Pierre Léna & Serge Koutchmy

Soleils éclipsés

Supersonique Concorde 001, couronne solaire et exoplanètes



edp sciences

Pierre Léna & Serge Koutchmy

Soleils éclipsés

Une éclipse totale de Soleil offre toujours un spectacle extraordinaire, quoique limité à quelques minutes et à une zone étroite de la surface terrestre. Pourtant, le 30 juin 1973 au-dessus de l'Afrique, quelques astrophysiciens, embarqués à bord du prototype 001 de l'avion commercial Concorde et grâce à sa vitesse supersonique, demeurèrent dans l'ombre de la Lune pendant 74 minutes. Cette longue nuit permit de réaliser des observations astronomiques exceptionnelles et fut un record absolu, jamais battu depuis un demi-siècle. Science, technique, aéronautique et histoire se marient ici dans une aventure humaine singulière à bord d'un avion légendaire.

Cinquante années après ce vol, la couronne du Soleil n'a pas encore livré tous ses secrets. Nuage ténu de gaz et de poussières, elle influe sur la Terre, crée les aurores boréales, agit sur les communications, peut mettre en danger les satellites. Pour mieux la comprendre, il faut en déchiffrer les images. Aujourd'hui, la grande aventure de l'astrophysique se poursuit avec la recherche des exoplanètes, astres jumeaux de la Terre qui sont immergés dans la couronne d'étoiles proches du Soleil.

Ce livre témoigne des horizons de la science et des émotions inouïes qu'elle peut procurer à tous.

***Pierre Léna**, membre de l'Académie des sciences, est astrophysicien, professeur émérite à l'Observatoire de Paris et l'Université Paris Cité. À l'origine du vol de Concorde 001 en 1973, il en livre ici un témoignage vécu et des documents de première main.*

***Serge Koutchmy** est directeur de recherche à l'Institut d'astrophysique de Paris. Spécialiste, reconnu mondialement, de la couronne solaire, il a organisé nombre d'expéditions pour observer les éclipses totales de Soleil, et conçu l'une des expériences à bord du Concorde 001.*

edp sciences
www.edpsciences.org

978-2-7598-3132-6



AIRITAGE
PATRIMOINE AEROSPATIALE, MATRA, AIRBUS

MUSÉE AIR + ESPACE
AÉROPORT PARIS – LE BOURGET

Pierre Léna & Serge Koutchmy

Soleils éclipsés

Supersonique Concorde 001, couronne solaire et exoplanètes

edp sciences

Grâce à l'obligeance de l'Observatoire de Paris, la plupart des images figurant dans cet ouvrage sont accessibles et téléchargeables en haute résolution à l'adresse suivante :

https://sites.lesia.obspm.fr/soleils-eclipses

Leur usage doit demeurer personnel et non-commercial. Accès direct en flashant ce QR-code :



Conception graphique et mise en pages : CB Defretin
Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-3132-6 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-3133-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2023

Sommaire

Les auteurs 6

Avant-propos 7

PARTIE I

74 minutes de totalité à bord de Concorde 9

Ouverture 11

Chapitre ❶ Des éclipses et des hommes 15

1.1 500 millions d'années sous les mers 15

1.2 Le Soleil eut honte et se coucha en plein jour 17

1.3 Un astronome à la cour du Fils du Ciel 18

1.4 Vol d'un coucou au-dessus de Paris 20

1.5 Le mystère de l'auréole solaire 22

1.6 Tourisme d'amateurs et science au-dessus des nuages 26

Chapitre ❷ Concorde, un rêve qui prend son envol 29

2.1 Entente cordiale autour d'un défi 29

2.2 Concorde décolle 32

2.3 Où la tragédie est dépassée, mais où la raison commerciale l'emporte 34

Chapitre ❸ Cette obscure clarté qui tombe des étoiles 35

3.1 Où un officier de marine devient astronome 35

3.2 Où un inventeur de génie est entouré de plumes pendant une éclipse 36

3.3 L'invention de l'éclipse artificielle 38

3.4 Quête d'étoiles dans la stratosphère 43

Chapitre ❹ Vers l'éclipse totale la plus longue de l'histoire 49

4.1 Un déjeuner décisif 49

4.2 Couronne, poussières et infrarouge 51

4.3 Où un futur ministre de la Recherche nous soutient 53

4.4 Combien de trous dans le fuselage de Concorde ? 55
4.5 Des astronomes bien exigeants 59
4.6 Les mains à la pâte 62
4.7 Atmosphère, atmosphère… 64
4.8 Bon pour le service 68

Chapitre ❺ Inutile de s'alarmer, c'est tout simplement une éclipse… 71
5.1 Répétition générale 71
5.2 À l'heure au rendez-vous 74
5.3 Chez les Nyangatom d'Éthiopie 81
5.4 Mach 2,05 ou davantage ? 83
5.5 Coup d'État manqué 84
5.6 Retour au bercail 87

Chapitre ❻ Quelle moisson de science après ces 74 minutes ? 89
6.1 Où l'on cherche les anneaux de poussières de la couronne F ? 89
6.2 Comment chauffer la couronne K à un million de degrés ? 91
6.3 Nous n'étions pas seuls 96
6.4 Concorde espionné par des visiteurs extraterrestres ? 99

Épilogue de la Partie I 103

PARTIE II

Un demi-siècle plus tard
Couronne solaire et exoplanètes 107

Introduction 109

Chapitre ❼ La couronne et sa composante gazeuse 111
7.1 Une première vue d'ensemble de la couronne 111
7.2 Une extrême richesse de détails 117
7.3 De la surface à la couronne 119
7.4 La couronne K et ses structures 123
7.5 Dynamique coronale et vent solaire 145

Chapitre ❽ La couronne de poussières et le nuage zodiacal 161
8.1 Couronne F et nuage zodiacal 161
8.2 Une pyramide du ciel, le nuage zodiacal 167

8.3 Des comètes visiteuses et souvent suicidaires ... 173
8.4 Couronne F et nuage zodiacal : des pyramides du ciel en construction ? ... 181

Chapitre 9 Disques de débris, exoTerres et coronographie ... 187
9.1 Disques protoplanétaires ... 191
9.2 Disques de débris ... 193
9.3 Détecter des exoTerres ... 201
9.4 Remplacer la Lune pour éclipser une étoile ... 206

