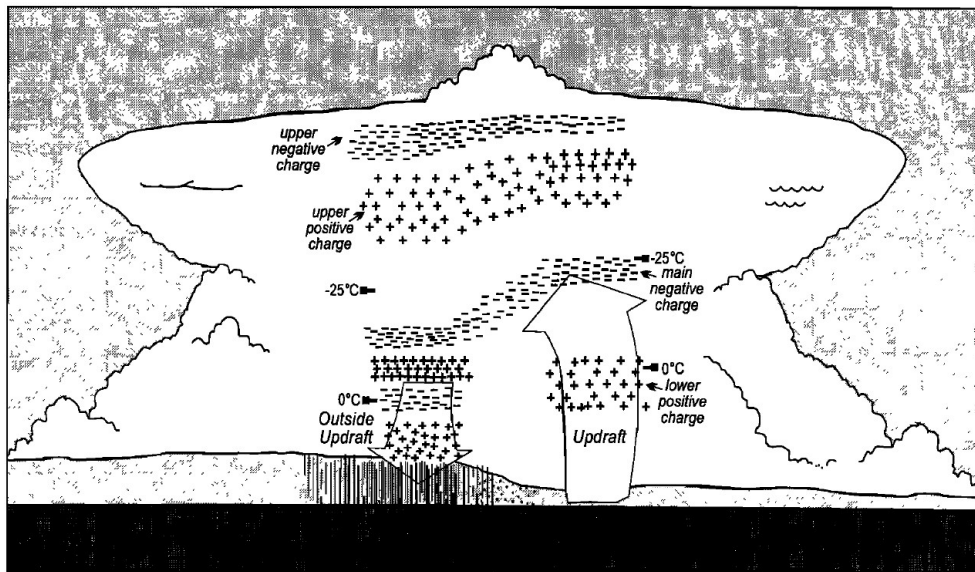


FIGURE 1. Structure dynamique et répartition de charges dans un nuage de type cumulonimbus. Tiré de [3].

du nuage (Figure 1). Les charges électriques sont notamment le résultat de collisions entre hydrométéores glacés, les cristaux de glace et les particules de graupel ou neige roulée par effet thermoélectrique [2]. Entre les zones chargées de polarité différente, des décharges peuvent se former lorsque la différence de potentiel est suffisante par rapport au contexte microphysique présent. La propagation de la décharge définit ce que l'on appelle l'éclair, caractérisé par une succession de processus physiques, des courants, un parcours et une géométrie qui permet de les classer en différentes catégories : les éclairs intranuage qui ne sortent pas du milieu nuageux, positifs ou négatifs suivant le sens conventionnel du courant qu'ils portent; les éclairs nuage-sol qui connectent le nuage et le sol, positifs (négatifs) s'ils amènent de la charge positive (négative) au sol. Pour ces derniers, on parle aussi d'éclairs descendants (ascendants) si la première phase appelée traceur part du nuage (du sol) comme dans la grande majorité des cas. Certains éclairs peuvent aussi être classés comme inter-nuage ou nuage-air s'ils connectent deux nuages distincts ou s'ils finissent hors du milieu nuageux.

Les orages peuvent avoir différentes durées, tailles ou organisations, ce qui se traduit aussi par des activités électriques spécifiques. La plus petite structure est la cellule orageuse d'une dizaine de km de diamètre et d'une durée inférieure à l'heure. Les orages multicellulaires se forment lorsque les conditions sont plus favorables et se maintiennent sur des plus grands domaines. La supercellule engendre les phénomènes les plus violents tels que la grosse grêle et les tornades. Les phénomènes convectifs de méso-échelle, comme les lignes de grain, ont des durées de vie de plusieurs heures et peuvent parcourir des distances de plusieurs centaines de kilomètres. L'identification de certains phénomènes ou formes caractéristiques, comme les *bow echos* ou les structures en V, peut fournir une classification plus détaillée des orages.

Les manifestations évoquées, qu'elles soient électriques, dynamiques ou microphysiques sont visibles depuis le sol ou détectables avec des instruments adaptés comme les radars météorologiques ou les capteurs d'éclairs. L'orage interagit aussi électriquement avec les couches de l'atmosphère au-dessus de lui. Il participe notamment au circuit global entre la Terre et l'ionosphère avec une contribution qui amène au sol de la charge négative. Ce qui se passe au-dessus du nuage

d'orage sur le plan des décharges électriques est resté longtemps un mystère et est devenu un sujet d'étude pour les électriciens de l'atmosphère depuis quelques décennies. Ces aspects sont développés dans l'article.

2. Les phénomènes lumineux transitoires

2.1. *Un peu d'histoire*

Les premières observations de phénomènes lumineux au-dessus des nuages sont évoquées sous des formes imagées dans la littérature dès la fin du XIX^e siècle, puis plus tard dans les années 60 par des noms célèbres de la discipline dans les ouvrages généraux d'électricité atmosphérique [4]. Vonnegut [5] parlait aussi de ces éclairs inhabituels. Plus récemment, Vaughan et Vonnegut [6] ont réalisé une compilation de témoignages potentiellement crédibles sur des observations de décharges lumineuses émergeant du sommet du nuage d'orage. Les 15 témoignages par des pilotes ou anciens pilotes recensés situent la plupart des observations dans les années 60 à 80 et parlent d'éclairs se terminant dans l'air à plusieurs kilomètres au-dessus du nuage. Certains orages pouvaient produire plusieurs décharges ascendantes au cours de leur cycle de vie. Les pilotes d'avion n'insistaient pas trop sur ces manifestations visuelles éphémères qui n'étaient pas faciles à décrire et pouvaient susciter des doutes sur leur acuité visuelle, préférant différer les témoignages par rapport aux observations. Dans tous les cas, les observations ne s'appuyaient pas sur des images associées.

Le 6 juillet 1989 va marquer le début d'une longue série d'observations de ces phénomènes lumineux que l'on va appeler plus tard les TLEs de l'expression *Transient Luminous Events*. En effet, au cours de la nuit, une équipe de l'université du Minnesota conduite par le Professeur Winckler, testait une caméra vidéo noir et blanc très sensible prévue pour des prises de vue d'un sondage par fusée, en observant des étoiles dans un ciel clair. L'analyse des images obtenues révélait un enregistrement singulier sous la forme d'un phénomène lumineux double de très faible durée (moins de 30 ms). Il avait été produit au-dessus d'un orage lointain de type *Mesoscale Convective System* (MCS) dans le Minnesota à une distance d'environ 250 km au nord du site d'observation [7]. La Figure 2 montre le cliché de cette observation.

Cette observation venait valider la théorie du physicien écossais Wilson, prix Nobel de Physique en 1927 pour la mise au point de la chambre de condensation, ou chambre de Wilson, qui permet la visualisation des trajectoires de particules ionisantes. En effet, il avait suggéré l'existence de décharges électriques à des altitudes élevées au-dessus des orages, grâce au champ électrique produit juste après un éclair nuage-sol qui neutralise suffisamment de charge dans le nuage d'orage. Comme le montre la Figure 3, le champ électrique produit par le nuage après l'éclair à une altitude de l'ordre de 70 km pourrait dépasser le champ seuil de déclenchement d'une décharge (champ disruptif) qui est proportionnel à la densité de l'air. Wilson avait même déclaré qu'il aurait aperçu ce genre de « flash » diffus, en forme d'« éventail » et de couleur verdâtre au-dessus d'orages assez éloignés pour être sous l'horizon [8]. Une décharge déclenchée à cette altitude pourrait ensuite se propager dans des champs électriques ambiants plus faibles, comme tout type de décharge atmosphérique incluant bien sûr les éclairs que ce soit au sein du nuage ou à l'extérieur.

2.2. *Les premières campagnes d'observations et la classification des TLEs*

Suite à la première observation, les années 90 allaient voir le développement d'expériences pour tenter d'en reproduire, notamment depuis la navette spatiale. Rapidement, de nouvelles manifestations lumineuses étaient identifiées avec des caméras embarquées. Ce fut le cas avec

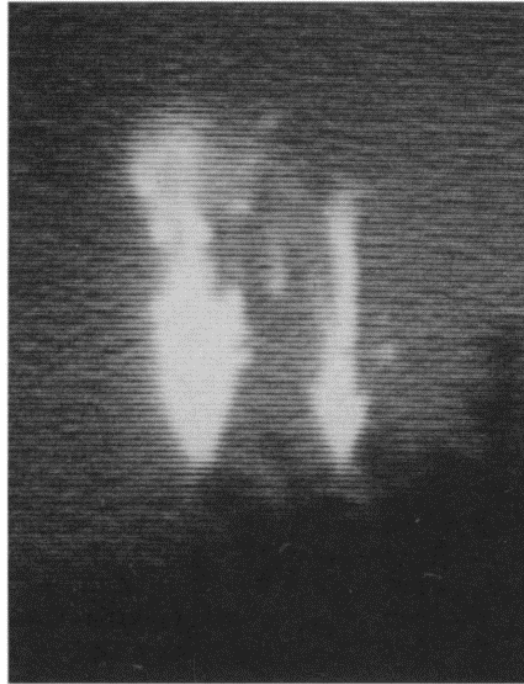


FIGURE 2. Première image d'une décharge lumineuse obtenue avec une caméra TV sensible dans la nuit du 5 au 6 juillet 1989 au-dessus d'un orage dans le nord-ouest du Lac Supérieur au nord des États-Unis. Tiré de [7].

