

J. LILENSTEN • F. PITOUT  
M. GRUET • J.P. MARQUES

Préface d'**Alain Cirou**

A night landscape featuring a town with illuminated buildings and a dark wooden cabin in the foreground. In the background, there are mountains under a dark sky filled with stars and a vibrant, multi-colored aurora borealis (Northern Lights) in shades of green, purple, and blue.

# *Météorologie de l'espace*

**VIVRE DEMAIN  
AVEC NOTRE SOLEIL**

deboeck **B**  
SUPÉRIEUR



# **Météorologie de l'espace**

## Dans la même collection :

*Chasseur de comètes*, Michel Ory, 192 pages

*L'IA peut-elle penser ?*, Hubert Krivine, 128 pages

*Les exoplanètes*, Flavien Kiefer, 208 pages

*Transition énergétique*, Bertrand Cassoret, 160 pages

*Les trous noirs. À la poursuite de l'invisible*, 2<sup>e</sup> édition, Alain Riazuelo,  
208 pages

*Le climat dans tous ses états*, Pierre Martin, 192 pages

*Pourquoi le nucléaire*, Bertrand Barre, 176 pages

*Initiation à la physique quantique. La matière et ses phénomènes*, Valerio  
Scarani, 192 pages

*L'univers secret de la cryptographie*, Gilles Dubertret, 176 pages

*La matière noire. Clé de l'Univers ?*, Françoise Combes, 192 pages

*Constellations et légendes grecques*, Marie-Françoise Serre, 224 pages

*La météo à l'origine de tous nos maux ?*, Jacques Fontan, 160 pages

Jean Lilensten, Frédéric Pitout,  
Marina Gruet, João Pedro Marques

# Météorologie de l'espace

## Vivre demain avec notre Soleil

*Préface d'Alain Cirou*

**Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :  
[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)**

En couverture : Lumières du nord au Groenland © Greenland Travel / Creative Commons – Attribution 2.0 Generic – CC BY 2.0.

Conception couverture : Primo&Primo

Relecture : Alain Rossignol

Mise en page : SCM, Toulouse

Dépôt légal :

Bibliothèque royale de Belgique : 2021/13647/023

Bibliothèque nationale, Paris : mars 2021

ISBN : 978-2-8073-3306-2

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2021 – Rue du Bosquet 7, B1348 Louvain-la-Neuve  
De Boeck Supérieur – 5 allée de la 2<sup>e</sup> DB, 75015 Paris

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	VIII
<b>Préface</b> .....	IX
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 1</b>	
<b>Le temps des interrogations</b> .....	5
L'électricité et le champ magnétique.....	5
Atmosphère et aurores .....	15
Le Soleil .....	34
Les prémices .....	41
<b>Chapitre 2</b>	
<b>Le temps de la découverte de notre espace</b> .....	43
Découverte d'une couche atmosphérique conductrice d'électricité : l'ionosphère .....	43
Émergence d'une nouvelle notion et d'une nouvelle physique : le plasma .....	48
Nomenclature des couches atmosphériques et ionosphériques .....	56
Les prémices de l'ère spatiale en France et en Europe .....	58
La physique du Soleil.....	62
Le spectrohéliographe .....	66
Le coronographe .....	67
Le problème de l'énergie du Soleil .....	69
<b>Chapitre 3</b>	
<b>Le temps de la complexité</b> .....	71
L'Année géophysique internationale .....	71

La chasse à la ceinture de radiations .....	73
La magnétosphère et le vent solaire se révèlent .....	76
La magnétosphère est-elle fermée ou ouverte ? .....	79
■ La dynamique de la magnétosphère .....	80
■ La reconnexion magnétique .....	83
■ Orages géomagnétiques et sous-orages magnétosphériques .....	85
L'anomalie de l'Atlantique Sud .....	86
Une haute atmosphère dynamique .....	87
Variabilité des aurores polaires .....	87
Variabilité des lueurs du ciel nocturne .....	89
Le rayonnement cosmique .....	90
Instrumentation spatiale et mission multisatellite .....	92
Instrumentation au sol .....	97
Les magnétomètres .....	98
La diffusion incohérente .....	99
La diffusion cohérente .....	104
La mesure du contenu électronique total .....	105
La mesure optique .....	106
Les moniteurs à neutrons .....	107
Le Soleil dynamique .....	109
Premières missions spatiales d'observation du Soleil .....	110
Ulysses .....	113
La mission SoHO .....	114
Résultats saillants .....	117
La mission STEREO .....	124
Les observatoires solaires au sol .....	125