Conclusion ... 217

Remerciements ... 219

Annexes ... 223

Comment se produisent les éclipses totales de Soleil ? ... 225
A.1 Pourquoi les éclipses totales de Soleil sont-elles si rares en un lieu donné de la Terre ? ... 225
A.2 Pourquoi n'observe-t-on une éclipse totale de Soleil que depuis une toute petite partie de la surface terrestre ? ... 230
A.3 Pourquoi a-t-on appelé « éclipse du siècle » l'éclipse totale de 1973 ? ... 232

L'avion Concorde ... 235

Quelques quantités relatives au Soleil et son atmosphère ... 239

Bibliographie ... 241

Des mêmes auteurs ... 245

Les auteurs

Pierre Léna, né en 1937, est astrophysicien à l'Observatoire de Paris (Paris Sciences Lettres) et membre de l'Académie des sciences depuis 1991. Professeur, aujourd'hui émérite, à l'Université Paris Cité, il y a formé nombre de jeunes dans leur découverte de l'astronomie et leur entrée dans la recherche. Son action dans *La main à la pâte*, dont il est l'un des trois co-fondateurs, en direction de la découverte de la science à l'école primaire, en France et dans le monde, ainsi que ses nombreuses publications vers le grand public, complètent sa carrière scientifique. Celle-ci contribua en particulier à l'installation de l'optique adaptative et de l'interférométrie sur le *Very Large Telescope* européen, installé au Chili depuis 1998, et aux résultats majeurs rendus ainsi possibles.

Serge Koutchmy, né au Creusot (Saône-et-Loire), est astrophysicien, directeur de recherches au Centre national de la recherche scientifique à Paris. Après des études à l'université Lomonossov de Moscou et un doctorat de l'Université de Paris en 1972, il exerce à l'Institut d'astrophysique (CNRS et Sorbonne Université). Spécialiste mondial de la physique de la couronne solaire et de ses méthodes d'observation depuis les plus grands observatoires terrestres, comme depuis l'espace (médaille du CNES, 1983), il a collaboré avec les États-Unis, le Japon, la Russie, organisé de nombreuses expéditions pour observer les éclipses totales de Soleil et toujours soutenu les astronomes amateurs au sein de la Société astronomique de France, dont il reçut en 1998 la prestigieuse médaille Janssen.

Avant-propos

Cet ouvrage se présente en deux parties. La première est le récit d'un record absolu, vécu le 30 juin 1973 et jamais battu un demi-siècle plus tard. Ce jour-là, le Soleil demeura totalement éclipsé pendant 74 minutes, pour le petit groupe d'hommes qui se trouvaient à bord de l'avion supersonique Concorde 001 volant dans la stratosphère terrestre et demeurant ainsi près d'une heure et demie dans l'ombre de la Lune, avec de nombreuses expériences scientifiques à bord. Ce récit est à la première personne, puisque raconté par l'un des auteurs du présent ouvrage, Pierre Léna, qui initia et vécut cette aventure à 17 000 mètres d'altitude, tandis que le second auteur, Serge Koutchmy, qui observait cette même éclipse depuis le sol africain, avait néanmoins installé un télescope à bord du Concorde. L'expérience scientifique du premier recherchait le rayonnement infrarouge, émis par la couronne solaire de poussières. Ce thème, en liaison avec le milieu interplanétaire et l'évolution du système solaire, est arrivé à maturité plusieurs décennies après ce vol historique. Les autres expériences, dont celle de Serge Koutchmy, portaient sur les questions plus traditionnelles de la physique solaire, quoiqu'encore fort discutées en 2023, telle la cause du chauffage de la couronne et celle du vent solaire.

La première partie reprend l'essentiel de l'ouvrage *Concorde 001 et l'ombre de la Lune,* paru en 2014 aux Éditions Le Pommier, aujourd'hui épuisé mais toujours demandé par nombre de lecteurs. Nous sommes heureux de célébrer le cinquantenaire de ce vol exceptionnel par cette reparution à la date anniversaire du 30 juin 2023.

La seconde partie a été rédigée conjointement par Serge Koutchmy, astronome passionné de la couronne solaire, et Pierre Léna. Il était en effet nécessaire de montrer à nos lecteurs les formidables progrès faits durant un demi-siècle dans la connaissance de cette couronne. Cette partie quitte donc le style du récit pour un ton plus scientifique, que nous avons toutefois anticipé par quelques ajouts et renvois au sein de la première partie. Pour ne pas trop exiger de nos lecteurs, nous avons choisi une riche iconographie qui suscite aisément l'admiration par la beauté des images, et aide l'intuition à entrer dans la compréhension des phénomènes complexes qui caractérisent la couronne du Soleil. Nous avons également renvoyé à

quelques encadrés des notions utiles, que le lecteur pourra ignorer lors d'une première lecture. Nos lecteurs trouveront dans l'encyclopédie en ligne Wikipédia de très nombreux compléments, le plus souvent de grande qualité, en français et également en anglais : qu'ils n'hésitent donc pas à accompagner leur lecture par de telles excursions !

