

MÉCANISMES PHYSIQUES DU NUAGE D'ORAGE ET DE L'ÉCLAIR *THE PHYSICS OF THUNDERCLOUD AND LIGHTNING DISCHARGE*

Foreword

It has been two hundred and fifty years since Benjamin Franklin identified the electrical nature of lightning, clarified the idea of electric charge and proposed an immediate application of his discoveries; namely, the lightning rod. Since that time, the field of atmospheric electricity has continually adapted to new challenges and opportunities posed by evolving needs for applications. Thus, lightning constitutes an inevitable and frequent hazard from which we must protect the newest and often most vulnerable technologies, such as numerical flight control systems, telecommunication and energy distribution networks. At the same time, new insights into the links between atmospheric electrical activity and storm systems provide potential tools for strengthening and expanding numerical weather and climate prediction models.

This huge range of potential applications, however, is hindered to some extent by fundamental questions that remain and issues that are not fully understood. These gaps in our understanding of lightning are due on the one hand to the obvious difficulties in obtaining in situ data, and on the other, to the fact that the phenomena to be studied involve many fields of physics (from the dynamics and microphysics of clouds to remote sensing of physical parameters of lightning to the physics of plasmas at a range of temperatures and pressures) and they occur on scales ranging from microns to hundreds of kilometers.

In spite of these formidable challenges, the field of atmospheric electricity has made enormous strides over the past two decades, building on significant advances in related fields. We have new experimental tools, satellite observations, expanded capabilities for computation of spatially and temporally varying electromagnetic radiation fields, and new laboratory microphysical measurements. Progress in numerical techniques has permitted the development of quantitative models that simulate the microphysical processes involved in initiation and the development of thunderclouds and lightning strokes themselves.

The focus for this special volume of the *Comptes Rendus of Physics* is on modelling; we describe the state of the art of the subject in a series of papers based in part on a special workshop held at the Office d'Etudes et Recherches Aérospatiales on November 5, 2001. This Onera Scientific Day was organized under the leadership of Pierre Laroche, President of the International Commission on Atmospheric Electricity and Deputy Director of the Instrumentation and Sensing Department at Onera. The guest editors wish to express their gratitude for his help and support.

The contributions in this volume address the following important scientific issues that motivate current research in this field.

- The mechanisms necessary for the electrification of thunderstorms must be known in order to establish the link between meteorological and electrical parameters in the storms. These processes are examined in the papers by E. Williams and S. Stanfill (from an observational point of view) and by G. Molinie et al. (via a new mesoscale model of the evolution of an electrified convective system).
- Noninductive charge transfer between colliding ice particles, a dominant early electrification mechanism in thunderclouds, results from physical mechanisms analysed in a microphysical model by M. Baker and J. Nelson. Identification of the threshold conditions for lightning initiation in a relatively weak ambient electric field remains a controversial issue, treated by R. Solomon et al., who examine the two major hypotheses for lightning initiation; one involving corona initiated in the vicinity of hydrometeors and the other, initiation by very energetic 'runaway' electrons.

- A complete model of the post-initiation development of a lightning stroke, which would include its instabilities and the conditions for cutoff and/or branching of the lightning path, remains a goal for the future despite undeniable recent progress. The contributions of I. Gallimberti et al. and by F. Vidal et al. utilize laboratory results on the physics of long sparks to identify the basic mechanisms involved. Translation of this understanding to actual lightning requires consideration of the nonlinear aspects of the processes, and forms the basis of the physical descriptions and numerical models described in the contributions of V. Mazur and of P. Lalande et al.
- Stratospheric discharges, which are spectacular displays of a multitude of forms at very high latitude (and thus at low pressure) have been analyzed and modelled in detail in the contribution by U. Inan.
- This volume would not be complete without some discussion of the impacts of lightning strikes on flying objects and on objects at the ground. Although this topic is not examined in depth in this issue, the contribution of A. Larssen nevertheless summarizes in detail the present understanding of the mechanisms of interactions between lightning and an aircraft in flight.

Constraints on space in this special volume have not permitted inclusion of certain important topics, including the current and future state of observations of electrical phenomena from space, electrical effects on atmospheric chemistry (in particular production of NO_x by lightning), analysis of intense electromagnetic impulses associated with lightning, lightning from volcanism and lightning on distant planets. However, these lacunae themselves give an idea of the variety and dynamic nature of a scientific domain rich in very old mysteries and open to new ones.

Avant-propos

Il y a deux cent cinquante ans, Benjamin Franklin identifiait la nature électrique de la foudre, précisait la notion de charge électrique et proposait une application immédiate de ses découvertes : le paratonnerre. Les lointains successeurs de Franklin demeurent fidèles à sa démarche et ne s'écartent jamais d'une physique appliquée dont les questionnements s'adaptent sans cesse aux évolutions technologiques. Ainsi, on s'attache donc aujourd'hui à protéger de ce phénomène fréquent et inévitable les technologies les plus récentes, parfois les plus vulnérables : commandes numériques de vol, réseaux de télécommunications ou de transport d'énergie, etc. Parallèlement, l'arsenal complexe de la prévision météorologique et/ou climatologique cherche à bénéficier des nouveaux outils que constituent la détection ou la modélisation de l'activité électrique associée aux systèmes convectifs.