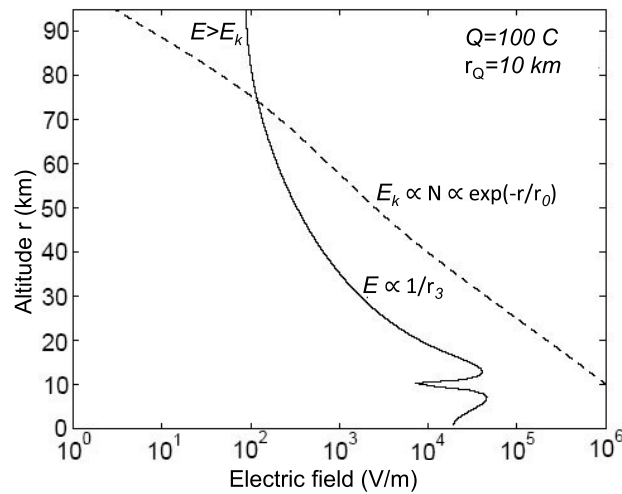


FIGURE 3. Allure des profils verticaux des champs électriques : E produit par une charge Q placée à 10 km d'altitude et E_k nécessaire à une décharge électrique [9]. À une certaine altitude (ici entre 70 et 75 km), le champ produit par le nuage peut être suffisant pour produire une ajoutée adaptée de [9].

des intensifications lumineuses diffuses successives à des éclairs (rapporté dans [10]), sous la forme d'anneaux lumineux (100–300 km) à la base de l'ionosphère, formellement identifiées plus tard à partir des observations de campagnes américaines et nommées Elves, comme *Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources* [11]. Vaughan *et al.* [12] publiait dans la rubrique la photo du mois du journal *Monthly Weather Review* une image d'éclair nuage-air photographiée le 28 avril 1990 par une caméra sur une navette américaine alors qu'elle volait au-dessus de la Mauritanie. Le 7 juillet 1993, pas moins de 250 événements lumineux étaient enregistrés en quelques heures, produits au-dessus d'un MCS dans le Kansas à quelque 400 km du site d'observation au sol dans le Colorado [8]. De même, un avion DC-8 de la NASA équipé d'une caméra plein ciel allait faire des observations du même type [13]. Ces « éclairs » visibles au-dessus des orages reproduisant la première observation publiée dans [7], allaient être baptisés « sprites » par Dave Sentman, du nom des esprits fugitifs évoqués par William Shakespeare dans ses pièces. En français, la traduction est farfadet. Un peu plus tard, les sprites étaient photographiés en couleur, ce qui faisait ressortir nettement leur couleur dominante dans le rouge [14]. Les campagnes d'observation se succédaient au cours des années 90, essentiellement aux États-Unis, et un nouveau phénomène inattendu allait venir enrichir la famille en construction, les *blue jets* [15]. Au cours de la même campagne d'observation, d'autres types de décharges avec des points communs aux *blue jets* étaient identifiés, c'était les *blue starters* [16].

La fin des années 90 était marquée par les premières observations sur d'autres continents, notamment au Japon avec des orages en hiver [11], en Australie [17] et en Europe [18,19]. Des travaux théoriques à la fin des années 90, montraient par des modèles, les mécanismes impliqués dans ces décharges d'altitude [20]. Le début des années 2000 a été marqué par de nombreux projets et des développements instrumentaux qui allaient analyser plus en détail la structure et le développement des TLEs, notamment par l'utilisation de caméras rapides ou télescopiques [21]. Au tout début des années 2000, un nouveau type de TLE allait être découvert au cours de campagnes d'observation, le *jet géant* qui est sans doute le plus spectaculaire [22].

La Figure 4 schématise l'ensemble des TLEs en montrant leur aspect, leur développement vertical et leur localisation par rapport à l'orage de type MCS dans ce cas. On y retrouve les sprites au-dessus de la partie stratiforme du système orageux avec deux cas, l'un de type colonne d'aspect filamenteux et l'autre de type carotte d'aspect plus massif, avec une altitude de déclenchement d'environ 70 km, un développement vertical de plusieurs dizaines de km et la présence d'un halo qui peut accompagner ou non le sprite. Le halo peut aussi apparaître seul comme nous le verrons plus tard. L'Elve est représentée avec une extension horizontale de plusieurs centaines de km et une altitude correspondant à la base de l'ionosphère à 90 km environ la nuit. Les *blue jets* et les *jets géants* sont associés à la région convective de l'orage et atteignent des altitudes respectives d'environ 30 à 40 km et 90 km. Il est à noter que d'autres membres de la famille des TLEs ne figurent pas dans cette représentation, comme les *blue starters*, les *pixies*, ou encore les *trolls*, qui eux n'atteignent que des altitudes de quelques km au-dessus du nuage. Les éclairs émergeant du sommet du nuage ne sont pas classés comme des TLEs et atteignent des altitudes plus faibles que les *jets* bleus ou les *blue starters*.

3. Les principaux TLEs

3.1. Les sprites

Les formes générales de ce TLE sont diverses et ont permis d'établir une classification propre basée sur des ressemblances avec des formes connues (paréidolie). Ainsi, Bór [23] montre une classification comprenant des colonnes, des carottes, des anges, des arbres, des « wishbones » et

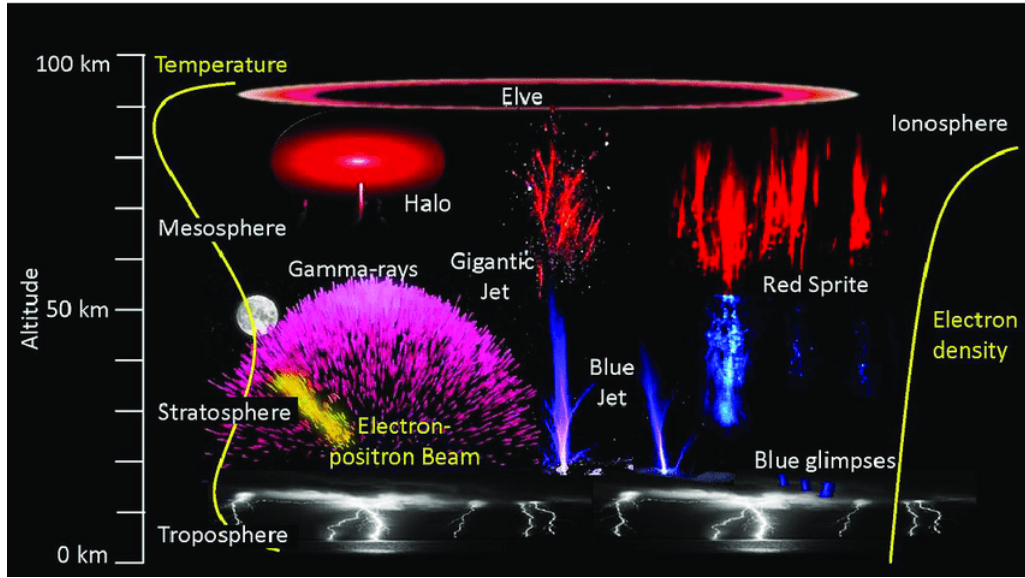


FIGURE 4. Représentation schématique des principaux TLEs dans leur environnement au-dessus d'un orage.

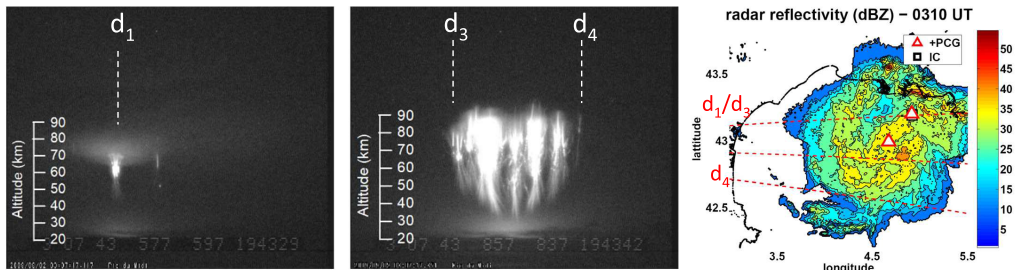


FIGURE 5. Deux images de 20 ms tirées de la vidéo d'un cas de sprite de grande taille et très lumineux enregistrée au cours de la nuit du 1^{er} au 2 septembre 2009. À droite, réflectivité radar dans l'orage avec la position des arcs positifs (triangles) associés au sprite et les azimuts de direction (d_1 , d_3 et d_4) depuis la caméra au pic du Midi. Adapté de [24].

des méduses à partir de 489 événements observés en Europe Centrale entre 2007 et 2009. De plus, chaque événement peut présenter des structures multiples d'éléments sous forme de filaments, de corps lumineux, de lueurs diffuses (*glows* en anglais), de perles et peut se développer par brèves séquences séparées dans le temps et dans l'espace pour constituer le « dancing sprite ». La Figure 5 montre un exemple de ces structures avec un sprite de grande taille et particulièrement lumineux observé au-dessus d'un orage dans le golfe du Lion en septembre 2009 à environ 350 km avec une caméra au pic du Midi de Bigorre. Dans ce cas, les deux images de 20 ms d'exposition correspondent à la première et la dernière de l'événement qui s'étale sur environ 300 ms simultanément à un éclair nuage-sol positif [24]. Cet éclair a produit deux impacts positifs au sol séparés d'environ 30 km sous la région stratiforme d'un orage de type MCS. En effet, les sprites se révèlent être intimement liés aux éclairs nuage-sol positifs [25] même si très rarement ils peuvent être associés à un éclair nuage-sol négatif [26] ou à un éclair intranuage [27].