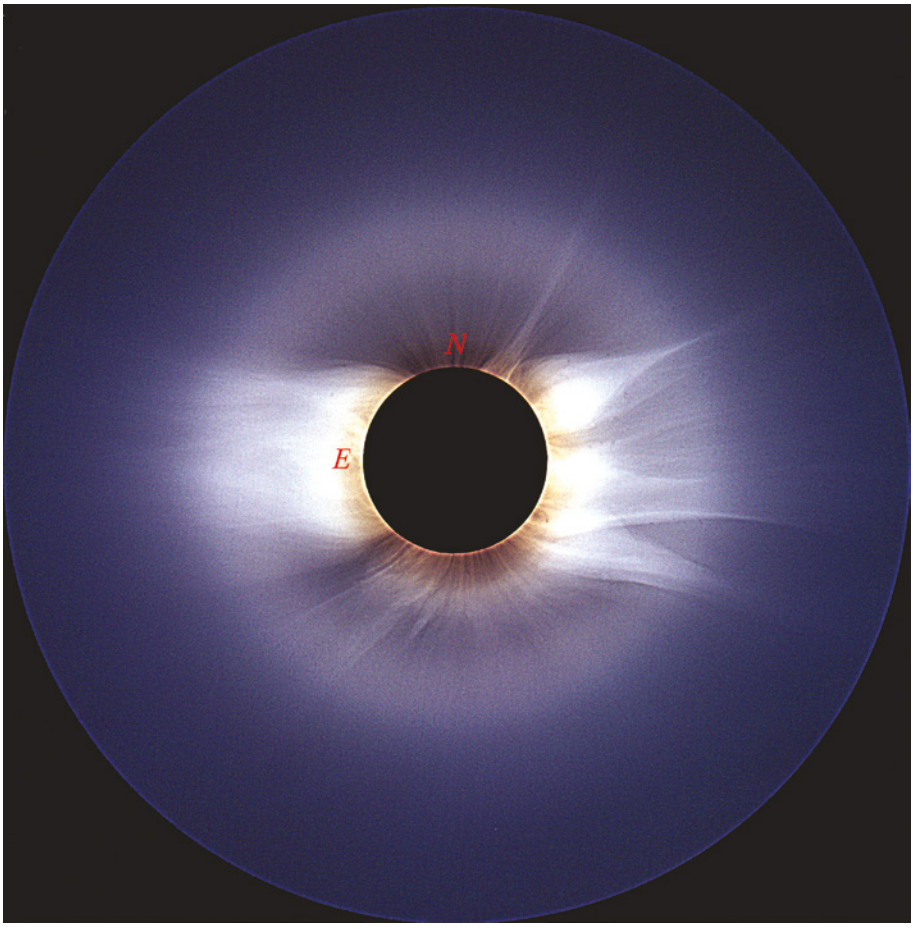
Cette partie explore ce que nous savons de ce gaz et de ces poussières qui entourent le Soleil et forment sa couronne, auréole de lumière longtemps mystérieuse pour n'avoir été observable que pendant une éclipse totale de Soleil, quand le disque de la Lune masque l'intense éclat de celui du Soleil. Le caractère extraordinaire de ces éclipses totales a toujours frappé les êtres humains et il est savoureux d'en parcourir quelques récits historiques. La couronne solaire demeure aujourd'hui un fascinant objet d'interrogations, étudié grâce à une diversité d'instruments placés au sol, en avion et surtout dans l'espace. Avec ces derniers, dont nous n'avons pas voulu détailler les réalisations techniques pourtant fort remarquables et nombreuses, l'observation pendant une éclipse n'est plus nécessaire, car les rayons X et ultraviolets émis par la couronne sont alors observables et bien plus intenses que ceux qui sont dus au disque solaire. En outre, en tant qu'atmosphère étendue du Soleil, elle fait le lien entre notre astre du jour et la Terre, si bien que les phénomènes qui s'y déroulent, et surtout ceux qui sont directement dirigés vers la Terre, ont un impact direct sur les activités humaines : ainsi des jets très énergétiques de particules et de nuages magnétiques. Enfin les éclipses, rares mais devenues plus accessibles, sont une formidable opportunité pour percevoir soi-même la réalité de notre système solaire et pour vivre une admirable leçon de cosmogonie. Au-delà de l'immense engouement des amateurs d'astronomie, sans cesse plus nombreux, pour ces événements de la nature, puisse ce livre en révéler quelques aspects plus cachés et non moins beaux.

Les méthodes et instruments développés pour l'étude des éclipses solaires trouvent aujourd'hui des applications inattendues dans l'observation des exoplanètes autour d'autres étoiles, et tout particulièrement de celles de ces exoplanètes, peu brillantes, qui seraient peu ou prou des jumelles de notre Terre. Ce sujet fascinant, qui porte sur la composante poussiéreuse de la couronne des étoiles où naissent les planètes semblables à la Terre, est en plein développement. Il méritait donc d'être exploré dans cet ouvrage, dont il forme un chapitre ultime, tourné vers l'avenir.

Les auteurs

PARTIE I

74 minutes de totalité à bord de Concorde 001



0.1. La couronne solaire, photographiée par Serge Koutchmy, depuis le site de Moussoro au Tchad, lors de l'éclipse totale du 30 juin 1973. L'observateur se trouve dans la zone d'ombre, à 100 kilomètres au sud de la ligne de centralité, ce qui signifie que le disque de la Lune n'est pas exactement centré sur celui du Soleil occulté. La surexposition des parties internes de la couronne est évitée par l'emploi d'un filtre optique, progressivement plus absorbant en s'approchant du bord solaire. (© Institut d'astrophysique de Paris/CNRS)

Ouverture

Ce 30 juin 1973, le soleil d'été s'est levé sur Las Palmas, capitale des îles Canaries au large de la côte africaine, mais l'astre du jour n'a pas son aspect habituel. Le disque solaire est échancré par le bord de la Lune, car notre satellite vient de s'interposer entre Soleil et Terre. Au lever de ce jour, bien loin à l'ouest en Guyane hollandaise (aujourd'hui Surinam), les grenouilles reinettes de l'espèce *Hyla calcarata* se sont mises à chanter en chœur malgré l'heure inaccoutumée[1]. C'est en effet là-bas que la grande tache sombre, formée par l'ombre lunaire sur la surface terrestre et entourée d'une pénombre, a commencé sa course vers l'est à hauteur de l'équateur et à une vitesse de plus de 2 000 kilomètres par heure par rapport au sol, pour rejoindre bientôt la côte africaine. Les astronomes, qui savent prédire l'occurrence et tous les détails d'une éclipse, ont indiqué que celle-ci sera totale en chaque lieu de la Terre que va balayer l'ombre, et partielle pour les zones seulement touchées par la pénombre. Mieux encore, sur le sol africain la durée d'obscurité complète, exceptionnelle, sera de plus de sept minutes, et le ciel noir permettra de voir les étoiles en plein midi, le Soleil étant alors proche du zénith. Ce record de durée va en faire « l'éclipse du siècle », comme l'ont annoncé les médias.



0.2. L'ombre de la Lune sur la Terre, entourée de pénombre et photographiée depuis l'espace par l'astronaute Jean-Pierre Haigneré à bord de la station Mir, lors de l'éclipse totale de Soleil du 10 août 1999, qui fut visible en France. (© J.-P. Haigneré/CNES)

1. Jean Lescure, « Comportement vocal des amphibiens et des oiseaux au Surinam », in *Soleil est mort : l'éclipse totale du 30 juin 1973*, G. Francillon & P. Menget (éd.), p. 91-103, 1979.