## Chapitre 4

<b>Le temps des impacts</b> .....	129
Impact sur les satellites artificiels .....	130
Les débris spatiaux .....	136
Le positionnement .....	139
L'électronique embarquée .....	140
Les télécommunications HF, les radars trans-horizon .....	141
Centrales électriques .....	142
La prospection pétrolière .....	143
L'aviation .....	145
Activité solaire et climat .....	147
Le pire des cas : doit-on craindre la météorologie de l'espace ? .....	157

## Chapitre 5

<b>Le temps de la prévision</b> .....	163
Indices d'activité .....	164
De la donnée à la prévision : le rôle clé de la modélisation .....	169
■ La modélisation pour interpréter les observations ou pour simuler l'inobservable .....	170
Corrélation et causalité .....	173
■ L'évolution de la modélisation de l'interaction Soleil-Terre .....	175
■ Une nouvelle approche : l'intelligence artificielle .....	177
Au cœur des modèles de prévision : la donnée .....	184
De la donnée à la prévision : les centres opérationnels .....	188
<b>Conclusion</b> .....	195
<b>Bibliographie</b> .....	203
<b>Sitographie générale</b> .....	209
Centres de météorologie de l'espace .....	209
Ressources complémentaires aux centres de météorologie de l'espace .....	210
Quelques instruments cités dans cet ouvrage .....	211
<b>Index des auteurs</b> .....	213
<b>Index des sujets</b> .....	217

■ Avertissement : Les parties marquées par un carré (et bordées d'un liseré dans le corps du livre) sont d'un niveau de lecture plus soutenu. Elles peuvent être sautées sans nuire à la compréhension de l'ensemble de l'ouvrage.

# Remerciements

---

Le chapitre 4 sur les impacts de la météorologie doit beaucoup à l'aide de Kader Amsif, qui nous a fourni les documents du CNES donnant les chiffres relatifs aux débris spatiaux. Nous remercions également Denis Bousquet, *Global Chief Technical Officer and Space Underwriting* chez AXA XL pour avoir accepté de nous communiquer quelques-uns des chiffres sur l'assurance spatiale. Une partie de ce qui concerne le climat a été préparée en collaboration avec Thierry Dudok de Wit, professeur à l'université d'Orléans et chercheur au LPCEE. Nous le remercions de son aimable autorisation. Le chapitre 5 doit beaucoup au témoignage du major Lionel Birée, que nous remercions également.

Nous tenons à remercier nos amis collègues et étudiants qui ont accepté de nous fournir gracieusement des illustrations : le plus grand photographe d'éclipses solaires, Jean Mouette /IAP-CNRS-SU; l'un des plus brillants jeunes astrophotographes, Maxime Tessier; Mike Rietveld, responsable de la section chauffage du consortium EISCAT; Aude Chambodut sans qui la France ne brillerait pas si fort dans l'expertise magnétique; les étudiants qui nous ont accompagnés en mission polaire; Anne Vialatte et Eliott Curaba. Un merci spécial et chaleureux à Cyril Simon Wedlund pour son accompagnement et ses photographies.

# Préface

---

Entre le 2 et le 4 août 1972, vers la fin de la guerre du Vietnam et entre deux vols spatiaux remarquables, ceux d'Apollo 16 et Apollo 17, un groupe de taches solaires baptisé *McMath Region 11976* produit une série de flashes très intenses. De violentes éruptions, dans la ligne de visée de la Terre, sont observées à la surface de notre étoile. Et le 4 août, une tempête de particules issue d'une éruption surpuissante heurte notre globe. Le ciel s'allume de draperies incandescentes; de spectaculaires aurores polaires éclairent l'Amérique du Nord et l'Europe, jusqu'en Espagne. La tempête provoque de nombreux incidents dans les réseaux électriques et de communication des États-Unis et du Canada. Et, plus surprenant, le tsunami de particules solaires déclenche la détonation simultanée et spontanée d'au moins deux douzaines de mines marines américaines dans le golfe du Tonkin. Conçues pour exploser aux abords des ports du Nord-Vietnam quand la grande masse métallique d'un bateau passe à proximité, elles ont été leurrées par un signal émis à... 150 millions de kilomètres de là.