Face à ce vaste champ d'applications, de nombreuses questions demeurent encore sans réponse, ces zones d'obscurité étant dues, d'une part, à d'évidentes difficultés d'accès expérimental, et, d'autre part, au caractère multi-physique et multi-échelle des phénomènes étudiés. Il s'agit en effet de parcourir une large variété de disciplines, depuis la physique de l'atmosphère questionnant les processus dynamiques et microphysiques à l'œuvre dans le nuage, jusqu'à l'électromagnétisme, outil d'évaluation à distance des paramètres physiques de l'éclair, en passant par la physique des plasmas dans divers domaines de température et de pression. A cette complexité phénoménologique s'ajoute une complexité dimensionnelle puisque s'y manifestent des processus à l'échelle de la dizaine de microns mais aussi des équilibres établis sur quelques dizaines de km.

Malgré tout, le domaine de l'électricité atmosphérique a bénéficié au cours des deux dernières décennies d'avancées incontestables soutenues par :

- *le développement de nouveaux moyens expérimentaux : observations satellitaires, techniques d'analyse spatio-temporelle du rayonnement électromagnétique, expériences de microphysique en laboratoire, etc.*
- *les progrès des techniques numériques qui ont permis la mise en œuvre de modèles quantitatifs simulant l'initiation et le développement du nuage d'orage et de l'éclair lui-même.*

C'est plus spécifiquement autour de ce thème de la modélisation qu'a été réalisé ce numéro spécial des Comptes Rendus de Physique, qui propose un état de l'art du domaine, élaboré à partir d'un séminaire tenu à l'Office d'Etudes et Recherches Aérospatiales, le 5 novembre 2001. Cette Journée Scientifique Onera a été

organisée avec le parrainage de Pierre Laroche, président de l'ICAE et directeur adjoint du Département Mesures Physiques de l'Onera. Nous tenons à lui exprimer tous nos remerciements pour son aide et son soutien.

Dans la diversité des contributions proposées ici on retrouvera un certain nombre de questions décisives qui structurent les recherches actuelles.

- Les mécanismes nécessaires à l'apparition du champ électrique dans le nuage sont indispensables pour établir le lien entre paramètres météorologiques et électriques d'un système convectif. Ces processus sont éclairés par les contributions respectives de E. Williams et S. Stanfill (dans une approche observationnelle), de M. Baker et J. Nelson (proposant une analyse des mécanismes physiques régissant une collision entre hydrométéores) et de G. Molinié et al. (décrivant un nouveau modèle méso-échelle de l'évolution d'un système convectif électrisé).
- L'identification des conditions seuil d'amorçage de l'éclair dans un champ électrique moyen apparemment faible demeure encore sujet à controverse comme le rappelle R. Solomon qui examine les deux grandes théories en présence, faisant intervenir soit les hydrométéores, soit des électrons très énergétiques, dits « runaway ».
- Au delà du processus d'initiation, un modèle complet du développement de l'éclair incluant ses instabilités, ses conditions d'arrêt ou de branchement demeure un objectif à moyen terme, malgré des progrès indéniables. Les contributions de I. Gallimberti et al., et de F. Vidal et al. montrent comment la physique des arcs longs de laboratoire a permis d'opérer une étude sélective des mécanismes de base. La transposition de ces connaissances à l'éclair proprement dit doit d'examiner l'effet de la non-linéarité des processus et structure les descriptions physiques et les modélisations numériques décrites par les contributions de V. Mazur et de P. Lalande et al. Enfin, les décharges stratosphériques, objets spectaculaires et multiformes formés à très haute altitude et donc à basse pression, sont maintenant analysées et modélisées de façon très approfondie comme le montre la contribution de U. Inan.
- Ce numéro ne pouvait ignorer l'abondance d'études spécifiquement dédiées à l'analyse du foudroissement d'un objet en vol ou d'une structure au sol. Faute d'aborder ce domaine de façon exhaustive, la seule contribution d'A. Larsson permet cependant de faire le point de façon très complète sur notre compréhension du mécanisme d'interaction entre l'éclair et un avion en vol.

Le volume et la thématique de ce numéro spécial n'a pas permis d'aborder certaines questions essentielles : l'actualité et l'avenir des observations depuis l'espace, l'effet de l'activité électrique sur la chimie atmosphérique via la production d'oxydes d'azote, l'analyse des composantes impulsives intenses du champ électromagnétique rayonné par l'éclair, etc. Mais ces lacunes elles-mêmes donnent la mesure de la variété et du dynamisme d'un domaine scientifique riche de très anciennes curiosités et ouvert à de nouveaux objets, éclair mêlés aux éruptions volcaniques ou traversant de lointaines atmosphères planétaires.

Marcia B. Baker
Depts of Earth and Space Science and Atmospheric Sciences
University of Washington
Seattle, WA 98195-1310, USA

Anne Bondiou-Clergerie
ONERA
DSAC/SO
29, avenue de la Division Leclerc
92322 Châtillon, France