Vers dix heures du matin, l'échancrure a progressé, et près d'une moitié du Soleil est devenue invisible. Lentement, un grand oiseau blanc se met alors en mouvement sur l'aéroport de Las Palmas et se dirige vers la piste de décollage. Vêtu d'une combinaison de survie rouge vif – l'uniforme des équipages d'essai, qu'il faut pouvoir retrouver en mer si nécessaire –, je me trouve à bord de ce Concorde immatriculé WTSS-001, le prototype du futur avion supersonique commercial d'Air France et de British Airways, avec sept astronomes. Aux commandes, André Turcat, le célèbre pilote qui dirige depuis 1969 tous les essais de cet avion, et Jean Dabos, eux aussi en combinaison rouge. Les quatre autres hommes qui composent l'équipage, ainsi que le photographe Jean-Pierre Aubertin, sont à leurs postes. « Sierra Sierra, bon pour le décollage », annonce la tour de contrôle. À la seconde près par rapport à l'horaire prévu, le bel avion tout blanc décolle face aux vents alizés dans le rugissement de ses quatre réacteurs, volant à la rencontre de l'ombre de la Lune quelque part au-dessus de la Mauritanie aux rudes étendues désertiques. Moins d'une heure plus tard, ayant accéléré pour atteindre plus de deux fois la vitesse du son dans la stratosphère où il vole vers l'est à 17 000 mètres d'altitude, Concorde 001 va rencontrer l'ombre de la Lune à l'instant et au point fixés par nos calculs. La précision de ce rendez-vous est extraordinaire, puisque nous l'atteignons à la seconde près et à moins de 2 kilomètres du point idéal. L'avion a allumé ses feux de navigation de nuit, bien qu'il soit près de midi à l'heure locale et que le Soleil soit proche de notre zénith. Volant dans l'ombre lunaire qui se déplace à la même vitesse que nous, il va demeurer dans l'obscurité totale pendant soixante-quatorze très longues minutes, tandis que chacun des astronomes s'affaire auprès de l'instrument avec lequel il étudie le Soleil et sa couronne, mettant à profit cette durée jamais atteinte dans l'histoire des observations d'éclipse. Lorsque nous atterrissons à Fort-Lamy, aujourd'hui N'Djamena, capitale du Tchad au cœur de l'Afrique, mon cœur bat très fort d'émotion, puisque ce rêve que, tout jeune professeur et astrophysicien, j'avais dessiné à peine plus d'un an auparavant vient de se réaliser : aucun homme n'a jamais vu le Soleil éclipsé si longtemps, aucun équipage n'a réussi sans faute un aussi difficile rendez-vous, aucun avion n'a jamais offert un pareil observatoire à une équipe d'astronomes éblouis. Un demi-siècle plus tard, lorsqu'en 2023 j'en complète le récit, ce record n'a jamais été ni renouvelé ni battu.

Dans le ciel de Mauritanie, au-dessus de Touaregs étonnés de ce Soleil se cachant soudain, viennent de se rencontrer trois histoires parallèles. La première a commencé avec l'humanité, qui dans toutes les cultures s'est effrayée des éclipses totales de Soleil, puis a cherché à en comprendre la cause, enfin à les utiliser scientifiquement pour étudier l'astre qui nous apporte lumière, chaleur et vie. La deuxième histoire est celle de cet avion



0.3. 30 juin 1973, 10 h 08 temps universel, le prototype Concorde 001, immatriculé WTSS, décolle de l'aéroport de Las Palmas (îles Canaries) pour rejoindre, quelque part au-dessus de l'Afrique occidentale, l'ombre de la Lune qui court déjà sur la surface terrestre. La postcombustion est allumée pour permettre le décollage des 140 tonnes de l'avion. (Cliché Jim Lesurf)

extraordinaire que fut Concorde et dont 001 est le premier prototype, volant depuis 1969 et basé à Toulouse. Comment a-t-il été possible de détourner cet avion de sa tâche, à savoir les essais en vol d'un futur avion supersonique commercial, pour en faire un laboratoire courant après l'ombre de la Lune ? Enfin, la troisième histoire me concerne plus directement, puisqu'il m'aura fallu des années pour devenir chercheur, m'intéresser au Soleil et à la lumière infrarouge, apprendre des techniques difficiles pour faire voler des télescopes à bord d'avions, décider de la question que l'éclipse me permettra d'étudier, puis construire une équipe pour m'accompagner, enfin voir réalisé ce vol africain.

C'est donc la rencontre de ces trois histoires véridiques que je raconte dans la première partie de ce livre. Les télescopes et le Soleil, l'avion supersonique poursuivant l'ombre, les astronomes, les ingénieurs et les pilotes qui ont établi un record exceptionnel ont vraiment existé. Il ne s'est pas agi d'un jeu vidéo faisant voyager le joueur à son gré dans le temps et l'espace, ni d'une bande dessinée où le fantastique se rencontre à chaque image. Il s'agit d'une aventure humaine collective que nous avons vécue. Je souhaite en transmettre le récit aux aînés qui ont vécu cette époque autant qu'à la jeune génération afin de nourrir ses rêves et de l'aider à affronter la dure réalité. Je voudrais tant la pousser à vivre le désir de se dépasser dans des aventures nouvelles pour s'y accomplir. J'ai ici un regret en pensant à mes lectrices. Il n'y a guère de femmes dans ce récit : astronomes, ingénieurs, équipage sont des hommes, et je n'y puis rien. Pourtant, au cours de ma vie, j'ai eu de brillantes collègues féminines faisant honneur à l'astrophysique, et nombreuses sont mes anciennes étudiantes ayant acquis une

réputation internationale, telle Nabila Aghanim, rencontrée à Alger il y a bien longtemps et qui explore aujourd'hui l'origine de l'univers, ou Anne-Marie Lagrange qui est une spécialiste mondiale des exoplanètes et que nous retrouvons dans le dernier chapitre de ce livre. L'aviation a aussi ses héroïnes, telle la commandante Caroline Aigle, polytechnicienne et pilote de chasse, trop tôt disparue en 2007, ou encore Catherine Maunoury, double championne du monde en voltige aérienne, qui accueillit au musée de l'Air et de l'Espace le récit de notre éclipse sous l'aile du Concorde 001. L'espace enfin, avec Claudie Haigneré, cette femme médecin qui décida de devenir astronaute et passa plus de vingt-cinq jours dans l'espace lors de ses différentes missions. Les femmes ont toutes leur place dans la science comme dans les aventures du courage et de l'esprit.

Bien d'autres entreprises autrement glorieuses et fécondes ont marqué le XX^{e} siècle, singulièrement les missions Apollo vers la Lune. Elles ont mobilisé infiniment plus de personnes, de moyens et d'intelligence que notre modeste expédition d'éclipse, elles ont obtenu infiniment plus de résultats scientifiques. Pourtant, dans celle que j'ai vécue, l'astronomie et l'aviation se sont rejointes d'une façon tout à fait exceptionnelle, peut-être unique pour longtemps encore. Cela mérite d'être raconté.