Loin d'être la plus violente de toutes les manifestations observées sur le Soleil depuis quatre siècles – à partir de l'invention de la lunette –, cet aléas marque tous les chroniqueurs des événements célestes, pour une bonne raison : si, au même moment, des astronautes étaient partis pour la Lune, qu'ils aient été dans leur capsule ou à la surface de notre satellite naturel, ils auraient été irradiés et ne seraient sans doute jamais revenus vivants. Les calculs montrent que les doses d'irradiation reçues auraient été semblables à celles enregistrées lors de l'accident de l'usine de retraitement de Tokaimura, qui a eu lieu au Japon le 30 septembre 1999, où les normes acceptées pour ces radiations ont été dépassées de 4 000 fois, et qui a fait deux morts et un blessé grave.

Le Soleil, la Terre et la Lune, mais aussi l'espace ont besoin qu'on pose eux un nouveau regard. Depuis quelques décennies, nous vivons, sans aucun doute, une révolution majeure. Cinq siècles après les voyageurs de la Renaissance partis cartographier les *terrae incognitæ* du Nouveau Monde, et cinq siècles, toujours, après la révolution copernicienne qui a délogé la Terre du centre de l'Univers d'alors, de nouvelles explorations et des découvertes scientifiques majeures nous obligent à penser le monde autrement. Comme Kepler le fit en fiction dans *Le Songe*, les récits des hommes sur la Lune et leurs photos de la Terre vue de loin nous ont transportés dans un ailleurs hostile, stérile et désolé, où la seule vue rassurante est celle d'une petite boule bleue suspendue dans un ciel noir. Vaisseau spatial de l'Humanité, mais aussi de toutes les vies qu'elle héberge et protège, cette planète-là est bien plus complexe que nous l'imaginions. Et surtout, elle est en constante interaction avec ses éléments naturels et son environnement. Ce livre, *Météorologie de l'espace*, en est une formidable démonstration.

À l'image du temps vu par saint Augustin – « Qu'est-ce que le temps ? Quand on ne me le demande pas, je le sais ; mais dès qu'on me le demande et que je tente de l'expliquer, je ne le sais plus » –, pour un large public, la définition de l'espace est souvent confuse. Il est confondu avec son exploration habitée – ridiculement proche et très souvent propagandiste –, avec son utilisation satellitaire – pour des services de communication, de météo, pour l'observation civile et le renseignement militaire – ou encore avec l'idée d'un ailleurs infini, parfois effrayant, souvent fantasmé et régulièrement détourné. L'espace dont il est question dans les pages qui suivent, est le fruit d'une histoire dont les auteurs – tous scientifiques passionnés et avides de comprendre la complexité du monde – nous racontent combien il fut long et difficile d'en prendre la mesure. Quatre siècles d'histoire des sciences qui embrassent de nombreux champs et voient émerger une discipline originale, la météorologie de l'espace, dont les enjeux récents ne sont pas encore suffisamment connus.

Nous constituons sans aucun doute une civilisation solaire, dont l'avenir, si nous réussissons à traverser les multiples crises globales qui s'annoncent, dépendra de la source d'énergie qui a permis à la vie de s'établir et de prospérer sur cette planète depuis 4 milliards d'années, celle du Soleil, une étoile parmi des milliards de milliards d'autres. Tous

parents, mais tous différents, les humeurs de ces lampions nucléaires autorisent – ou non – une vie stable et pérenne dans les « zones d’habitabilité ». Et nous nous sommes habitués, tout jeunes et nouveaux que nous sommes, à bénéficier d’une heureuse constance de l’activité solaire. Las, nos progrès scientifiques et techniques fulgurants nous ont aussi rendus spatio-dépendants. Les flux de données qui alimentent nos sociétés gavées d’informations, nos échanges, notre sécurité et bientôt nos milliards d’objets connectés peuvent être coupés si de violentes tempêtes solaires viennent à endommager ou à détruire ces réseaux mondialisés. Tout le monde comprend donc l’intérêt de la prévision, de la prévention, et mesure la nécessité de mettre en place des systèmes d’alerte chargés d’éviter un black-out total dont l’impact serait considérable.