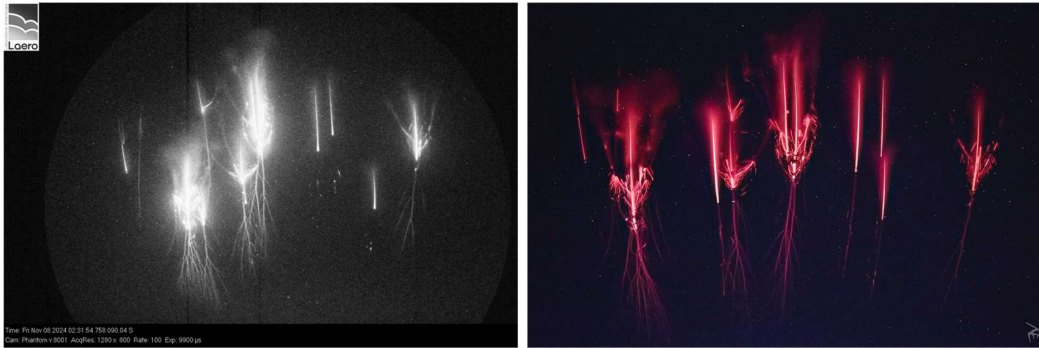


FIGURE 6. Deux images du même sprite vu sous deux angles légèrement différents le 8 novembre 2024 dans le sud de la France : à gauche image extraite d'une vidéo enregistrée à 100 images/seconde par Emmanuel Leclerc à 130 km de l'orage, à droite photo en pose par Nicolas Escurat à 300 km de l'orage.

Du point de vue de la physique de la décharge, c'est le type streamer qui est impliqué, de polarité positive et de propagation vers le bas dans sa première phase c'est-à-dire correspondant à une charge positive qui descend. L'émission de lumière dominante rouge correspond à des transitions dans la première bande positive de la molécule d'azote (N_2), principal constituant de l'air dans les 100 premiers kilomètres [28]. La Figure 6 montre un cas de sprite d'une durée de quelques dizaines de ms en noir et blanc et en couleurs réelles.

Le déclenchement d'un sprite pendant un éclair répond à des conditions spécifiques de champ électrique quasi statique à une altitude d'environ 70 km, qui peuvent être atteintes lorsque l'éclair neutralise suffisamment de charge dans le nuage [20]. De ce fait, le paramètre de l'éclair le plus pertinent pour établir un critère de déclenchement est le changement de moment de charge (CMC) produit de la charge écoulee par la longueur du canal de l'éclair [29]. Ce sont donc les éclairs nuage-sol neutralisant une charge d'un seul signe et localisée vers le sommet du nuage (le plus souvent positive) qui ont le plus d'impact sur la variation du champ électrique au-dessus du nuage. La Figure 7 schématise la chronologie typique des processus qui conduisent à la production du sprite.

3.2. *Les Elves*

Les Elves sont des émissions optiques dans la région D de l'ionosphère [30] en forme d'anneaux de quelques centaines de kilomètres de diamètre, centrés au-dessus des éclairs nuage-sol qui produisent de très fortes impulsions électromagnétiques (EMP) (Figures 8 et 9). Elles sont dues à l'excitation des première et deuxième bandes positives de la molécule d'azote par des électrons libres accélérés par la forte impulsion EMP [30,31]. Des modèles ont reproduit avec succès des aspects tels que la forme, la vitesse d'expansion, ainsi que l'emplacement et l'intensité des émissions optiques des Elves en réponse à l'impulsion de l'éclair et aux profils verticaux de densité électronique et d'espèces neutres (par exemple [31]). Ces auteurs ont calculé le champ électrique produit par des impulsions électromagnétiques en simulant les éclairs comme des canaux verticaux ou horizontaux. La Figure 10 montre les résultats dans les deux cas de figure et en fonction du temps, un champ électrique rayonné de $20 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ à 100 km de la décharge verticale au sol (noté E_{100} dans la littérature) qui correspond à un pic de courant de 56 kA pour un éclair nuage-sol (figures de gauche) et un champ E_{100} de $7 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ pour une décharge horizontale (figures de droite).

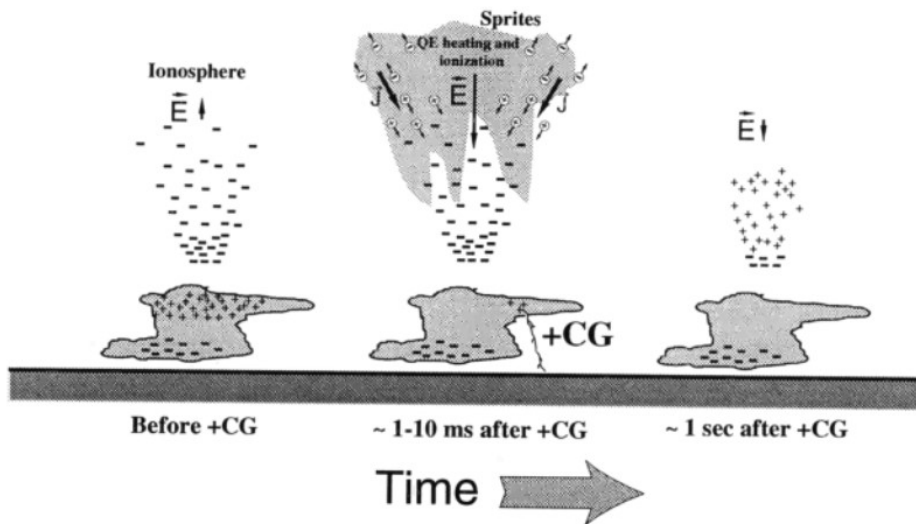


FIGURE 7. Illustration du mécanisme de pénétration d'un grand champ quasi-électrostatique (noté E) créé par le nuage dans la mésosphère après un éclair nuage-sol positif, conduisant au chauffage des électrons, au démarrage de l'ionisation et à la production d'émission lumineuse. Tiré de [20].



FIGURE 8. Image d'une Elve enregistrée avec une caméra sensible au Pic du Midi le 22 février 2012.

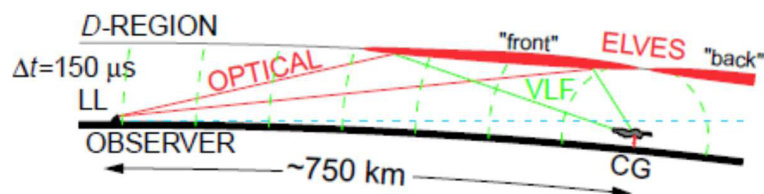


FIGURE 9. Schéma pour illustrer la formation d'une Elve (zone rouge) au-dessus de l'orage produite par une éclair nuage-sol (CG) de forte puissance. Le centre de l'anneau lumineux s'explique par le peu de puissance rayonnée à la verticale de l'éclair, c'est-à-dire dans l'axe longitudinal du canal de l'éclair.

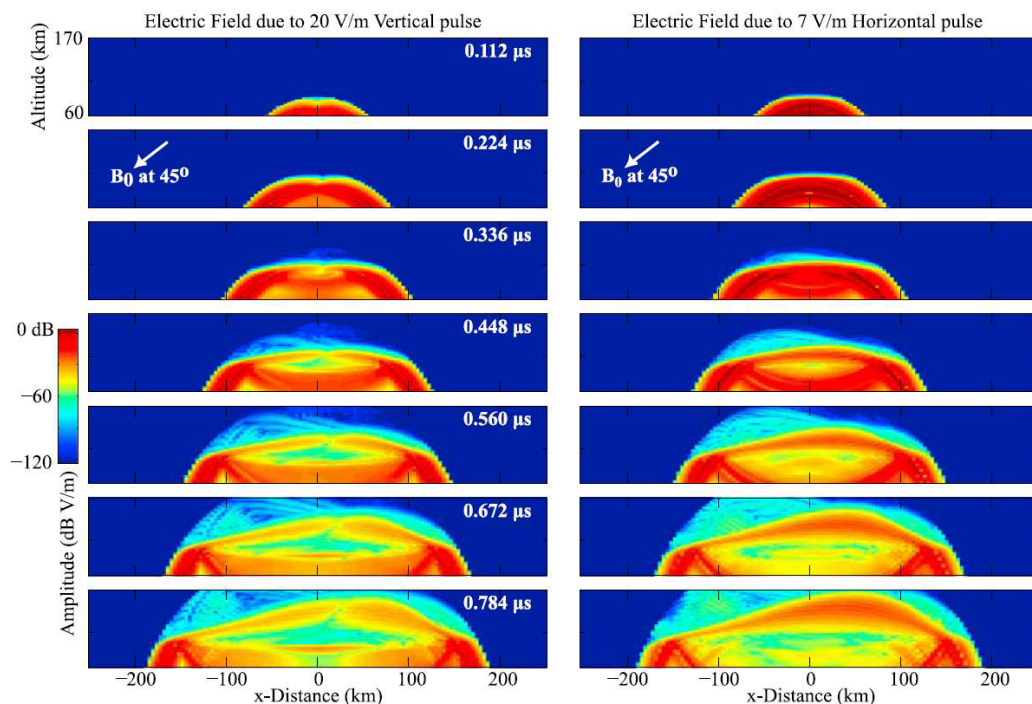


FIGURE 10. Amplitude du champ électrique des impulsions électromagnétiques (EMP) simulées suite à une décharge verticale (à gauche) et horizontale (à droite). Tiré de [31].