CHAPITRE 1

Des éclipses et des hommes

1.1 500 millions d'années sous les mers

Un élégant et petit céphalopode appelé « nautile[2] » possède une coquille calcaire en forme de spirale, qui se développe jour après jour avec un anneau nouveau. Depuis au moins cinq cents millions d'années, pour déposer leur frai, les nautiles remontent à la surface de la mer le jour de la pleine Lune et insèrent alors une cloison dans la série d'anneaux. En comptant sur un fossile de nautile, daté par ailleurs grâce aux techniques géologiques, le nombre d'anneaux séparant deux cloisons successives, on obtient la durée du mois lunaire à l'époque où vivait ce nautile[3]. On constate alors que cette durée était plus courte qu'aujourd'hui. En effet la Lune s'éloigne lentement de la Terre, ce qui augmente sa période de rotation autour d'elle. La distance croît au rythme moyen de 38 mètres par siècle, comme il est possible de nos jours de le mesurer précisément avec un laser. La dissipation d'énergie que crée le frottement des marées sur la surface de la Terre en est responsable. En effet, les marées sont dues à l'action des forces de gravitation de la Lune (et également du Soleil), agissant sur l'eau des océans. L'énergie cinétique considérable associée au mouvement des masses d'eau est prélevée sur l'énergie gravitationnelle associée au couple que forment les masses de la Lune et de la Terre. Lorsque les frottements associés au mouvement de l'eau transforment finalement une partie de cette énergie en une élévation de température de l'océan, au détriment de l'énergie du couple Terre-Lune, celui-ci se sépare progressivement. Or, quand la Lune s'éloigne de la Terre, sa dimension apparente dans notre ciel diminue : c'est donc par une heureuse coïncidence que, depuis les

2. http://en.wikipedia.org/wiki/Nautilus
3. http://www.thegreatbetween.com/the-chambered-nautilus/

temps préhistoriques, le disque lunaire et le disque solaire, vus depuis la surface terrestre, ont pratiquement la même dimension apparente lorsque nous les regardons dans le ciel. Cette situation a pour conséquence une importante modulation de l'amplitude des marées sur Terre, comme déjà noté par Galileo Galilei et Isaac Newton. Certains auteurs contemporains y ont vu un facteur qui aurait facilité l'évolution des espèces il y a quelques centaines de millions d'années[4].

Lorsqu'il arrive que la Lune, au cours de son mouvement autour de la Terre, s'interpose entre le Soleil et un point de la surface terrestre, son disque va donc très exactement cacher le disque solaire et une éclipse totale de Soleil se produit : une superposition aussi précise n'arrivera plus dans quelques dizaines de millions d'années puisque la Lune se sera éloignée, il faut en profiter ! Par ailleurs, si la Lune décrivait exactement un cercle autour de la Terre, toutes les éclipses se ressembleraient. Mais l'orbite lunaire est une ellipse, si bien que sa distance à la Terre varie légèrement au cours du mois lunaire : parfois l'éclipse est annulaire, laissant voir le fin anneau circulaire du bord solaire, parfois au contraire elle est totale lorsque la distance Terre-Lune est minimale.

Soyons un instant plus précis. La distance de la Terre au Soleil change légèrement, elle aussi, puisque l'orbite de la Terre n'est pas un cercle mais une ellipse, toutefois très proche d'un cercle. Le diamètre apparent du disque solaire tel qu'il nous apparaît dans le ciel varie donc entre 32′ 35″ et 31′ 31″ (′ = minute d'angle, soit la soixantième partie d'un degré, et ″ = seconde d'angle). Celui de la Lune, également sur une orbite elliptique autour de la Terre, varie entre 33′ 1″ et 29′ 22″. On voit donc que, selon la position de la Terre et de la Lune au moment où se produit l'éclipse, le disque lunaire vu depuis la Terre cache plus ou moins totalement le disque solaire.

Outre ces distances variables, de multiples facteurs interviennent pour déterminer les circonstances d'une éclipse : sa date et son heure, son lieu géographique d'observation, sa durée de totalité ou de partialité. Les détailler ici serait trop long, et notre lecteur est invité, s'il le souhaite, à se reporter à l'Annexe 1 située en fin d'ouvrage. Elle explique pourquoi l'éclipse du 30 juin 1973 fut exceptionnelle.

4. S.A. Balbus, Dynamical, biological and anthropic consequences of equal lunar and solar radii, arXiv:1406.0323v1 [astroph.EP] 2 June 2014.

1.2 Le Soleil eut honte et se coucha en plein jour

Dans l'antique cité d'Ugarit, sur la rive syrienne de la Méditerranée, les fouilles archéologiques ont retrouvé une tablette d'argile relatant une éclipse de Soleil, dont il est aujourd'hui possible, grâce à nos calculs, de reconstituer la date exacte, peut-être la plus ancienne historiquement rapportée[5] : c'était le 3 mai 1375 avant notre ère. On y lit : « Un jour de la nouvelle lune, au mois de Hiyar, le Soleil eut honte et se coucha en plein jour, avec Mars pour témoin. » En effet, les étoiles et les planètes les plus brillantes, donc la planète Mars, deviennent visibles pendant l'obscurité qui marque la totalité. Moins d'un siècle plus tard, l'occurrence de cinq éclipses solaires entre 1226 et 1161 av. J.-C. est rapportée en Chine sur des os divinatoires trouvés dans la fouille de Anyang (Henan)[6]. Le terme *ri shi* (日食) désigne aujourd'hui en chinois une éclipse et signifie également « soleil mangé », en écho aux mythes anciens où un dragon céleste dévorait le Soleil pendant l'éclipse. On jouait du tambour, des archers tiraient des flèches en direction du Soleil éclipsé pour effrayer ce dragon, et malheur à l'astronome de la cour impériale qui se trompait sur la prédiction de l'éclipse, car sa tête tombait. Le métier d'astronome était alors plus dangereux qu'il ne l'est aujourd'hui !