Mais l’intérêt de la météorologie de l’espace n’est pas seulement utilitaire. Elle participe aussi à cette redécouverte d’une Terre que nous croyons bien connaître. D’une planète que nous devons habiter autrement, au risque de disparaître, en en comprenant la complexité, les zones d’ombre, la variabilité de ses frontières, l’interdépendance avec son étoile, bref, en pénétrant au cœur d’une science en marche, guidés par d’infatigables explorateurs. Dont le désir de partage est ardent comme un joyeux rayon de soleil !

Alain Cirou





Crédit : Cyril Simon Wedlund, IPAG-CNRS / IWF-Graz, Autriche.



# Introduction

---

La *météorologie de l'espace* est une discipline récente, à l'interface entre l'astrophysique et la géophysique, ainsi qu'entre la recherche fondamentale et la prévision opérationnelle pour de nombreuses applications industrielles, publiques, civiles ou militaires. Elle vise à prévoir les variations de l'activité solaire, et à quantifier leurs effets sur l'environnement spatial et sur notre monde technologique. L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) l'a classée en 2011 parmi les cinq risques planétaires, à l'égal des risques financiers systémiques, des cyberrisques, des troubles sociaux et... des pandémies.

Pourtant, elle est encore mal connue du grand public. Le propos de ce livre est de pallier cette méconnaissance, non pour rajouter du stress à un monde déjà hautement anxiogène, mais pour informer et partager. Au cours des dernières décennies, nous avons considérablement reculé les bornes de notre environnement. Nous les avons repoussées jusqu'au Soleil lui-même. Et nous avons appris que nous sommes, à bien des égards, tributaires de ses sursauts.

Jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la physique cantonnait les sources d'énergie du Soleil à de la chimie, essentiellement celle du charbon. Elle expliquait également que la « force<sup>1</sup> » centrifuge compensait la force de gravité à quelques kilomètres d'altitude, au-dessus desquels il ne pouvait plus y avoir d'atmosphère, mais peut-être un éther sur lequel « s'appuyait » la lumière pour se propager. Les caractéristiques de cet éther étaient peu contraintes et peu connues. Pourtant, des interrogations apparaissaient çà et là. Les premiers sondages à haute altitude contredisaient les prévisions, et la détermination de l'altitude des aurores polaires

---

1. Nous reviendrons sur les raisons d'entourer de guillemets le mot *force* s'agissant de la centrifuge.

montrait qu'il existait quelque chose de dynamique au-dessus de cent kilomètres. De quoi pouvait-il s'agir ? Les avancées de l'électromagnétisme posaient également des problèmes importants. Ce qu'on observait au laboratoire devait se produire dans le champ magnétique de la Terre. Comment, avec quelle périodicité ? L'observation des taches solaires montrait une curieuse périodicité qui semblait corrélée avec celle des aurores polaires : coïncidence ou causalité ? C'était alors le temps des interrogations.

Mais au début du xx<sup>e</sup> siècle, la physique a fait des progrès considérables, et la source d'énergie nucléaire du Soleil a bientôt été mise en évidence. En parallèle, des émetteurs radio révèlent que notre atmosphère s'étend bien au-delà des quelques kilomètres prédits, qu'elle existe encore à plus de trois cents kilomètres, où se trouvent non seulement du gaz électriquement neutre mais aussi des ions et des électrons. D'où viennent-ils ? Des physiciens aventureux démontrent que la source principale en est le Soleil. Il leur a fallu une audace inouïe pour supposer qu'il émettait du rayonnement énergétique et aussi que des particules pouvaient s'en échapper en dépit de sa gravité fantastique. C'est alors le temps de la découverte de notre espace, l'objet du chapitre 2.