3.3. Les jets géants

Ce sont les TLEs qui ont la plus grande extension verticale puisqu'ils démarrent du nuage et atteignent la base de l'ionosphère à environ 90 km la nuit. Ils sont aussi les plus rarement observés et les premières vidéos montraient que le phénomène pouvait être décomposé en 2 phases : le *leading jet* (LJ par la suite) qui dans un premier temps trace le parcours de la décharge avec des branches plus ou moins développées vers le haut et le *trailing jet* (TJ par la suite) qui apparaît comme une décharge secondaire plus lumineuse mais moins développée verticalement [22]. La Figure 11 montre cinq cas de *jets* géants observés à une distance d'environ 50 km de l'orage depuis l'île de la Réunion le 7 mars 2009 [32].

Les détections de radiations électromagnétiques à extrêmement basse fréquence (ULF-ELF) associées à ces *jets* géants ont permis de déterminer que la charge transportée vers le haut est négative [33]. La quantité de charge écoulee peut être importante car le processus de décharge peut durer plusieurs centaines de millisecondes, notamment pendant le phase *trailing jet*. Le cas illustré par la Figure 12a correspond à un *jet* géant observé le 21 juillet 2008 au-dessus de la tempête tropicale *Cristobal* dans l'est des États-Unis à une distance d'environ 350 km. La première phase du *jet* engendrait un moment de courant maximum de 55 kA km et, en l'intégrant sur la durée du *jet*, les auteurs ont estimé un CMC colossal de 10 800 C km, bien supérieur aux valeurs trouvées jusque-là, ce qui leur permettait d'estimer la charge transférée autour de 144 C. Un éclair nuage-sol ne peut neutraliser de telles charges que s'il a une forte composante continue, ce qui est le cas de certains éclairs nuage-sol positifs [34]. Dans le cas de la Figure 12b pour un *jet* très lumineux observé le 12 février 2020 depuis l'île de la Réunion à 460 km de distance, la valeur du moment de courant est bien plus importante à près de 300 kA km [35]. Toutefois, la variation

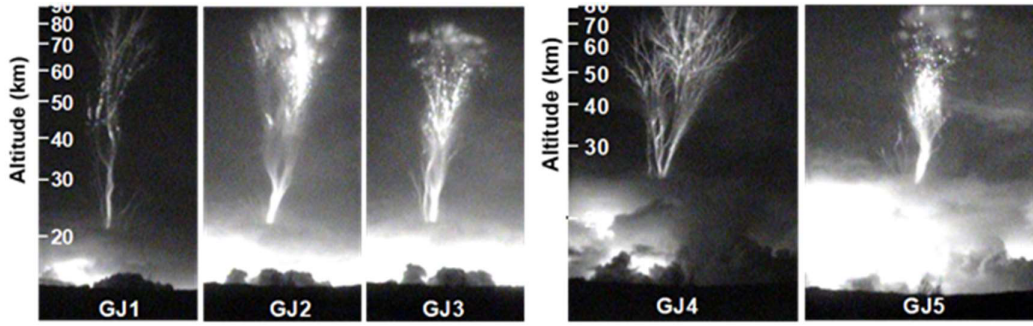


FIGURE 11. Images tirées des vidéos montrant cinq *jets* géants dans leur développement vertical complet et observés à une distance d'environ 50 km. Tiré de [32].

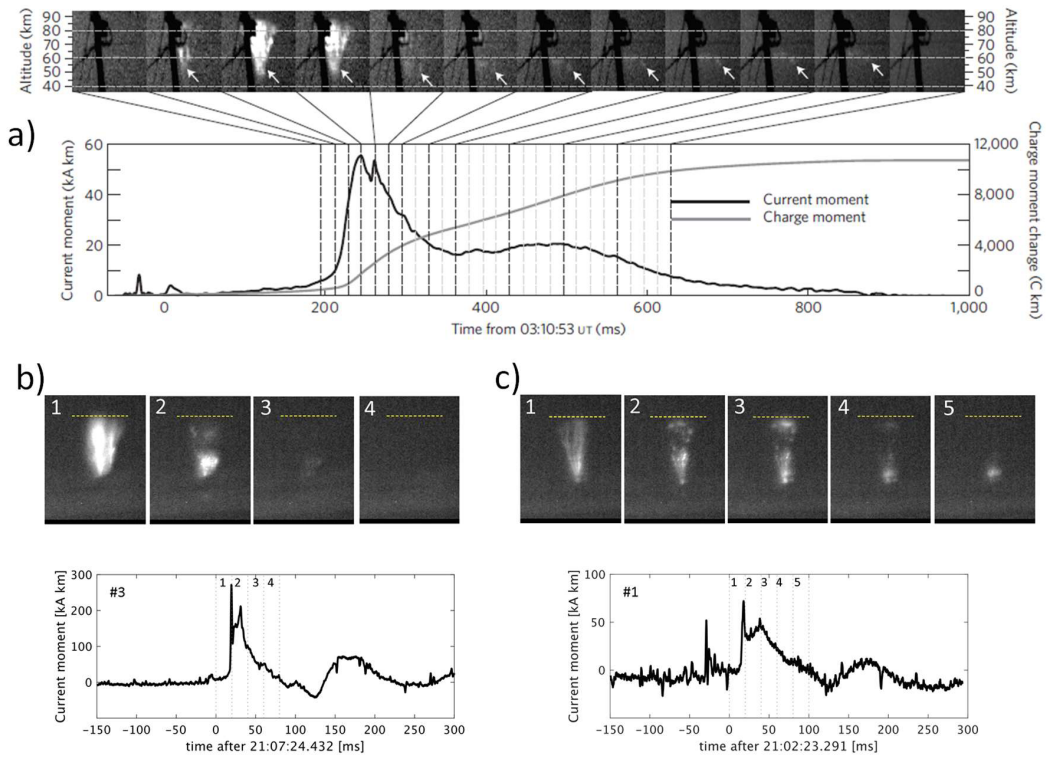


FIGURE 12. Images vidéo successives de *jets* géants avec les évolutions du moment de courant (courbe noire) et du moment de charge (courbe grise) correspondantes : (a) Cas tiré de [33] où les images prises après le maximum sont des moyennes de deux ou quatre champs vidéo individuels, comme indiqué par la fenêtre temporelle de chacun ; (b) et (c) deux cas tirés de [35] où les *jets* géants sont filmés à environ 460 km.

du moment de charge estimée en intégrant le moment de courant est de l'ordre de 5 800 C km. Le cas de la Figure 12c produit un moment de courant plus faible. On voit que la luminosité du phénomène est liée au moment de courant produit.



FIGURE 13. Deux photos de *jets* géants : à gauche en Chine le 13 août 2016, © Phebe Pan ; à droite le 7 mars 2009 à l'île de la Réunion, © Patrice Huet.

Les photographies en couleur de *jets* géants (Figure 13) montrent un étagement de couleurs qui correspondent à différents processus de production : la partie inférieure au sommet du nuage présente des similitudes avec l'apparence d'un canal d'éclair classique à haute température émettant de la lumière blanche ; la partie intermédiaire se situe dans le bleu correspondant à des émissions dominantes de la molécule d'azote sous l'impact de particules accélérées ; dans la partie supérieure le rouge d'autres transitions de la molécule d'azote domine. Les émissions les plus intenses sont émises pendant la phase *trailing jet* qui est celle qui dure le plus. Le *jet* géant démarre dans le nuage chargé entre la charge négative centrale et la charge positive supérieure comme un éclair intranuage positif. La condition pour qu'il émerge du sommet du nuage semble être un déséquilibre entre ces deux zones de charge au profit de la négative [36].

3.4. Les *blue jets* et les *blue starters*

Les phénomènes de *blue jets* et *blue starters* ont un point commun avec les *jets* géants dans la mesure où ils émergent du sommet du nuage, jusqu'à des altitudes de 40 km environ pour le premier et 25 km environ pour le deuxième [15,16,37], mais ils ne viennent pas de la même région du nuage car ils transportent de la charge positive vers le haut. Les *blue jets* se présentent comme d'étroits cônes de lumière bleue (Figure 14). Leurs vitesses apparentes sont comprises entre 10 et 100 km/s. La modélisation indique que les *blue jets* se produisent à la suite d'un déséquilibre entre la charge supérieure du nuage (positive) et la charge écran au-dessus (négative) attirée vers le sommet du nuage [36]. Les *blue starters* ne correspondent pas à des phases initiales de *blue jets*. L'observation d'un *blue starter* photographié au-dessus d'un orage dans le centre-ouest du Nouveau-Mexique (USA) a fait l'objet d'un article [38]. Il a été conclu qu'il s'initiait aussi entre la charge positive supérieure du nuage et une couche de charge négative à son sommet, se propageant sous forme de décharge bidirectionnelle avec davantage de sources VHF émises dans la partie descendante tout au long de la charge positive, ce qui suggère un leader négatif, tandis que le leader ascendant était un faible émetteur de sources VHF et donc positif.



FIGURE 14. Illustration d'un *blue jet* photographié au-dessus d'un orage depuis l'île de la Réunion par Patrice Huet en mars 1997.