Ulysse put peut-être observer une éclipse totale près d'Ithaque le 16 avril 1178 av. J.-C., si l'on interprète en ce sens l'obscurité en plein jour que raconte *L'Odyssée* au livre XX[7] : « Et voici que l'auvent se remplit de fantômes ! Ils emplissent la cour ! Ils s'en vont du côté du noroît, à l'Érèbe : dans les cieux, le soleil s'éteint, et la nuée de mort recouvre tout ! »

Laissons ici de côté les lents progrès scientifiques dans la prédiction des dates et des lieux des éclipses, une longue histoire qui passe par les Babyloniens, les Grecs, les Indiens, les Chinois, les Mayas, les Arabes, pour aboutir au monde de la Renaissance et à l'étonnante précision des calculs modernes. Grâce à celle-ci, des descriptions anciennes d'éclipses, datées d'une part dans les chroniques de l'époque, d'autre part dans une chronologie établie par la mécanique céleste, permettent de placer les événements historiques d'un lointain passé dans une chronologie unique et universelle[8].

---

5. L'éclipse antérieure du 21 octobre 3784 av. J.-C., en Inde, est peut-être rapportée dans une chronique. *In* P. Guillermier & S. Koutchmy, voir Bibliographie.
6. http://history.cultural-china.com/en/183History5571.html
7. C. Baikouzis, M. O. Magnasco, « Is an eclipse described in the Odyssey? », 2008. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18577587. Traduction de V. Bérard. http://iliadeodyssee.texte.free.fr/aatexte/berard/odyssberard/odyssberard27.htm
8. Le chapitre 4 de l'ouvrage de P. Guillermier et S. Koutchmy, *Éclipses totales : histoire, découvertes, observations* (1998), cité dans la Bibliographie, est une riche source d'informations historiques sur les éclipses totales de Soleil.

1.3 Un astronome à la cour du Fils du Ciel

Science ancienne et science nouvelle de la Renaissance, Occident chrétien et Orient confucéen vont se rencontrer de façon spectaculaire au début du XVII^e siècle autour d'une éclipse solaire. Né à Macerata (Italie centrale) en 1552, Matteo Ricci est un prêtre de l'ordre des jésuites, qui s'embarque pour l'Inde puis la Chine à bord d'un navire portugais. Le seul port chinois ouvert au commerce est alors la ville de Macao, où les Portugais sont très actifs. Ricci apprend le chinois et rêve de pénétrer au cœur de l'Empire du Milieu, dans sa capitale du Nord (Beijing ou Pékin). Il veut bien sûr faire découvrir l'Évangile au peuple chinois, mais il comprend vite qu'il doit auparavant mieux connaître et aimer ce pays. Après une longue attente pendant laquelle il ne cesse d'étudier la culture chinoise, il parvient à Beijing en 1601 et se lie d'amitié avec ces intellectuels cultivés que sont les mandarins, partageant avec eux les mathématiques et l'astronomie européennes, qu'il a longuement étudiées avant son départ[9]. Ricci va bientôt devenir le précepteur du fils de l'empereur Wan Li, auquel il enseigne la science nouvelle qui naît dans la Renaissance occidentale. Il traduit aussi en chinois *Les Éléments* d'Euclide, ce livre de base de la géométrie reçu des Grecs et, symétriquement en latin, *Les Entretiens (Lun Yu)* de Confucius, inconnus en Occident. À partir de ses connaissances géographiques appuyées sur des mesures précises, il dessine une carte du monde tel qu'il est connu à l'époque, sous forme d'un planisphère (« *Il Mappamondo, la carte complète de toutes les nations de la Terre* ») qu'il offre à l'Empereur et qui sera diffusé dans toute l'Asie. Il ose même ne pas y mettre en position centrale l'Empire du Milieu.

Outre ses connaissances géographiques et sa maîtrise des instruments classiques pour mesurer les positions et les directions des astres, alors que la lunette astronomique n'est pas encore utilisée, Ricci dispose des tables appelées « éphémérides » et affinées par les Portugais pour la navigation, donnant les mouvements de la Terre (rotation diurne sur elle-même et rotation annuelle autour du Soleil) et de la Lune (rotation autour de la Terre lors du mois lunaire). Aussi, avant même d'arriver à Beijing, il explique pourquoi l'éclipse partielle observée à Nanchang, au Sud de la Chine, n'a pas une ampleur aussi importante que celle qui est prévue par les astronomes de l'Empereur. Écoutons-le : « Beaucoup de gens vinrent m'en demander la cause : y avait-il erreur dans le calcul ou bien d'autres causes en avaient-elles réduit l'importance ? À cette occasion, je leur expliquai comment

9. *Matteo Ricci, un jésuite en Chine,* M. Masson, éd. Facultés jésuites de Paris, 2009.

l'éclipse de Soleil n'est pas universelle et qu'elle peut être plus grande en un lieu qu'en un autre ; ainsi, il pouvait arriver qu'elle dût être plus grande là où on l'avait calculée [à Pékin] tandis qu'elle l'était moins dans cette province [du Jiangxi] qui est beaucoup plus centrale. Cette explication les contenta, car elle ne contredisait pas les mathématiciens du roi et les raisons que je leur donnai des éclipses de Soleil ou de Lune les satisfirent : tout cela leur était inconnu, spécialement la cause de l'éclipse de Lune que leurs savants n'ont jamais su donner.[10] » Plus tard, à Beijing, l'éclipse solaire du 11 mai 1603 va lui donner une occasion éclatante de démonstration scientifique. Alors que les astronomes impériaux ont prévu le début de la totalité avec une erreur de trois quarts d'heure et la fin avec une erreur d'un quart d'heure, la prévision de Ricci est bien meilleure, ce qui lui vaut une grande réputation. Malgré ses recherches, l'auteur du présent livre n'a pas su retrouver la valeur de l'écart entre l'heure qu'avait annoncée Ricci et l'heure vraie de l'éclipse. La prédiction des astronomes de l'Empereur est pourtant rapportée avec précision[11]. Le résultat de Ricci ne saurait néanmoins être mis en doute, tant l'audience qu'il lui assura est historiquement attestée.

Alors qu'en 2010 se célébrait le quatrième centenaire de la mort de Matteo Ricci, j'ai visité avec beaucoup d'émotion sa tombe, dans ce cimetière des jésuites, préservé aujourd'hui au cœur de l'École du parti communiste à Beijing (*Beijing shiwei dangxiao*). Pendant la Révolution culturelle (1966-1976), la magnifique stèle de pierre qui marque cette sépulture fut enfouie dans le sol pour la protéger. Ce jésuite astronome, dont le corps reposait devant moi dans une Chine qu'il avait passionnément aimée, nous avait



1.1. La tombe de Matteo Ricci, préservée et honorée dans le cimetière jésuite situé au cœur de Beijing, au sein de l'École des cadres du parti communiste. (Cliché P.L.)

