Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides
Observatoire de Paris



Le manuel des éclipses

EDP SCIENCES

Le manuel des éclipses

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

Observatoire de Paris

EDP SCIENCES

17, avenue du Hoggar
Parc d'Activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Crédits des illustrations : toutes les illustrations de ce livre dont les copyrights ne sont pas indiqués dans les légendes appartiennent à l'Imcce - Observatoire de Paris.

Illustrations de couverture : © Imcce - Observatoire de Paris et © Institut d'Astrophysique de Paris.

ISBN : 2-86883-810-3

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 2005

Avant-propos

Prédire les éclipses de Soleil a été depuis l'Antiquité une préoccupation importante des astronomes et leur observation a suscité, et suscite toujours, un énorme engouement. En effet ces événements sont ceux qui, parmi tous les phénomènes célestes, nous laissent après quelques minutes d'émotion des impressions remarquables et recueillent certainement pour cela le plus grand succès populaire.

Nombre d'observateurs, issus non seulement du milieu astronomique mais aussi et surtout du grand public, sont fascinés au point de parcourir des milliers de kilomètres afin de les observer dans les meilleures conditions. Mais nombreuses sont les questions qu'ils peuvent se poser, des plus fondamentales aux plus pratiques :

Quelle est l'histoire de ces phénomènes ? Quels mécanismes sont en jeu dans les éclipses de Soleil et de Lune? Comment ceux-ci sont-ils pris en compte dans le calcul de leurs circonstances ? Pourquoi constate-t-on leurs occurrences en séries ? Quelles sont les prochaines éclipses et où peut-on les observer ? etc.

Une équipe de spécialistes s'est réunie ici pour y répondre. Cet ouvrage recueille leur expérience dans leurs domaines respectifs et diffuse cette somme de connaissances. L'année 1999 avait permis à une foule innombrable en France et au-delà d'apprécier ce type d'observation certainement pour la première fois. Ces événements sont effectivement rares en lieu donné. Cependant, plusieurs éclipses de Soleil se présentent favorablement prochainement et l'expérience pourra donc être renouvelée.

Attention cependant, on ne rappellera jamais assez, que l'observation directe du Soleil nécessite de prendre des précautions élémentaires pour éviter des séquelles ophtalmiques irréversibles. Un chapitre de ce livre est réservé à cette information primordiale.

Nous souhaitons que ce livre contribue ainsi à faciliter l'observation sans risque et la compréhension précise de ces phénomènes grandioses.

William THUILLOT
Directeur de l'Institut de Mécanique Céleste
et de Calcul des Éphémérides

Cet ouvrage a été réalisé sous la direction de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, institut de l'Observatoire de Paris, avec l'aimable collaboration de :

Jean-Eudes ARLOT
Directeur de recherche CNRS, Observatoire de PARIS - IMCCE, pour le chapitre 1,

Daniel CRUSSAIRE
Ingénieur de recherche CNRS, Observatoire de Paris - LESIA, pour le chapitre 13,

Michel LERNER
Directeur de recherche CNRS, Observatoire de Paris - SYRTE,
et
Denis SAVOIE
Directeur du département astronomie-astrophysique, Palais de la découverte, Chercheur associé, Observatoire de Paris - SYRTE, pour le chapitre 2,

Patrick ROCHER
Astronome, Observatoire de Paris - IMCCE, pour les autres chapitres.

Préface

Il y a plus de 5 ans l'Institut de mécanique céleste et de calculs des éphémérides a publié chez EDP Sciences un petit livre sur les éclipses de Soleil, à l'occasion de l'éclipse totale du 11 août 1999 qui a pu être observée dans toute l'Europe et même bien au-delà. Cet ouvrage était évidemment ciblé sur cette seule éclipse. Il était donc très concis en ce qui concerne les aspects scientifiques de ce phénomène purement astronomique. Voici donc la première édition d'un ouvrage très complet sur ce thème complexe et universel puisqu'il a concerné toutes les civilisations et qu'il jalonne la grande histoire de l'Humanité.