4. Conclusion

La recherche dans les dernières décennies sur les TLEs nous a révélé un pan de la physique de l'orage qui avait été évoqué dans plusieurs travaux théoriques mais qui souffrait d'un manque de données expérimentales. Les campagnes d'observations et les stations équipées d'instruments ont montré que ces phénomènes étaient fréquents et présents dans plusieurs régions de la Terre. La classification principale distingue les sprites qui sont généralement associés aux éclairs nuage-sol positifs dans les régions stratiformes des orages, les Elves produits par des éclairs nuage-sol des deux signes près de la région convective, les *jets* géants plus rares et générés le plus souvent par des orages en zone tropicale, les *blue jets* et les *blue starters* qui se distinguent par l'altitude qu'ils atteignent.

Ces décharges contribuent au circuit électrique global c'est-à-dire aux mouvements de charge dans le système Terre. Ce sont des mouvements liés à des décharges et donc à des mouvements rapides qui mettent en jeu des forts courants avec un impact sur leur environnement direct sur les plans de la chimie et du bilan d'énergie. L'observation de ces phénomènes, notamment depuis l'espace avec la station spatiale internationale (ISS), élargit notre connaissance des orages et pose un regard nouveau sur les manifestations électriques au sommet du nuage d'orage. Des observations récentes montrent une activité spécifique au sommet des orages fortement actifs, qui se traduit par des décharges très locales. D'autres observations montrent que l'orage produit des rayonnements de très grande énergie et des accélérations de particules dignes de celles des grands instruments voués à cela.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que son organisme de recherche.

Références

- [1] S. SOULA, « Electrical environment in a storm cloud », *J. AerospaceLab* **5** (2012), p. 1-10. Online at <https://aerospacelab.onera.fr/en/al5/electrical-environment-in-a-storm-cloud>.
- [2] C. P. R. SAUNDERS, « Charge separation mechanisms in clouds », *Space Sci. Rev.* **137** (2008), p. 335-353.
- [3] M. STOLZENBURG, W. D. RUST et T. C. MARSHALL, « Electrical structure in thunderstorm convective regions. 3. Synthesis », *J. Geophys. Res.* **103** (1998), p. 14097-14108.
- [4] M. A. UMAN, *Lightning. Advanced Physics*, Monograph series, McGraw-Hill: New York, 1969.
- [5] B. VONNEGUT, « Cloud-to-stratosphere lightning », *Weather* **35** (1980), p. 59-60.
- [6] O. H. VAUGHAN JR. et B. VONNEGUT, « Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the air above », *J. Geophys. Res.* **94** (1989), article no. 13179.
- [7] R. C. FRANZ, R. J. NEMZEK et J. R. WINCKLER, « Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system », *Science* **249** (1990), p. 48-51.
- [8] W. A. LYONS, « Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video », *Geophys. Res. Lett.* **21** (1994), no. 10, p. 875-878.
- [9] C. T. R. WILSON, « The electric field of a thunderstorm and some of its effects », *Proc. R. Soc. Lond.* **37** (1925), p. 32D.
- [10] W. L. BOECK, O. H. VAUGHAN, R. BLAKESLEE, B. VONNEGUT et M. BROOK, « Lightning induced brightening in the airglow layer », *Geophys. Res. Lett.* **19** (1992), no. 2, p. 99-102.
- [11] H. FUKUNISHI, Y. TAKAHASHI, A. UCHIDA, M. SERA, K. ADACHI et R. MIYASATO, « Occurrences of Sprites and Elves above the sea of Japan near Hokuriku in winter », *EOS Suppl.* **80** (1999), no. 46, article no. F217. Abstract.
- [12] O. H. VAUGHAN JR., R. BLAKESLEE, W. L. BOECK, B. VONNEGUT, M. BROOK et J. MCKUNE JR., « A cloud-to-space lightning as recorded by the Space Shuttle payload-bay TV cameras », *Mon. Weath. Rev.* **120** (1992), p. 1459-1461.
- [13] D. D. SENTMAN et E. M. WESCOTT, « Video observations of upper atmosphere optical flashes recorded from an aircraft », *Geophys. Res. Lett.* **20** (1993), p. 2857-2860.
- [14] D. D. SENTMAN, E. M. WESCOTT, D. L. OSBORNE, D. L. HAMPTON et M. J. HEAVNER, « Preliminary results from the Sprites 94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), p. 1205-1208.
- [15] E. M. WESCOTT, D. SENTMAN, D. OSBORNE, D. HAMPTON et M. HEAVNER, « Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 2. Blue jets », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), no. 10, p. 1209-1212.
- [16] E. M. WESCOTT, D. D. SENTMAN, M. J. HEAVNER, D. L. HAMPTON, D. L. OSBORNE et O. H. VAUGHAN JR., « Blue starters : Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm », *Geophys. Res. Lett.* **23** (1996), no. 16, p. 2153-2156.
- [17] S. F. HARDMAN, R. L. DOWDEN, J. B. BRUNDELL, J. L. BAHR, Z. KAWASAKI et C. J. RODGER, « Sprite observations in the northern territory of Australia », *J. Geophys. Res.* **105** (2000), no. D4, p. 4689-4697.
- [18] T. NEUBERT, T. H. ALLIN, H. STEBAEK-NIELSEN et E. BLANC, « Sprites over Europe », *Geophys. Res. Lett.* **28** (2001), p. 3585-3588.
- [19] E. BLANC, T. FARGES, R. ROCHE, D. BREBION, T. HUA, A. LABARTHE et V. MELNIKOV, « Nadir observations of sprites from the International Space Station », *J. Geophys. Res.* **109** (2004), article no. A02306.
- [20] V. PASKO, U. INAN, T. BELL et Y. TARANENKO, « Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere », *J. Geophys. Res.* **102** (1997), no. A3, p. 4529-4561.
- [21] M. STANLEY, P. KREHBIEL, M. BROOK, C. MOORE, W. RISON et B. ABRAHAMS, « High speed video of initial sprite development », *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999), p. 3201-3204.
- [22] V. P. PASKO, M. A. STANLEY, J. D. MATHEWS, U. S. INAN et T. G. WOOD, « Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere », *Nature* **416** (2002), p. 152-154.
- [23] J. BÓR, « Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007-2009 », *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **92** (2013), p. 151-177.
- [24] S. SOULA, F. IACOVELLA, O. VAN DER VELDE et al., « Multi-instrumental analysis of large sprite events and their producing storm in southern France », *Atmos. Res.* **135** (2014), p. 415-431.
- [25] W. A. LYONS, « Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems », *J. Geophys. Res.* **101** (1996), p. 29641-29652.
- [26] C. P. BARRINGTON-LEIGH, U. S. INAN, M. STANLEY et S. A. CUMMER, « Sprites triggered by negative lightning discharges », *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999), no. 24, p. 3605-3608.

- [27] O. A. VAN DER VELDE, Á. MIKA, S. SOULA, C. HALDOUPIS, T. NEUBERT et U. S. INAN, « Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes », *J. Geophys. Res.* **111** (2006), article no. D15203.
- [28] S. B. MENDE, R. L. RAIRDEN, G. R. SWENSON et W. A. LYONS, « Sprite spectra; N2 1 PG band identification », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), no. 19, p. 2633-2636.
- [29] S. A. CUMMER et W. A. LYONS, « Implication of lightning charge moment changes for sprite initiation », *J. Geophys. Res.* **110** (2005), article no. A04304.
- [30] Y. N. TARANENKO, U. S. INAN et T. F. BELL, « The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning : Excitation of optical emissions », *Geophys. Res. Lett.* **20** (1993), no. 23, p. 2675-2678.
- [31] R. A. MARSHALL, U. S. INAN et V. S. GLUKHOV, « Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges », *J. Geophys. Res.* **115** (2010), article no. A00E17.
- [32] S. SOULA, O. VAN DER VELDE, J. MONTANYA, P. HUET, C. BARTHE et J. BÓR, « Gigantic jets produced by an isolated tropical thunderstorm near Réunion Island », *J. Geophys. Res.* **116** (2011), article no. D19103.
- [33] S. A. CUMMER, J. LI, F. HAN, G. LU, N. JAUGEY, W. A. LYONS et T. E. NELSON, « Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet », *Nat. Geosci.* **2** (2009), no. 9, p. 617-620.
- [34] V. A. RAKOV et M. A. UMAN, *Lightning : Physics and Effects*, Cambridge University Press: Cambridge, 2003.
- [35] S. SOULA, J. MLYNARCZYK, O. VAN DER VELDE, J. MONTANYA et E. LECLERC, « High production of gigantic jets by a thunderstorm over Indian Ocean », *J. Geophys. Res.* **128** (2023), article no. e2023JD039486.
- [36] P. R. KREHBIEL, J. A. RIOUSSET, V. P. PASKO, R. J. THOMAS, W. RISON, M. A. STANLEY et H. E. EDENS, « Upward lectrical discharges from thunderstorms », *Nat. Geosci.* **1** (2008), no. 4, p. 233-237.
- [37] T. NEUBERT, O. CHANRION, M. HEUMESSER, K. DIMITRIADOU, L. HUSBJERG, I. L. RASMUSSEN, N. ØSTGAARD et V. REGLERO, « Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere », *Nature* **589** (2021), no. 7842, p. 371-375.
- [38] H. E. EDENS, « Photographic and lightning mapping observations of a blue starter over a New Mexico thunders-torm », *Geophys. Res. Lett.* **38** (2011), article no. L17804.