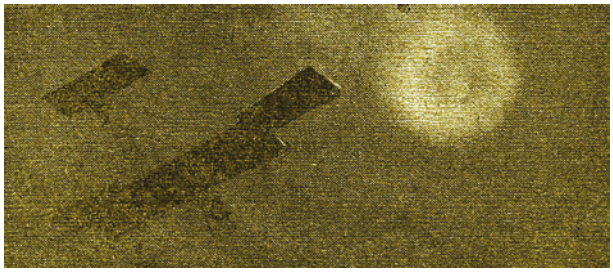
10. http://www.matteo-ricci.org/Opus/opus23.html

11. *Observations mathématiques, astronomiques, géographiques, chronologiques et physiques, tirées des anciens livres chinois ou faites nouvellement aux Indes, à la Chine et ailleurs*, par les Pères de la Compagnie de Jésus. Rédigé et publié par le P. Étienne Souciet, Paris, Rollin, 1732.

précédés de trois siècles et demi, pendant lesquels l'exactitude des calculs d'éclipse n'avait cessé de progresser jusqu'à assurer notre rendez-vous au-dessus de l'Afrique, ce 30 juin 1973…

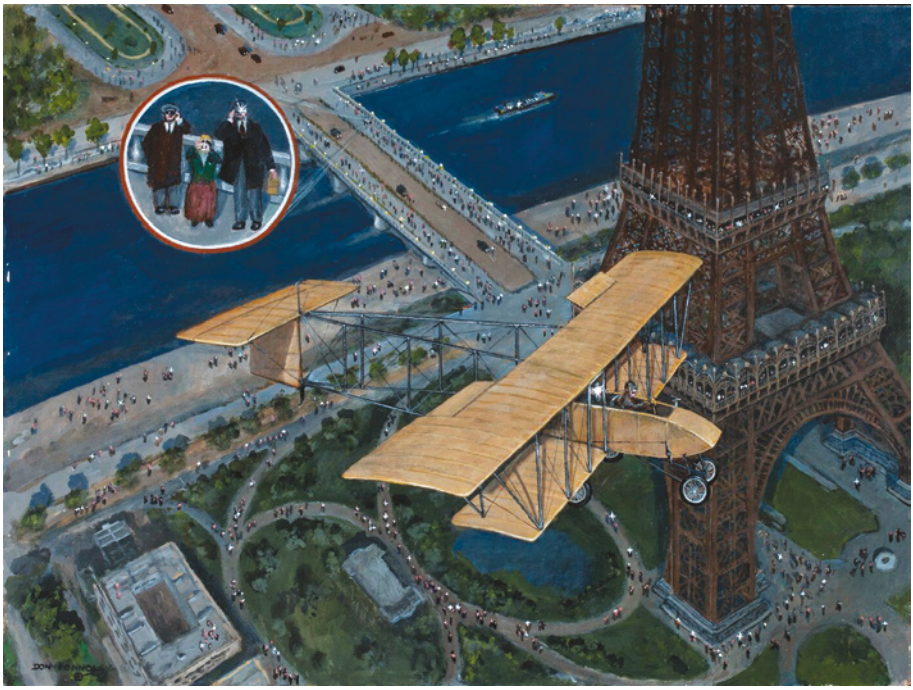
1.4 Vol d'un coucou au-dessus de Paris

1912 : fin de la Belle Époque avant la tuerie de la Grande Guerre. Six ans après la belle tentative de Clément Ader, les frères Wright en 1903 ont réellement maîtrisé les premiers éléments du vol d'un engin plus lourd que l'air. La France se passionne pour l'aviation naissante, les créateurs de drôles de machines volantes déploient leur imagination et souvent leur génie. Une éclipse solaire perlée, ou encore à « collier de diamants », est annoncée : elle doit se produire sur Paris et sa région le 17 avril 1912. Il n'en faut pas davantage pour que deux jeunes gens, Michel Mahieu, vingt ans et déjà pilote renommé, et Gaston de Manthé son navigateur, décident de l'observer depuis leur avion, un biplan Voisin « type militaire », spécialement construit pour Mahieu. L'avion décolle du terrain d'Issy-les-Moulineaux, franchit la Seine près de la tour Eiffel, et, à 1 000 mètres d'altitude, vers Saint-Germain-en-Laye, ses deux passagers rencontrent la totalité sur la ligne de centralité lors du court passage de l'ombre lunaire. Leur vol dure cinquante minutes, ce qui leur permet d'observer la totalité à 12 h 20 et d'atterrir dix minutes après à Issy-les-Moulineaux. Le lendemain, le journal *Le Matin*, qui tire à près d'un million d'exemplaires chaque jour, rend hommage à ces deux hommes « charmés d'avoir observé l'éclipse d'un peu plus près que le commun des mortels », au-dessus d'un léger brouillard. Le numéro du 18 avril du *Matin* publie une étonnante image prise par un photographe anonyme, puisqu'on y voit la silhouette du biplan Voisin de Mahieu à côté d'un soleil éclipsé.



1.2. Le premier vol de l'histoire (1912) pour observer une éclipse totale de Soleil. L'avion Voisin a été photographié depuis le sol dans la direction du Soleil éclipsé. À cause d'un ciel brumeux, l'anneau brillant de la couronne est étalé sur cette reproduction de qualité médiocre. (Extrait du quotidien *Le Matin* du 18 avril 1912)

Malgré la mauvaise qualité de la reproduction, on peut conjecturer que c'est le collier de diamants qu'a saisi le photographe au travers de la brume. Ce contour solaire perlé est formé de points brillants. Il est observé lorsque la taille apparente du disque lunaire est exactement telle que la lumière solaire peut tout juste nous parvenir dans les vallées situées entre les montagnes lunaires se découpant sur le bord du disque.



1.3. Reconstitution, par l'artiste canadien Don Connolly, de l'avion Voisin, piloté par Michel Mahieu et franchissant la Seine pour rejoindre la ligne de centralité au-dessus de Saint-Germain-en-Laye. (© Don Connolly[12])

Lorsqu'éclate la Grande Guerre, Michel Mahieu offre son avion à la nation, puis part au combat. Capitaine, décoré de la Croix de guerre, il sera mortellement blessé sur la Somme, à vingt-six ans. Une impressionnante statue de lui et de son frère Auguste est érigée dans sa ville natale d'Armentières. Bien que sans prétention scientifique, Michel Mahieu a toutefois réalisé la première observation aéroportée d'une éclipse, de surcroît en France. L'envergure du Voisin de Mahieu mesurait 15,75 m, celle du Concorde avec lequel nous volerons soixante ans plus tard moins du double (25,60 m) !