Les éclipses sont aujourd'hui ressenties comme un phénomène céleste certes bien compris (alignements fortuits d'astres sur des orbites elliptiques, etc.) mais encore faut-il les calculer précisément et les prévoir. Dans cet art, l'IMCCE excelle et nous livre, avec cette monographie, une véritable **bible des éclipses**. Distinguons tout de suite la contribution centrale de P. Rocher qui consacre sa vie à ces calculs et se passionne aussi pour le sujet en général. Ainsi éclipses totales et annulaires du Soleil et éclipses de Lune sont également traitées dans cet ouvrage.

Après l'introduction due à J.E. Arlot, une première partie écrite par M. Lerner et D. Savoie est d'abord consacrée aux aspects historiques du sujet, avec l'accent mis sur les éclipses de Soleil. On y retrouve quelques explications historiques très bien argumentées.

La partie principale proprement scientifique commence par des généralités et des aspects fondamentaux du phénomène qui relèvent évidemment de la mécanique céleste. Après avoir introduit toutes les définitions nécessaires aux calculs du mouvement des astres, le problème géométrique est posé par P. Rocher, de manière à bien distinguer les différents types d'éclipses du Soleil : totales, annulaires,

mixtes et partielles. Une attention particulière est donnée aux calculs des cônes d'ombre et de pénombre. Ainsi la notion de la magnitude et de la grandeur des éclipses est introduite. Suivent des développements propres aux calculs modernes des éclipses, y compris les inévitables éléments de Bessel qui permettent en dernier ressort le calcul des circonstances précises de l'éclipse et la réalisation des cartes détaillées en différentes projections. Les canons (tables détaillées) des éclipses de Soleil sont ensuite exposés, en s'arrêtant sur le cas des éclipses les plus longues.

P. Rocher passe ensuite en revue toutes les particularités relevées au cours de ses investigations, sur les circonstances des éclipses de Soleil : périodes de récurrences et suites longues, en se fondant notamment sur les évolutions des éclipses homologues. Une partie qui intéressera de nombreux lecteurs potentiellement concernés par les observations futures des éclipses de Soleil est ici remarquablement traitée : il s'agit des éclipses futures, jusqu'en 2020. Par ailleurs, les éclipses passées, en commençant par celles du XVI^{e} siècle, sont également considérées, ce qui ouvre la possibilité d'effectuer des retrodictions d'évènements remarquables en faisant des extrapolations plus lointaines. Sur un thème proche et pour aborder des applications pratiques évidentes, des développements sont proposés sur le ralentissement de la Terre. Enfin, une petite partie est consacrée aux précautions à prendre lors des éclipses de Soleil de manière à éviter les graves traumatismes ophtalmiques causés par une vision directe de l'astre même partiellement occulté.

Un chapitre rédigé par D. Crussaire porte ensuite sur quelques observations effectuées lors de l'éclipse mémorable du 11 août 1999 ainsi que sur les aspects médiatiques de cet évènement. Ce chapitre précède une autre partie scientifique importante, de nouveau traitée par P. Rocher et examinant cette fois des éclipses de Lune. Le plan de cette partie rappelle un peu la partie consacrée aux éclipses de Soleil, ce qui est bien normal puisqu'il s'agit presque du même phénomène du point de vue de la mécanique céleste. Bien entendu, les éclipses de Lune ont leurs spécificités. Pour commencer, elles se produisent la nuit et elles sont visibles par beaucoup plus de monde. Ainsi les effets géométriques résultant de l'atmosphère terrestre sont développés. On retrouve de plus les canons des éclipses de Lune mais surtout, le problème du saros en même temps que celui des suites longues qui sont exposés dans le détail. Les aspects curieux que prennent ces suites sont examinés, y compris les évolutions des éclipses homologues de Lune. Ces parties se terminent par une revue d'éclipses anciennes, ainsi que par une petite partie historique sur le calcul de la distance Terre-Lune.

Enfin des tableaux des éclipses de Lune et de Soleil par année sont publiés en annexe pour tout l'intervalle entre 2000 et 2050.