L'ère spatiale et la complexification de l'instrumentation au sol vont bientôt conférer au tableau toute sa richesse, faite d'une multitude de détails. Elles vont mettre en branle le tableau encore rigide et statique qui prévalait jusqu'aux années 1950, et montrer à quel point l'environnement spatial varie d'une heure à l'autre parfois. Tout bouge, et tout s'y mélange : particules, champ électrique, champ magnétique. Les zones qui nous entourent sont multiples, subtiles, toujours en interaction, jamais clairement délimitées. Le chapitre 3 fait la part belle à cette révolution conceptuelle<sup>1</sup>.

Ainsi, nous avons choisi, pour aborder la météorologie de l'espace, l'approche historique. Elle permet de rendre hommage aux précurseurs et de mettre en perspective les progrès acquis. Une perspective étourdis-

---

1. Avec la complexification des connaissances physiques vient celle des explications. Le lecteur féru de science trouvera à se passionner dans ce chapitre, qui dresse le panorama des connaissances actuelles. Le lecteur plus intéressé par l'histoire et surtout par les applications de la météorologie de l'espace pourra sauter les paragraphes les plus ardues de ce chapitre sans obérer sa compréhension des chapitres suivants.

sante, vertigineuse même, tant l'accélération a été forte ces dernières décennies.

Le chapitre 4 est l'aboutissement de cette maturation impressionnante, et le cœur du sujet. Il détaille toutes les implications de l'activité solaire sur notre environnement spatial, sur notre technologie moderne. Elles sont nombreuses, et un événement solaire de grande envergure pourrait avoir des conséquences économiques importantes, dont nous donnons les estimations aujourd'hui en notre possession.

Le cinquième et dernier chapitre n'est certainement pas un travail de prospective : l'expérience nous a appris à être prudents, et nous savons que même si nous écrivons le futur, le futur n'est pas écrit. Il est l'ouverture vers les méthodes modernes encore en état de défrichage pour les prévisions opérationnelles : la mise en réseau, le *big data*, l'intelligence artificielle<sup>1</sup>. Ainsi la météorologie de l'espace est-elle passée, en un siècle, du questionnement de pailleasse aux centres opérationnels les plus sophistiqués.

Le lecteur notera certainement un détail qui nous a nous-mêmes surpris au cours de la rédaction de cet ouvrage. Les chapitres 1 et 2 regorgent de noms de scientifiques. Il est passionnant d'y constater combien, bien avant l'ère numérique, les échanges étaient déjà vifs et abondants en science, d'un pays à l'autre, sans barrière de langue. Puis, subtilement, le chapitre 3 – le temps de la complexité – substitue des sondes spatiales et des grands instruments terrestres aux humains. Les noms des scientifiques pâlisent, on devine simplement qu'ils continuent à exister à l'ombre des instruments, mais on constate qu'ils sont presque devenus secondaires, effacés par un torrent de données. Le chapitre 5 est la suite logique de cette évolution : le *big data* et l'intelligence artificielle prennent cette fois le pas sur les grands instruments eux-mêmes. Un seul scientifique ne peut plus en maîtriser les calculs, il y faut des équipes entières, où l'individu semble se diluer dans la masse.

---

1. Comme dans le chapitre 3, nous avons choisi de ne pas simplifier à outrance certains concepts modernes. Le lecteur peu enclin à se plonger dans les méandres de la modélisation pourra sauter quelques paragraphes sans amoindrir sa compréhension globale du livre.

S'il est difficile d'échapper à cette tendance, nous pensons qu'elle n'est qu'une illusion. Nous sommes tous les quatre des acteurs de la recherche en météorologie de l'espace, nous travaillons sur l'ionosphère, la magnétosphère, le Soleil, les aurores, l'intelligence artificielle, les services opérationnels. Nous côtoyons nos collègues en France et à l'international lors des meetings, des campagnes de mesures. Nous savons que la météorologie de l'espace est avant tout humaine, qu'elle est portée par quelques passionnés de la nature, des scientifiques avides de comprendre et de prévoir.

Au terme de ce livre, le lecteur aura traversé quatre siècles d'histoire des sciences. Nous espérons qu'il aura compris à quel point notre société technologique est dépendante d'un environnement spatial solidement arrimé à l'activité solaire, et qu'un aléa nouveau est à considérer dans la marche de l'Humanité : la météorologie de l'espace.