Review article / *Article de synthèse*

An introduction to natural radiations and their detrimental effects on electronic devices

Une introduction aux effets des radiations naturelles et leurs effets indésirables sur les dispositifs électroniques

Frédéric Wrobel ^a

^a Montpellier University, IES UMR-CNRS5214, France
E-mail: frederic.wrobel@umontpellier.fr

Abstract. Modern electronic devices are naturally exposed to radiative environments, particularly in aerospace and avionics applications. This radiation is a major challenge, as it can lead to breakdowns and long-term degradation of electronic components. It comes from galactic cosmic rays (GCRs), the Sun and the Earth's radiation belts. They give rise to three main families of malfunctions: Total Ionizing Dose (TID), Displacement Damage (DD) and Single Event Effects (SEEs).

SEEs, in particular Single Event Upsets (SEUs), are of particular concern, as a single particle can alter the information in a memory bit, leading to critical errors. Monte Carlo simulations are widely used to predict and mitigate these effects. These probabilistic methods can be used to estimate SEU rates and develop hardening strategies. Monte Carlo predictive tools simulate the interaction of particles with electronic devices to assess their vulnerability.

Although Monte Carlo simulations have their limitations, particularly in modeling sensitive volumes and nuclear interactions, they remain essential for the aerospace and automotive industries. With the miniaturization of components, susceptibility to SEUs is increasing, underlining the need to improve these prediction tools and to pursue research into the reliability of components exposed to radiation.

Résumé. Les dispositifs électroniques modernes sont naturellement exposés à des environnements radiatifs, notamment dans l'aérospatial et les applications avioniques. Ces radiations constituent un défi majeur, car elles peuvent provoquer des pannes et une dégradation à long terme des composants électroniques. Elles proviennent des rayons cosmiques galactiques (GCRs), du Soleil et les ceintures de radiations terrestres. Elles engendrent trois familles de dysfonctionnements principaux : la dose ionisante totale (TID), les effets de déplacement (DD) et les effets singuliers (SEEs).

Les SEEs, en particulier les Single Event Upsets (SEUs), sont préoccupants, car une seule particule peut modifier l'information d'un bit de mémoire, entraînant des erreurs critiques. Pour prédire et atténuer ces effets, les simulations de type Monte Carlo sont largement utilisées. Ces méthodes probabilistes permettent d'estimer les taux de SEU et d'élaborer des stratégies de durcissement. Les outils, dits de prédiction, simulent l'interaction des particules avec les dispositifs électroniques afin d'évaluer leur vulnérabilité.

Bien que les simulations Monte Carlo présentent des limites, notamment dans la modélisation des volumes sensibles et des interactions nucléaires, elles restent essentielles pour l'industrie aérospatiale et automobile. Avec la miniaturisation des composants, la susceptibilité aux SEUs augmente, soulignant la nécessité d'améliorer ces outils de prédiction et de poursuivre les recherches sur la fiabilité des composants exposés aux radiations.

Keywords. Radiations, Single Event Upset, Monte Carlo simulations, Electronic reliability.

Mots-clés. Radiations, Événement Singulier, Simulations Monte Carlo, Fiabilité électronique.

Manuscript received 21 February 2025, accepted 16 June 2025.

1. Introduction

Electronic devices are increasingly being used in environments where they are exposed to extreme conditions, such as vacuum, intense vibrations, wide temperature variations, and high levels of radiation. While the effects of vacuum and temperature are well understood and often mitigated using traditional engineering approaches, radiations are still a crucial challenge, particularly in aerospace, nuclear, and high-altitude applications. Radiations are not limited to artificial sources like nuclear reactors or particle accelerators. They are indeed present in a natural environment such as Space and the atmosphere. In these environments, electronic components are likely to undergo failures and long-term degradation [1].

This paper explores these environments, which impact electronic systems. Natural environment radiations include galactic cosmic rays (GCRs), solar energetic particles (SEPs) and Earth's radiation belts. The particles that compose these environments interact with electronic materials, leading to various effects such as Total Ionizing Dose (TID), Displacement Damage (DD), and Single Event Effects (SEEs). Among SEE, Single Event Upsets (SEUs) are of the main concern since they are due to a unique particle that deposits enough energy in the device to flip a memory bit [2].

Predicting and mitigating SEU-induced failures is of crucial interest and must be deeply investigated. Monte Carlo simulations tools are widely used in this field as they allow to assess SEU rates and develop hardening techniques. This paper discusses the use of these Monte Carlo tools, including their advantages and limitations.

2. The natural radiative environment

Radiations are everywhere around us, from space down to our planet. Radiations have a major impact on both living organisms and electronic systems. In this part, we present the origin of these radiations that include galactic cosmic rays, solar radiations and the terrestrial environment.

2.1. *Galactic cosmic rays*

Galactic cosmic rays (GCRs) are composed of high-energy particles present in Space. They are mainly composed of protons, electrons, and heavy ions. These particles come from astrophysical events, such as supernova explosions that can accelerate particles [3].

2.2. *Solar radiative environment*

The Sun emits unpredictable and powerful bursts of radiation. This emission follows an 11-year activity cycle, during which the flux of particles varies. Solar flares and coronal mass ejections (CMEs) release large amounts of high-energy particles such as protons and helium nuclei [4]. These solar energetic particles (SEPs) can induce failures in electronic devices onboard our satellites. In addition to these bursts of radiation, the Sun emits a continuous flux of particles, which is called solar wind and mainly composed of protons and electrons.

2.3. *Terrestrial space environment*

The Earth's magnetic field traps some of the charged particles that comes from space, creating the Van Allen radiation belts. These belts contain high flux of protons and electrons, which is an additional risk for embedded electronics that fly through these regions. The Van Allen radiation belts, or radiation belts, are composed of two belts: the inner belt is composed of energetic protons and electrons, while the outer belt is mainly composed of electrons. During solar storms, radiation belts can expand, exposing then satellites to higher radiation levels [5,6].

2.4. Radiative environment in the atmosphere

When cosmic rays reach the top of the atmosphere, they interact with the nuclei of the atoms and produce secondary particles, which can penetrate deep into the atmosphere and even reach the ground level. While many kinds of particles are produced during these interactions (protons, electrons, muons, neutrons...), neutrons represent the main risk for electronic devices. Their flux varies with altitude. For example, the flux at ground level is known to be around $20 \text{ n/cm}^2/\text{h}$ and is 300 times higher at avionic altitude (typically 12 km).

3. Radiation effects on electronic devices

Radiation effects on electronic devices can be divided into three major categories: Total Ionizing Dose (TID), Displacement Damage (DD), and Single Event Effects (SEEs). Each type of damage impacts electronic devices differently.

3.1. Total Ionizing Dose (TID) effects

Prolonged exposure to radiation leads to a progressive degradation of the functionality of electronic components. This phenomenon, known as total ionizing dose (TID), results in an accumulation of charges in insulating materials such as silicon dioxide. As a result, transistors and electronic circuits lose performance and can become unusable [7].

To decrease the effects of TID, it is possible to use specific materials, hardening techniques and circuit designs that minimize the impact of radiation. For example, space electronics are manufactured using radiation-hardened transistors [8].

3.2. Displacement Damage (DD) effects

When particles interact with semiconductor material, they can knock atoms out of their sites, modifying the structure of the crystal and affecting the properties of the semiconductor. This process, known as Displacement Damage (DD), reduces the efficiency of semiconductor devices such as solar cells and image sensors [9].

Optoelectronic components, such as infrared detectors and fiber-optic communication systems, are particularly vulnerable to DD effects. To mitigate this damage more resistant semiconductors may be used such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) [10].

3.3. Single Event Effects (SEEs)

Unlike Total Ionizing Dose (TID) and Displacement Damage (DD), which result from cumulative exposure over time, Single Event Effects (SEEs) occur when a single particle strikes a sensitive region of a transistor [1,2,11]. This may lead to data corruption but also to catastrophic failures.

One of the most common SEEs is the Single Event Upset (SEU), when a charged particle deposits energy in a memory cell, leading to a bit flip (data corruption). For critical systems, this necessitates mitigation techniques such as error correction codes (ECC) and redundant memory architectures. Another type of SEE is the Single Event Latchup (SEL) [12], in which an ionizing particle triggers a parasitic thyristor, which creates a low-resistance path that can lead to a destructive short circuit. To prevent SEL, it is possible to use current-limiting circuitry and radiation-hardened design strategies.

Other catastrophic SEEs include Single Event Burnout (SEB) [13] and Single Event Gate Rupture (SEGR) [14] which affect power devices. SEB occurs when a high-energy particle induces excessive current in a power transistor, causing thermal runaway and permanent failure. SEGR, on the other hand, is the rupture of an insulating gate oxide layer due to excessive electric fields, leading to a non-recoverable breakdown of the component.

To improve electronic reliability in radiation-exposed applications, space agencies and industry conduct extensive testing under beam of particles. Techniques such as triple modular redundancy (TMR) and real-time error detection further enhance system robustness against SEEs. The continuous advancement in radiation-hardened materials and circuit design plays a crucial role in mitigating these effects.

4. The special case of single event effects

4.1. Monte Carlo simulations for SEU analysis

Single Event Upsets (SEUs) are one of the most concerning radiation effects in modern technologies, particularly in space and avionics applications. Because SEUs occur randomly when a particle ionizes a sensitive region of a semiconductor device, their prediction requires probabilistic methods. Monte Carlo simulations are widely used for estimating the SEU cross-section (a quantity that assess the sensitivity of the device) and predicting the Soft Error Rate (SER) of a given technology.

Monte Carlo methods are based on random numbers to model the interactions between radiation and matter of electronic devices. Instead of using deterministic equations to calculate SEU probabilities, these simulations generate thousands of millions of random particle interactions based on physical probability distributions. We can then obtain statistically significant estimates of SEU rates under a given radiation environment.