Par la qualité de sa forme et de son contenu, cet ouvrage n'a aucun équivalent dans la littérature scientifique internationale. À la fois complet et pratique, cet ouvrage est nécessaire à tous ceux qui veulent observer le phénomène d'éclipse de Soleil ou de Lune, ainsi qu'à ceux qui s'intéressent aux aspects mythologiques et historiques du phénomène. Il s'agit de plus d'une excellente introduction à la mécanique céleste et en même temps qu'une rare illustration de toute l'utilité de ces calculs pour les applications pratiques. Grâce aux nombreuses illustrations, qui sont d'une grande qualité graphique, l'exposé s'avère à la portée d'un grand nombre de lecteurs du niveau universitaire. Enfin, cet ouvrage fait honneur à tous ceux qui se consacrent à l'observation scientifique des éclipses totales et il ouvrira sans aucun doute de nouvelles vocations en liaison avec ce phénomène naturel par essence qui a déjà stupéfait tant d'hommes et de femmes et qui est toujours resté l'objet d'un ravissement « cosmique » sans égal.

Serge KOUTCHMY

Institut d'Astrophysique de Paris- CNRS
et Université P. et M. Curie, Paris VI

Sommaire

Avant-propos ..... **III**

Préface ..... **V**

1 – Introduction **1**

1. Les phénomènes d'éclipses dans le système solaire, et au-delà… 1
2. La mesure des distances 2
3. Caractéristiques des orbites et distances à la Terre 10

2 – Historique **11**

1. Les représentations mythologiques 11
2. La compréhension du phénomène des éclipses 12
3. La détermination des zones de visibilité des éclipses de Soleil 17
4. Les éclipses historiques 20
5. Éclipses anciennes et méthodes modernes d'analyse 22

3 – Généralités et définitions **25**

1. Le mouvement de la Terre autour du Soleil 25
2. Le mouvement de la Lune autour de la Terre 29
3. Les phases de la Lune 35
4. La lunaison moyenne 37
4. La lunaison vraie 38
5. Dimensions et distances des corps 39

4 – La géométrie des éclipses de Soleil **41**

1. Le cône d'ombre et le cône de pénombre 41
2. Les différents types d'éclipses de Soleil 42
3. Les différents types d'éclipses de Soleil 44
4. Caractéristiques des cônes d'ombre et de pénombre 50
5. Magnitude ou grandeur d'une éclipse de Soleil 54
6. Degré d'obscuration d'une éclipse 55

5 – Détermination des types d'éclipses en fonction des positions orbitales 57

1. Diamètres apparents 57
2. Positions orbitales 58
3. Types d'éclipses en fonction des distances des corps 59

6 – Circonstances générales et locales des éclipses de Soleil 61

1. Circonstances générales 61
2. Circonstances locales 63
3. Définition des éléments de Bessel 65
4. Calcul des circonstances locales 68
5. Les cartes d'éclipses 70

7 – Quand ont lieu les éclipses de Soleil ? 75

1. Le mouvement moyen de la ligne des nœuds 75
2. Le calcul de la saison des éclipses 76
3. Le mouvement réel de la ligne des nœuds 77
4. Critère en latitude 78
5. Critère en longitude 83
6. Nombre d'éclipses à chaque saison d'éclipse 84
7. Les séries courtes d'éclipses 88
8. Répartition des éclipses sur une période de 22 ans 90

8 – Canons et grandeurs des éclipses de Soleil 93

1. Les canons d'éclipses de Soleil 93
2. Le canon d'éclipses de Soleil de l'IMCCE 94
3. Les éclipses totales les plus longues 95
4. Les éclipses annulaires les plus longues 97
5. Les éclipses partielles les plus petites 97

9 – Les éclipses récentes et futures de Soleil 101

1. Les éclipses totales entre 1998 et 2020 101
2. Les éclipses annulaires entre 1998 et 2020 101
3. Fréquence des éclipses centrales de Soleil en France 101
4. Éclipses de Soleil du XVI^{e} au XXI^{e} siècle 105

10 – Les périodes de récurrence des éclipses 109

1. Les périodes de récurrence 109
2. La décomposition d'un réel en fractions continues 111
3. Autres périodes de récurrence 112
4. Nombre d'éclipses dans un saros 114

11 – Les suites longues d'éclipses de Soleil 115

1. Éclipses homologues et suites longues 115
2. Évolutions des éclipses homologues 117
3. Évolution réelle des lignes de centralité des éclipses homologues 119
4. Évolutions des éclipses homologues 120
5. Exemple de suite longue 122