# 1 Le temps des interrogations

---

L'espace a naturellement été de tout temps une source d'interrogations scientifiques. Bien avant le xvii<sup>e</sup> siècle, des questionnements légitimes ont vu le jour, fondés sur des observations fiables. Ces premiers questionnements portaient sur des phénomènes qui semblaient alors distincts, mais que nous savons aujourd'hui indissociables : aurores polaires, géomagnétisme et taches solaires. Le xvii<sup>e</sup> siècle a également vu l'irruption des mathématiques dans les sciences de la nature et, avec elles, la possibilité de prévoir des phénomènes. Les instruments de mesure ont permis de nouvelles explorations : les premières lunettes astronomiques, braquées vers les cieux, ont dévoilé leurs premiers secrets et rebattu les cartes des conceptions et de la connaissance. Mais chaque dévoilement a généré de nouvelles questions, qui se sont accumulées pendant plusieurs siècles. Où en était-on à l'orée du xx<sup>e</sup> siècle, qui a vu tant de bouleversements ?

## L'électricité et le champ magnétique<sup>1</sup>

---

Pour introduire la belle histoire de la météorologie de l'espace, nous devons commencer par deux des notions qui la sous-tendent : l'électricité et le magnétisme.

---

1. Une partie de ce paragraphe est inspirée du livre d'Henri Lilen, *Le Temps des ordinateurs*, publié aux éditions La Farandole en 1983 et aujourd'hui épuisé (malheureusement pour les lecteurs, mais à la joie des rédacteurs de ce livre). Avec l'aimable autorisation d'Henri Lilen.

L'électricité ne constitue pas une découverte des plus récentes, ses manifestations ont été perçues dès l'Antiquité. Ainsi, dès les VII<sup>e</sup> et VI<sup>e</sup> siècles avant notre ère, le savant grec Thalès de Milet note que l'ambre jaune acquiert, par frottement, la propriété d'attirer les corps légers. L'ambre jaune se dit *elektron* en grec : de là, le succès mondial de ce mot. Plus tard, on comprendra que le frottement ne constitue qu'un des moyens d'électriser un corps. On peut le constater tous les jours avec les vêtements textiles artificiels, telle que la fourrure polaire : le frottement qu'ils subissent quand on les porte suffit à les charger d'électricité (à la condition qu'ils soient secs). Après quoi, ils attirent aisément des fils et autres objets légers, et on peut même, en les ôtant, leur arracher de véritables étincelles.

On découvrira d'autres façons d'électriser des corps, parfois aussi simples que... le fait de les chauffer.

Le même Thalès remarque l'attraction du fer par la « pierre d'aimant », sans savoir que Chinois et Égyptiens avaient fait la même observation longtemps avant lui. Sur les propriétés de l'ambre, il ne propose aucune explication. Sur celle de la pierre aimantée, il suggère que des effluves sortent à la fois de la pierre et du fer. Ainsi, les phénomènes électriques et magnétiques trouvent une genèse commune. Cependant, il faudra vingt-cinq siècles pour comprendre que leur physique est également la même.

On caractérise le degré électrique d'un corps par un mot bien connu : « le potentiel électrique ». On parle de la différence de potentiel entre ce corps et un autre. Le courant de nos fils électriques ménagers a une différence de potentiel de 220 volts avec la terre. Aux États-Unis, cette différence de potentiel est de 110 volts. Les corps humains peuvent se retrouver à des potentiels différents à la suite de frottements (en particulier, sur leurs vêtements). Nous en avons tous fait l'expérience désagréable : lorsque nous nous approchons d'une personne à un potentiel différent du nôtre, les potentiels s'égalisent au moyen d'une décharge d'électrons. Cette décharge se fait souvent d'un nez à l'autre, c'est-à-dire de la partie du corps la plus pointue à l'autre. Cette propriété s'appelle « le pouvoir des pointes ». Ce qui se produit n'est rien d'autre qu'un éclair miniature. Les éclairs atmosphériques sont des égalisations de potentiels de centaines de milliers de volts entre la base des nuages et la surface du sol. Le pouvoir des pointes est mis à contribution dans nos

paratonnerres : la pointe concentre la foudre, et l'électricité est conduite dans le sol *via* une chaîne de descente.