4.2. Typical Monte Carlo steps for SEU prediction

Many companies have developed their own Prediction tool in order to assess the reliability of a given device in a given environment. The good metric for such an assessment is the SEU cross section which gives the equivalent area of the device that is sensitive to radiation. These tools are always proprietary, and it is thus difficult to know exactly all the key ingredients that are inside. Very often, these tools are based on Monte Carlo approach, which basically includes the following steps:

- (1) Circuit definition: The user defines the circuit to be studied. It is composed of NMOS and PMOS transistors for which the parameters must be defined (gate length, gate width, supply voltage). Figure 1 shows an example of circuit definition for a 4-transistor SRAM cell.
- (2) Layout definition: The user defines the location of each transistor as well as its size (drains and sources width). Average doping may also be accounted for. Figure 2 shows an example of the layout associated with the SRAM cell (4 transistors).
- (3) Geometry definition: A basic structure is made of a bulk of silicon and a BEOL in silicon dioxide. The thickness of the bulk and that of the BEOL must be defined. In addition, the user must choose the direction of the beam of particles that will irradiate the device. Figure 3 shows an example of geometry in which the irradiated layout is embedded.
- (4) Parameters: The user chooses the type of particles between ions, neutrons and protons as well as the criteria for stopping the simulations (based on the accuracy and the fluence of particles simulated). Figure 4 shows a typical user interface for the beam parameters.

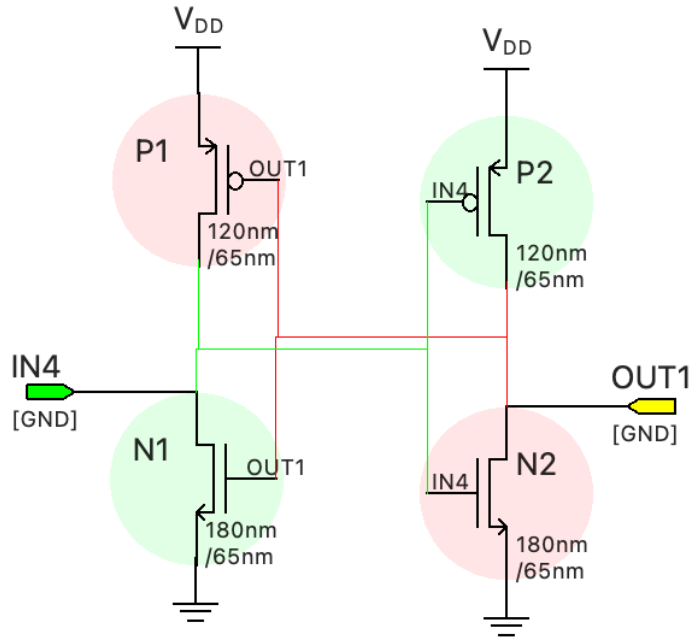


Figure 1. Example of circuit definition of an SRAM Cell with no access transistors. Green disks indicate the ON transistors (no sensitivity to SEU). Red disks indicate the OFF transistors (sensitivity to SEU).

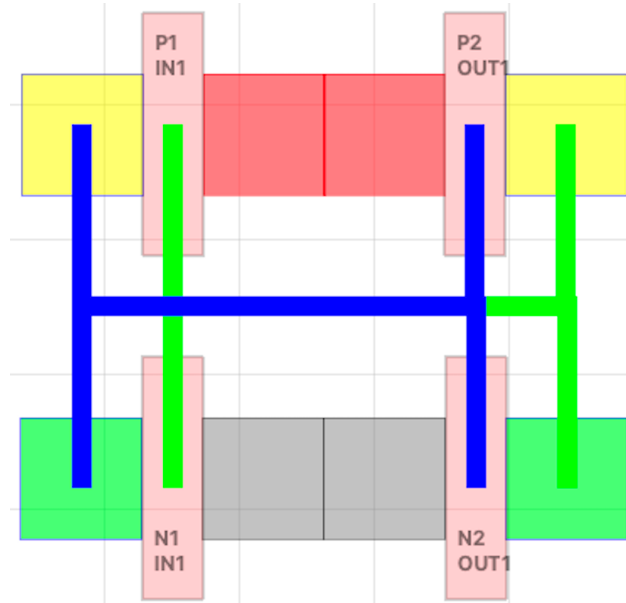


Figure 2. Example of layout definition of an SRAM Cell with no access transistors. Pink boxes indicate the gates. Red boxes are electrodes connected with power supply (V_{DD}). Grey boxes indicate electrodes connected to ground. Yellow boxes are other PMOS electrodes. Green boxes are other NMOS electrodes.

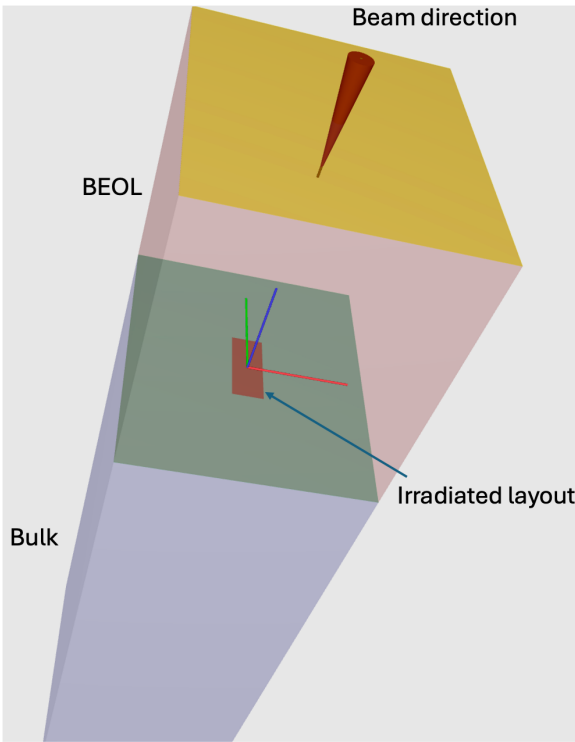


Figure 3. Example of geometry definition indicating the irradiated layout and the beam direction.

SEE of interest

☒ SEU
☐ SET

Incident particles

☐ Ions
☒ Neutrons
☐ Protons ☐ Direct ionization only
☐ Laser

Criteria for stopping simulation

Monte Carlo Accuracy
Fluence to reach

Output

☐ save currents ☐ save voltages
Comparison file

NoComparisonFile

Particles to be simulated

☒ 1 MeV
☒ 2 MeV
☒ 3 MeV
☒ 4 MeV
☒ 5 MeV
☒ 7 MeV
☒ 10 MeV
☒ 14 MeV
☒ 20 MeV
☒ 25 MeV
☒ 35 MeV
☒ 50 MeV
☒ 100 MeV
☒ 150 MeV
☒ 180 MeV
☒ 200 MeV
☒ Check all

Figure 4. Typical parameter interface of a predictive Monte Carlo tool.

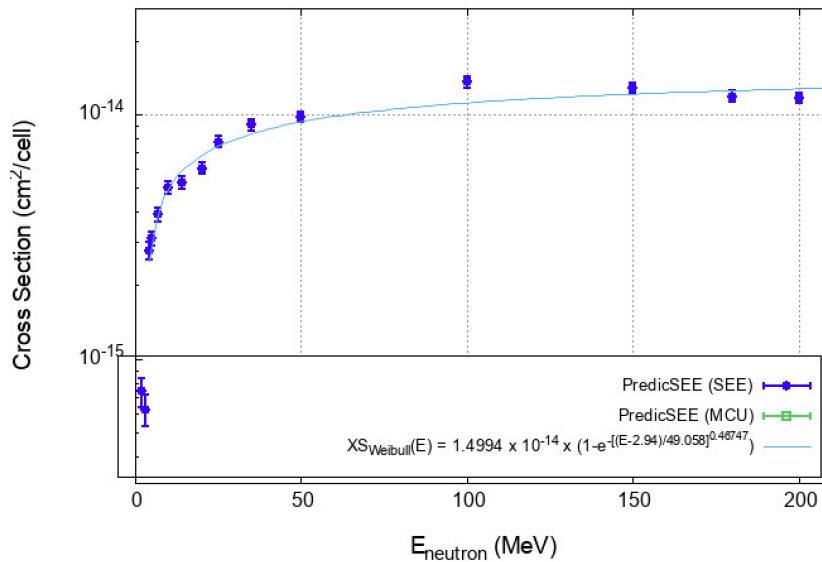


Figure 5. Typical results obtained with a Monte Carlo predictive tool. The cross section represents the sensitivity of the device to particles (here neutrons). Dots are simulation points, and the line is a fit with a Weibull shape, generally used to this purpose.

(5) Running: Once all previous steps are achieved, the simulation may be run. The tool graphically shows the cross section of SEU as a function of stopping power (for ions) or energy (for neutrons and protons). At the beginning of the simulation, due to poor statistic, results do not seem consistent. Then, with the increasing number of events that are simulated, the curve converges toward a result (an example is provided in Figure 5). It shows an increase in the cross section, which indicates that the sensitivity of the device increases with neutron energy and reaches a plateau above a few tens of MeV. The cross-section value is in the order of 10^{-14} cm²/bit. It means that the SEU will be triggered if the neutron reaches this area. The probability of such an event seems to be very low, and it is. Indeed, knowing that the flux of neutrons at ground level is around 20 n/cm²/h, we should expect 2×10^{-13} SEU per hour. However, this is the sensitivity associated with a single bit, while memories are often composed of Gbit. Additionally, if we consider avionics applications, the number of SEU is multiplied by a factor of 300 compared to ground level. For example, a 1 GBytes memories in a commercial flight will undergo 1 SEU every 2 h of flight at 12 km of altitude.