12 – Observation d'une éclipse de Soleil 127

1. Précautions à prendre pour observer une éclipse de soleil 127
2. L'utilisation de filtres pour l'observation des éclipses 129
3. Les traumatismes causés par le Soleil 130

13 – L'observation de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 133

1. La météo 133
2. Les médias 135
3. Le rôle des associations nationales 136
4. Le rôle des clubs d'astronomie 139
5. Les observations professionnelles 140
6. Les observations amateur 147

14 – Les éclipses anciennes de Soleil 151

1. Le ralentissement de la Terre 151
2. Les sources anciennes 153
3. Exemple de la détermination du ralentissement de la rotation terrestre 154
4. La prédiction des éclipses 155
5. Intérêts scientifiques des éclipses de Soleil 156

15 – La géométrie des éclipses de Lune 159

1. Le cône d'ombre et le cône de pénombre 159
2. Les différents types d'éclipses de Lune 160

3. Caractéristiques des cônes d'ombre et de pénombre 161
4. Demi-diamètres apparents géocentriques de l'ombre et de la pénombre 162
5. Les effets géométriques de l'atmosphère terrestre 163
6. Les effets lumineux de l'atmosphère terrestre 164
7. Grandeur ou magnitude d'une éclipse de Lune 167
8. Les données fournies pour une éclipse de Lune 168
9. Zones de visibilité d'une éclipse de Lune 172
10. Carte de visibilité de l'éclipse totale du 4 mai 2004 173

16 – Quand ont lieu les éclipses de Lune ? 175

1. Le mouvement moyen de la ligne des nœuds 175
2. Critère en latitude 176
3. La démonstration du critère en latitude 178
4. Critère en longitude 181
5. Les séries courtes d'éclipses 182

17 – Canons et grandeurs des éclipses de Lune 185

1. Grandeurs des éclipses de Lune 185
2. Les canons d'éclipses de Lune 186
3. Le canon d'éclipses de Lune de L'IMCCE 186
4. Les éclipses totales les plus longues 187
5. Les éclipses totales les plus grandes 188
6. Les éclipses les plus faibles et les plus courtes 190

18 – Le saros et les suites longues d'éclipses de Lune 193

1. Nombre d'éclipses dans un saros 193
2. Éclipses homologues et suites longues d'éclipses de Lune 193
3. Évolutions des éclipses homologues 195
4. Positions des éclipses d'une saison dans les suites longues de saros 197
5. Évolutions des éclipses homologues 199

19 – Les éclipses anciennes de Lune 205

1. Visibilité des éclipses anciennes à l'œil nu 205
2. Quelques éclipses historiques 207
3. Rotondité de la Terre 209

20 – Le calcul de la distance Terre-Lune 211

1. **Par Aristarque de Samos 211**
2. **Une des démonstrations d'Aristarque 213**
3. **Par Claude Ptolémée 215**

Annexe A – Les éclipses entre 2000 et 2050 219

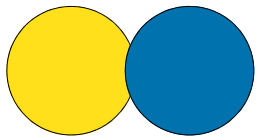
1. **Éclipses de Soleil et de Lune entre 2000 et 2050..... 219**
2. **Les statistiques sur ces éclipses..... 223**
3. **Tableaux des éclipses de Lune et de Soleil par année..... 224**
4. **Tracé des éclipses sur la période 2000 à 2050..... 226**

Annexe B – Les éclipses en 2005 et 2006 231

1. **Les éclipses de Soleil de l'année 2005..... 231**
2. **Les éclipses de Soleil de l'année 2006..... 246**
3. **Éclipse annulaire du 22 septembre 2006..... 257**