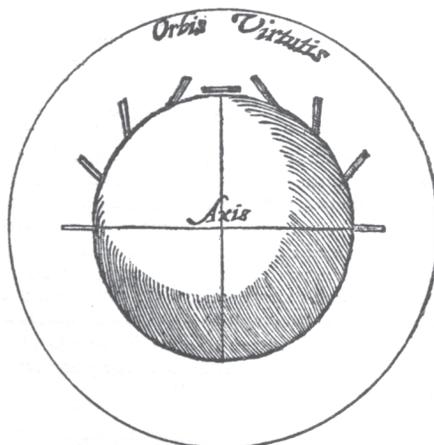
Des phénomènes identiques furent également constatés par d'autres peuples. Ainsi, les anciens Indiens se sont aperçus que certains cristaux avaient la propriété d'attirer les cendres chaudes. Les Chinois, très avancés par rapport aux autres civilisations, ont inventé une façon de se diriger grâce au magnétisme deux siècles avant l'ère chrétienne, ouvrant bientôt la voie à l'invention de la boussole. Ça a été un pas considérable pour l'Humanité.

Après ces âges héroïques où la légende se mêle à l'histoire, il faudra franchir une vaste période pour rencontrer les premiers travaux scientifiques sur l'électricité.

L'introduction de la boussole en Europe au XII<sup>e</sup> siècle, peut-être grâce aux Arabes, a suscité une étude expérimentale très rigoureuse en 1269, due à l'ingénieur militaire au service du duc d'Anjou, Pierre de Maricourt. C'est lui qui nomme « pôle nord » et « pôle sud » les deux extrémités d'un aimant produisant des effets opposés. Il fait également cette observation confondante que si on casse un aimant, chaque morceau possède à son tour un pôle nord et un pôle sud.

L'un des premiers noms que l'on peut citer ensuite est celui du médecin de la reine Élisabeth I<sup>re</sup> et physicien anglais : William Gilbert (1544-1603). Au XVI<sup>e</sup> siècle, il publie une réédition des expériences de Maricourt dans son œuvre en six tomes *De Magnete* (nom complet : *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*). Il montre également qu'un aimant permanent peut attirer du fer. Puis il retrouve dans diverses substances isolantes, telles que le verre ou la résine, des propriétés identiques à celles de l'ambre. Il effectue les premières mesures portant sur les charges électriques et reconnaît qu'il existe des corps qui conduisent bien l'électricité, qui sont de bons *conducteurs*, et d'autres qui s'opposent au passage du courant, des *isolants*. Dans la première catégorie, on trouve en particulier des métaux comme le cuivre, l'argent ou l'aluminium. Dans la seconde, on peut citer le bois ou l'air, tellement peu conducteurs qu'il faut des différences de potentiel de centaines de milliers de volts pour y créer les décharges des éclairs. Tout cela le conduit à comparer les deux forces, l'électrique et la magnétique, sans pourtant avoir les moyens physiques de reconnaître

leur similarité. Cependant, ses travaux auront un impact particulier dans le cadre des relations Soleil-Terre. En effet, il décrit la Terre comme un aimant qui oriente les boussoles grâce à son expérience nommée *Terrella* (nous reparlerons de ce nom).



Source : extrait de *De magnete*, 1600.

Figure 1 : Schéma montrant la *terrella* de Gilbert avec l'orientation du champ magnétique à divers endroits de sa surface.

Les travaux de Gilbert ont aussi fortement impressionné l'astronome Johannes Kepler (1571-1630), qui y puise une confirmation de l'existence de l'attraction à distance. Kepler suggère, au début du XVII<sup>e</sup> siècle, que les forces existant entre le Soleil et les planètes pourraient être de nature magnétique. La physique newtonienne balaiera ces hypothèses, et ce n'est que dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle que l'on reconnaîtra qu'elles n'étaient toutefois pas totalement infondées, cependant à travers des phénomènes dont Kepler n'avait aucune connaissance.