4.3. Key assumptions and limitations of Monte Carlo methods

Monte Carlo simulations, while highly useful for predicting Single Event Upsets (SEUs), rely on certain assumptions that can impact their accuracy. For example, in some tools, one key assumption is the modeling of the sensitive region within the semiconductor device. In many simulations, the volume of this region is approximated using simplified geometric shapes, such as rectangular parallelepipeds, which may not fully represent the actual charge collection and does not provide any information about the time dependence of the process. Another critical factor is the choice of nuclear reaction models, which determine how incident particles interact with semiconductor. The accuracy of SEU predictions strongly depends on the nuclear physics used. Additionally, modern semiconductor devices exhibit charge sharing between neighboring transistors, leading to multiple cell upsets (MCUs). While some Monte Carlo methods attempt to

incorporate charge-sharing effects, accurately capturing these phenomena remains a challenge due to the complexity of semiconductor physics. Despite these limitations, Monte Carlo simulations remain one of the most effective tools for understanding SEU behavior, provided that their assumptions are well-calibrated against experimental data.

4.4. Advantages of Monte Carlo SEU simulations

Monte Carlo-based simulations have become indispensable for assessing the vulnerability of electronic components to radiation-induced SEUs. One of their major advantages is cost reduction, as they lower the need for extensive physical testing in radiation facilities, which are expensive and time-consuming. Additionally, Monte Carlo methods allow to simulate different conditions without requiring physical hardware modifications. This is particularly useful for space applications, where predicting SEU rates under varying solar and galactic cosmic ray conditions is essential. Another key benefit is scalability: as semiconductor technology advances, device structures become increasingly complex, making traditional testing methods less practical. Also, Monte Carlo simulations enable to analyze new materials and transistor architectures efficiently. The continued refinement of these simulation tools, combined with experimental validation, makes them an essential tool for space agencies, semiconductor manufacturers, and avionics engineers working on radiation-hardened electronics.

5. Conclusion

The study of radiation effects on electronic devices is critical for ensuring the reliability of modern technology, particularly in space, avionics, and high-altitude applications. The natural radiative environment, composed of galactic cosmic rays, solar radiation, and trapped particles in the Earth's magnetosphere, presents significant challenges for electronic components. These radiation sources can induce a range of failures, such as Total Ionizing Dose (TID), Displacement Damage (DD) and Single Event Effects (SEEs).

Among SEEs, Single Event Upsets (SEUs) pose a unique challenge due to their stochastic nature. Understanding and predicting SEUs require sophisticated modeling techniques, and Monte Carlo-based simulations have emerged as powerful tools in this domain. These simulations allow to assess the probability of SEUs under various radiation conditions, evaluate the sensitivity of devices, and optimize mitigation techniques. Despite certain assumptions and limitations, Monte Carlo methods provide a complementary tool to extensive radiation testing, making them a crucial resource for industries.

As technology advances and transistor sizes continue to shrink, the susceptibility of electronic devices to radiation-induced failures is expected to increase. This trend underscores the importance of continued research in radiation effects modeling, error correction techniques, and hardened circuit design. Future developments in Monte Carlo-based prediction tools, coupled with experimental validation, will be crucial for developing next-generation electronics capable of withstanding the ever-present challenges of radiation exposure in critical applications.

Declaration of interests

The author does not work for, advise, own shares in, or receive funds from any organization that could benefit from this article, and has declared no affiliations other than their research organization.

References

- [1] P. E. Dodd and L. W. Massengill, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** (2003), no. 3, pp. 583–602.
- [2] R. C. Baumann, "Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies", *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.* **5** (2005), no. 3, pp. 305–316.
- [3] P. Blasi, "The origin of galactic cosmic rays", *Astron. Astrophys. Rev.* **21** (2013), article no. 70.
- [4] E. N. Parker, "Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields", *Astrophys. J.* **128** (1958), pp. 664–676.
- [5] D. N. Baker and M. I. Panasyuk, "Discovering Earth's radiation belts", *Phys. Today* **70** (2017), no. 12, pp. 46–51.
- [6] J. A. Van Allen, "The geomagnetically trapped corpuscular radiation", *J. Geophys. Res.* **64** (1959), pp. 1683–1689.
- [7] E. R. Benton and E. V. Benton, "Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **184** (2001), no. 1–2, pp. 255–294. ISSN 0168-583X.
- [8] G. C. Messenger and M. S. Ash, "Single event upset error rates", *Single Event Phenomena*, Springer: Boston, MA, 1997.
- [9] J. R. Srour, C. J. Marshall and P. W. Marshall, "Review of displacement damage effects in silicon devices", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** (2003), no. 3, pp. 653–670.
- [10] A. H. Johnston, "Radiation effects in optoelectronic devices", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** (2013), no. 3, pp. 2054–2073.
- [11] A. Taber and E. Normand, "Single event upsets in avionics", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **528** (1993), pp. 120–125.
- [12] E. Normand, "Extensions of the FOM method-proton SEL and atmospheric neutron SEU", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** (2004), no. 6, pp. 3494–3504.
- [13] A. F. Witulski, D. R. Ball, K. F. Galloway, A. Javanainen, J.-M. Lauenstein and A. L. Sternberg, "Single-event burnout mechanisms in SiC power MOSFETs", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** (2018), no. 8, pp. 1951–1955.
- [14] G. K. Lum, H. O'Donnell and N. Boruta, "The impact of single event gate rupture in linear devices", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** (2000), no. 6, pp. 2373–2379.

Comptes Rendus

Mécanique

Objet de la revue

Les *Comptes Rendus Mécanique* sont une revue électronique évaluée par les pairs de niveau international, qui couvre l'ensemble des domaines des sciences mécaniques.

Ils publient des articles originaux de recherche, des articles de synthèse, des mises en perspective historiques, des textes à visée pédagogique, ou encore des actes de colloque, en anglais ou en français, sans limite de longueur et dans un format aussi souple que possible (figures, données associées, etc.).

Depuis 2020, les *Comptes Rendus Mécanique* sont publiés avec le centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte, selon une politique vertueuse de libre accès diamant, gratuit pour les auteurs (pas de frais de publication) comme pour les lecteurs (accès libre, immédiat et pérenne).

Directeur de la publication : Étienne Ghys.

Rédacteurs en chef : Samuel Forest.

Comité éditorial : Olga Budenkova, Francisco Chinesta, Francisco dell'Isola, Florian Gosselin, Jean-Baptiste Leblond, Éric Lemarchand, Bruno Lombard, Nicolas Moës, Léo Morin, Benoît Perthame, Guillaume Ribert, Géry de Saxcé, Emmanuel Villermaux.

Secrétaire éditoriale : Adenise Lopes.

À propos de la revue

Toutes les informations concernant la revue, y compris le texte des articles publiés qui est en accès libre intégral, figurent sur le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Informations à l'attention des auteurs

Pour toute question relative à la soumission des articles, les auteurs peuvent consulter le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/mecanique/>.

Contact

Académie des sciences
23, quai de Conti, 75006 Paris, France
Tel: (+33) (0)1 44 41 43 72
cr-mecanique@academie-sciences.fr

To cite this issue:

Bruno Chanetz (ed.). L'abbé Bertholon : sa vie, son œuvre et ses successeurs au XXI^e siècle.

Comptes Rendus Mécanique, 2026. <https://doi.org/10.5802/crmeca.sp.3>.



The articles in this journal are published under the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

Comptes Rendus de l'Académie des sciences

Mécanique

L'abbé Bertholon : sa vie, son œuvre et ses successeurs au XXI^e siècle /
Abbé Bertholon: his life, his work ad his successors in the 21th century

Table des matières

*Merci de noter que les numéros de page indiqués sont ceux du fichier électronique du numéro.
Chaque article possède par ailleurs sa propre pagination, en lien avec sa date de publication.*

En hommage à l'abbé Bertholon <i>Bruno Chanetz</i>	3-5
L'abbé Bertholon, un électricien des Lumières à Montpellier <i>Antoine E. Simon; Laurent François; Marc Massot</i>	7-11
Le Montpellier scientifique du XVIII^e siècle <i>Thierry Lavabre-Bertrand</i>	13-22
Le foudroiement des avions : compréhensions, impacts et protection <i>Philippe Lalande</i>	23-49
Apports du fluide électrique sur les systèmes aérospatiaux <i>Paul-Quentin Elias</i>	51-65
From electroculture to plasma agriculture: a three-century arc bridging Bertholon's legacy with contemporary farming advances <i>Thierry Dufour</i>	67-94
At the origins of electroculture: a retrodictive modelling of Bertholon's 18th-century electrovegetometer in the pre-corona regime <i>Thierry Dufour</i>	95-117
La face cachée des orages <i>Serge Soula</i>	119-132
An introduction to natural radiations and their detrimental effects on electronic devices <i>Frédéric Wrobel</i>	133-141

Illustration de couverture : Extrait partiel et retouché de la planche n° 1 de l'ouvrage *De l'électricité des végétaux* de l'abbé Bertholon, Lyon : Bernuset, 1783. [Source](#) : BU Lyon 1, cote BU 46168, domaine public.

En médaillon : un éclair pendant un orage, domaine public.