Glossaire 261

1



Introduction

1. Les phénomènes d'éclipses dans le système solaire, et au-delà…

L'éclipse totale de Soleil est le phénomène céleste par excellence : c'est un phénomène que l'on ne peut pas ne pas voir, c'est la nuit en plein jour ! C'est donc un phénomène que l'on a vu de tous temps et qui a toujours impressionné les spectateurs : le disque de la Lune vient occulter parfaitement le disque solaire, plongeant l'observateur dans la nuit ! Malheureusement, c'est un phénomène qu'un être humain a peu de chance de voir dans sa vie s'il en ignore l'existence. Quelle est la probabilité de survenue d'une éclipse totale pour un lieu donné ? Très faible ! Si les éclipses totales observables en France et alentour ont lieu régulièrement une ou deux fois par siècle (en 1544, 1605, 1630, 1706, 1724, 1842, 1961, 1999, 2081, 2090 pour la période 1500-2100), ce n'est plus le cas pour un lieu donné. Bien sûr les éclipses partielles sont, elles, visibles par un grand nombre de personnes mais encore faut-il s'y attendre, une éclipse partielle étant quasiment invisible à l'œil nu, la lumière solaire restante étant toujours éblouissante. Seuls quelques zones géographiques bénéficient de plusieurs éclipses totales successives : la région parisienne a eu droit aux éclipses totales de 1724 et 1764, la Suisse celles de 1706 et 1724, et la Bretagne verra les éclipses totales de 2081 et 2090. Ainsi, durant leur vie seuls quelques privilégiés verront deux éclipses totales de Soleil. C'est peu, mais c'est suffisant pour se poser des questions sur le pourquoi et le comment du

Voir une éclipse donne envie de prévoir la date du prochain phénomène ! C'est ainsi que l'humanité a compris de mieux en mieux les mystères du ciel.

phénomène et pour tenter de prévoir quand un tel phénomène se reproduira. Ces questions se sont posées dès l'antiquité, dès que l'on a attribué une cause naturelle à ces phénomènes.

Si les éclipses totales de Soleil sont rares pour un observateur donné, ce n'est pas le cas des éclipses de Lune qui sont visibles par tous, du moment que l'on voit la Lune ! La Lune, qui est éclairée par le Soleil, entre soudain dans l'ombre projetée par la Terre et disparaît… Là aussi la question de la cause puis de la périodicité du phénomène va s'imposer à la curiosité du genre humain.

Toujours ces questions ont tourné autour d'un problème simple : peut-on comprendre comment est fait notre univers en observant le ciel et les phénomènes célestes qui s'y déroulent ? Le ciel, la nuit, est constellé d'étoiles qui semblent se trouver toutes à la même distance de la Terre. Quelle est cette distance ? Parmi ces étoiles, certaines – ce sont les planètes – ont un mouvement rapide, pourquoi ? Le Soleil et la Lune ont des diamètres apparents très proches. Correspondent-ils à des objets similaires ? Qu'est-ce qui règle leurs mouvements ? Pour répondre à ces questions, deux approches sont possibles :

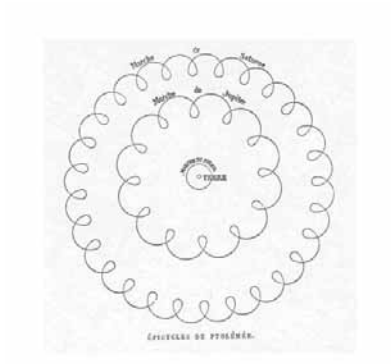
- mesurer les distances et observer les mouvements des astres du ciel ;
- « modéliser » l'univers qui nous entoure, c'est-à-dire supposer des distances, des tailles pour les corps célestes, des mouvements et voir si ces suppositions permettent de prévoir ce que l'on va observer dans le ciel (prévoir les éclipses, par exemple ou les mouvements des planètes).

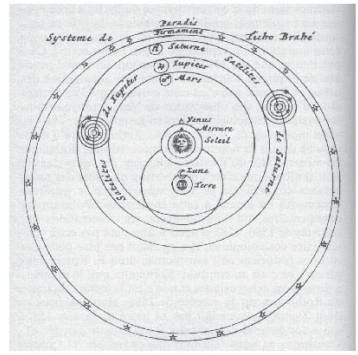
Mesurer la distance de la Terre aux étoiles n'est pas possible sans imaginer d'abord un modèle théorique d'univers, puis de le confronter aux observations pour le valider ou pour en chercher un autre.

Ces deux approches sont, en fait, indissociables. L'une sans l'autre peut nous fournir une représentation bien trompeuse de l'univers. Les anciens ont privilégié la deuxième approche (surtout pour des raisons techniques, les mesures précises étant hors de leur portée) et ont adopté le modèle géocentrique de Ptolémée pendant plus de 1000 ans ! Il faudra attendre Tycho Brahé et Kepler pour que les observations invalident le modèle de Ptolémée.