En 1672, Otto von Guericke (1602-1686) fait tourner rapidement une sphère de soufre sur un chiffon de laine et constate qu'elle s'électrise. Puis, améliorant son dispositif, ce physicien allemand imagine le premier générateur électrostatique. Von Guericke s'intéresse également aux propriétés du vide, ce qui n'est bien sûr pas indifférent pour l'environnement spatial. Lors d'une expérience restée célèbre dans le monde

entier, il fait construire deux grandes demi-sphères creuses et il les plaque l'une contre l'autre. Puis, après avoir fait le vide à l'intérieur, il leur attelle de part et d'autre seize chevaux. Tirant de toutes leurs forces, les chevaux ne réussissent pas à séparer les demi-sphères. En effet, celles-ci subissent la pression atmosphérique qu'aucune pression intérieure ne vient compenser. Cette expérience, qui a lieu sur la place publique de Magdebourg, stupéfie les badauds et les autorités de la ville.

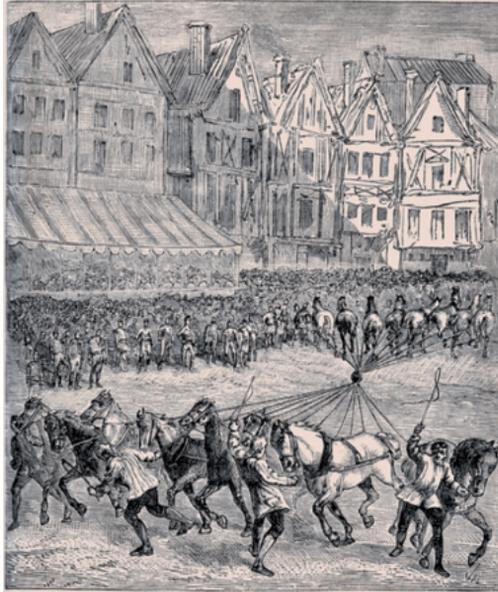


Figure 2 : Expérience des hémisphères de Magdebourg, exécutée par Otto de Guéricke devant l'empereur Ferdinand III, à la diète de Ratisbonne.

Mais revenons à l'électricité. Un peu plus tard, l'Anglais Stephen Gray (1670-1736) étudie des phénomènes de conductibilité et d'électrisation. Il devient l'un des fondateurs de cette partie de la physique qu'on appelle *électrostatique*, laquelle étudie les charges électriques, et non l'action des courants.

Ce qui constituera une véritable énigme, c'est l'apparente existence de deux types d'électricité, mise en évidence en 1733 par le Français Charles-François de Disternay du Fay (1698-1739). Une électricité est,

# Météorologie de l'espace

## VIVRE DEMAIN AVEC NOTRE SOLEIL

**C**oupures d'électricité, impossibilité de communiquer par téléphone ou par internet, géolocalisation en berne, des avions perdent le contact avec les tours de contrôle, des astronautes en sortie spatiale doivent rejoindre au plus vite leur station. Il ne s'agit pas d'un scénario catastrophe digne d'un film de série Z mais d'une série de phénomènes électromagnétiques liés aux perturbations et à l'agitation de notre Soleil.

Grâce aux meilleurs acteurs de la discipline rassemblés dans ce livre, vous traverserez près de quatre siècles de recherches, depuis les premières observations d'aurores boréales jusqu'aux dernières prévisions d'événements solaires en centre opérationnel, pour percer les mystères des relations entre le Soleil et notre planète.

---

**Jean Lilensten** est chercheur au CNRS, spécialiste des aurores polaires et responsable européen de météorologie de l'espace.

**Frédéric Pitout** est astronome à l'Observatoire Midi-Pyrénées. Ses travaux de recherche portent sur les couplages vent solaire – magnétosphère – ionosphère.

**Marina Gruet** est docteur en science de l'Univers avec des travaux sur l'intelligence artificielle pour prévoir les effets de l'interaction Soleil-Terre.

**João Pedro Marques** est maître de conférences à l'Institut d'astrophysique spatiale (Université de Paris-Saclay), spécialiste des intérieurs solaires et stellaires.

**Alain Cirou** est directeur de la rédaction de *Ciel et espace*, directeur général de l'Association française d'astronomie et consultant scientifique spécialiste de l'astronomie.

ISBN : 978-2-8073-3306-2



9 782807 333062

deboeck **B**  
SUPERIEUR

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)