12. Tableau *The Birth of Aviation Astronomy: Solar Eclipse* (Paris, 17 avril 1912). Conception by L. Robert Morris. Composition by Don Connolly and L. Robert Morris. Acrylic on board (61 x 46 cm), 2012.

Mahieu fut donc notre précurseur, et il était juste de rappeler ici son histoire, telle que l'a reconstituée Robert Morris, un professeur et ingénieur canadien passionné d'éclipses et d'avions[13] !

Sept ans plus tard, lors de l'éclipse totale du 29 mai 1919 observée à Principe au large du Gabon, à 2 000 kilomètres au sud de la trajectoire que suivra Concorde un demi-siècle plus tard, les calculs d'Albert Einstein, fondés sur sa nouvelle théorie de la relativité générale publiée en 1916 et prédisant la valeur de la déviation de la lumière d'une étoile par le Soleil, se trouvaient vérifiés par les Britanniques F.W. Dyson et A.S. Eddington[14] : de toute l'histoire, ce fut sans doute l'éclipse la plus féconde pour la science.

1.5 Le mystère de l'auréole solaire

À partir du XIX^e^ siècle, les éclipses vont intéresser les astronomes d'une autre façon. Si jusque-là l'intérêt était celui d'une prévision de plus en plus exacte du lieu et du moment, mettant à l'épreuve les calculs des mouvements lunaires et terrestres, c'est désormais le Soleil lui-même que les éclipses vont permettre de mieux connaître. Les Grecs avaient déjà noté la présence d'une faible auréole lumineuse qui devenait visible autour du Soleil éclipsé. Décrivant une éclipse totale qu'il a observée en 71 ou 83 de notre ère, l'historien Plutarque écrit que « … la Lune laisse déborder autour d'elle, dans les éclipses [de Soleil], une partie du Soleil, ce qui diminue l'obscurité… ». Cette « partie », que nous appelons aujourd'hui la « couronne solaire » et dont l'étude passionne les astronomes, restera longtemps mystérieuse. Johannes Kepler, l'observant en 1567, l'attribue à la réfraction des rayons solaires par une atmosphère lunaire. Le grand astronome britannique Edmund Halley, après l'éclipse totale de 1715 à Londres, propose la même interprétation. Pendant la courte totalité, il a tenté de mesurer le déplacement de cette « partie », pour voir si elle suivait la Lune. Mais la graduation placée dans l'oculaire de sa lunette et observée à l'œil ne lui fournit qu'une mesure biaisée qu'il interpréta donc incorrectement. En se basant sur les affirmations de Edmond Halley, le Français François Arago en 1842 propose de la dénommer couronne lunaire (!). Arago appelle surtout les futurs observateurs à examiner cette auréole lors de l'éclipse de

13. L. Robert Morris, « Biplan Voisin : l'éclipse de 1912, la naissance de l'astronomie en avion », voir Bibliographie.

14. F.W. Dyson, A.S. Eddington, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from the Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919". *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A 220, 291-333 (1920). http://www.jstor.org/stable/91137. Voir aussi https://en.wikipedia.org/wiki/Eddington_experiment ainsi que https://fr.wikipedia.org/wiki/Éclipse_solaire_du_29_mai_1919

1842 visible dans le Sud de la France. Lors des éclipses de 1842 et 1851, l'observation de structures identiques par différents observateurs, placés dans des sites éloignés au sein de la bande de totalité, montra à l'évidence que ces structures de la couronne interne appartiennent au Soleil et non à la Lune ! Des dessins, puis plus tard des photographies des grandes structures de la couronne blanche, confirment qu'au moins une composante importante de la couronne blanche, appartient au Soleil. Pourtant, comme le décrira l'astronome français Jules Janssen à la suite de l'éclipse de 1871 qu'il observa en Inde, cette composante est noyée dans une lueur de nature non comprise, qui sera plus tard identifiée comme la seconde composante, dite F, de la couronne solaire.

Lors d'une éclipse totale observée en Espagne en 1860, le jésuite italien Angelo Secchi établit définitivement que les fines protubérances – des mouvements de matière – observées alors au bord du disque sont bien des phénomènes solaires. Ce n'est qu'ensuite, grâce à la spectroscopie utilisée par Jules Janssen lors des éclipses totales de 1868 au Siam, puis de 1871 en Inde, que la faible enveloppe lumineuse observée lors des éclipses sera correctement attribuée à l'atmosphère du Soleil lui-même et prendra le nom de « couronne solaire ».

Encadré 1A • Brève présentation de la couronne solaire et de la lumière zodiacale[15]

La couronne solaire est une extension irrégulière, variable dans le temps et très peu lumineuse, du disque brillant du Soleil, qui est vu depuis la Terre sous un angle d'un demi-degré, alors que la couronne s'étend sur plusieurs degrés, voire davantage. L'éclat total de la couronne est environ un million de fois plus faible que celui du disque ; il est inférieur à celui d'une pleine Lune vue depuis la Terre pendant la nuit. Comparée, en plein jour et non loin du bord solaire, à la brillance de notre atmosphère, dont les molécules et les poussières diffusent la lumière solaire, la brillance de cette couronne est mille fois plus faible. La couronne ne devient donc observable pour l'observateur terrestre que lorsque le Soleil, et donc l'atmosphère terrestre qu'il éclaire, sont « éteints » pendant une éclipse totale, ou lorsqu'une « éclipse artificielle » est réalisée par un dispositif optique adéquat, appelé coronographe, que nous présenterons plus loin.

La couronne est constituée, d'une part d'un plasma d'hydrogène et d'hélium – atomes qui sont dissociés en noyau électriquement chargé et électrons – à une température d'environ un million de degrés, d'autre part de très fines particules solides (silicates), chauffées à quelques centaines de degrés par le rayonnement qui est issu de la surface du Soleil. La coexistence de ces deux composantes de la couronne, appelées respectivement K et F, à des températures si différentes est due à la très faible densité de la couronne, qui ne permet pas l'égalisation des températures. La lumière émise par la couronne, visible à

15. Ce bref encadré permet aux lectrices et aux lecteurs de saisir à grands traits les caractéristiques majeures de la couronne solaire, telle que connue en 1973. Les chapitres 7 et 8 de la seconde partie de l'ouvrage présentent de façon plus complète ce qu'en 2023 les astrophysiciens savent de cette couronne et de ses secrets non encore déchiffrés.