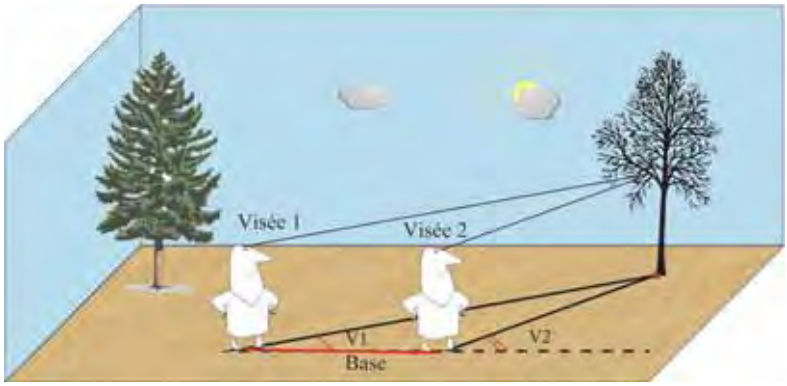
2. La mesure des distances

Revenons sur le problème des distances des astres à la Terre : c'est le problème fondamental qui, résolu, va nous fournir la taille et la forme de l'Univers. La méthode de mesure des distances d'objets lointains et inaccessibles est connue depuis l'antiquité : c'est la triangulation. Il suffit de mesurer deux angles et une base pour calculer une distance.





Modèles de système solaire : les modèles de système solaire de Ptolémée à gauche (la Terre est immobile au centre de l'Univers et le Soleil, la Lune et les planètes tournent autour de la Terre) et de Tycho Brahé à droite (la Terre est immobile au centre de l'Univers, le Soleil tourne autour mais les planètes tournent autour du Soleil).



Le principe de la triangulation : mesurer une distance à partir de la mesure d'angles.

Malheureusement les distances à la Terre sont grandes et les bases possibles limitées par la taille de la Terre. Il est nécessaire de disposer d'instruments de mesure précis qui ne sont apparus qu'au XIX^{e} siècle. Il a donc fallu se débrouiller autrement en attendant que la technique progresse. Comment ? Tout simplement en observant les phénomènes comme les éclipses.

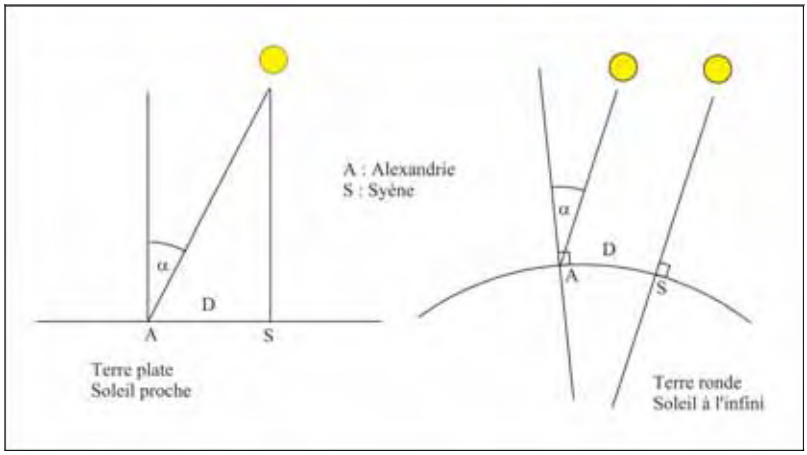
Le principe de la triangulation pour mesurer les distances est connu depuis l'antiquité. Malheureusement il ne s'applique que difficilement aux astres du ciel.



La distance Terre-Lune en respectant les proportions de taille des astres.

C'est grâce aux éclipses que l'on a une preuve de la rotondité de la Terre : l'ombre projetée de la Terre sur la Lune apparaît circulaire. CQFD. Très tôt les éclipses vont être utilisées pour mesurer la distance Terre-Lune. Le rayon de cette ombre projetée de la Terre sur la Lune est égal à trois fois et demie le rayon de la Lune. En supposant l'ombre de la Terre cylindrique, cela signifie que la Lune est trois fois et demie plus petite que la Terre. Connaissant le rayon de la Terre, on en déduit le rayon de la Lune, puis, mesurant le diamètre apparent de la Lune qui est d'un demi-degré, on en déduit la distance Terre-Lune. Tout cela est bien approximatif mais cela permet déjà d'avoir une idée approximative de la distance Terre-Lune. Bien sûr, la première chose fondamentale est de connaître le rayon de la Terre. Revenons sur cette détermination qui illustre bien l'importance de la mesure et celle du modèle. Chacun connaît la mesure d'Ératosthène effectuée en observant la hauteur du Soleil à Alexandrie et à Syène (aujourd'hui Assouan) en Égypte. On connaît moins les mesures similaires effectuées auparavant : elles sont pourtant très instructives comme le montre la figure 1.1.

Figure 1.1. La mesure d'Ératosthène.



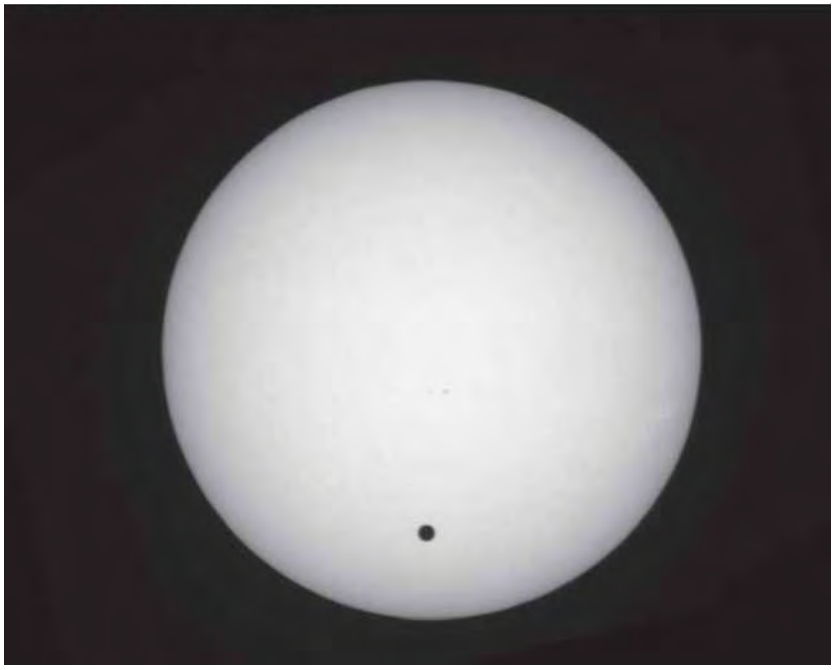
À gauche, la différence de visée du Soleil entre Alexandrie et Syène permet de calculer une distance au Soleil de 6500 km. On a supposé que la Terre était plate et que le Soleil était proche de la Terre. À droite, la même mesure donne un rayon terrestre de 6500 km, c'est la mesure d'Ératosthène. C'est la même mesure que précédemment mais le modèle théorique est bien différent : on suppose la Terre ronde et le Soleil très loin ! On voit bien l'importance du modèle d'univers associé aux mesures.

Ces mesures simples et l'observation des éclipses ne permettent pas de mesurer d'autres distances que celle de la Lune. C'est peu pour

comprendre comment est fait notre univers, quelle est sa taille, où sont les étoiles… ? D'autres phénomènes célestes qui rappellent les éclipses vont nous aider. Comme les éclipses, ces phénomènes vont utiliser une propriété particulière de notre système solaire : tous les astres du système solaire tournent dans des plans très proches, ce qui favorise les alignements de trois corps et les éclipses.

Les éclipses (de Soleil, de Lune ou autres) sont des phénomènes facilement observables : ils vont servir en premier pour comprendre et mesurer l'Univers.

Un phénomène qui a eu une grande importance, c'est le passage de la planète Vénus devant le Soleil. On retrouve là la même configuration que lors d'une éclipse de Soleil : un astre vient s'interposer entre la Terre et le Soleil. Ce n'est plus la Lune, mais la planète Vénus qui, bien sûr, ne va masquer que très peu le disque solaire. Ce phénomène sera difficile à observer, très rare mais son importance va être très grande.

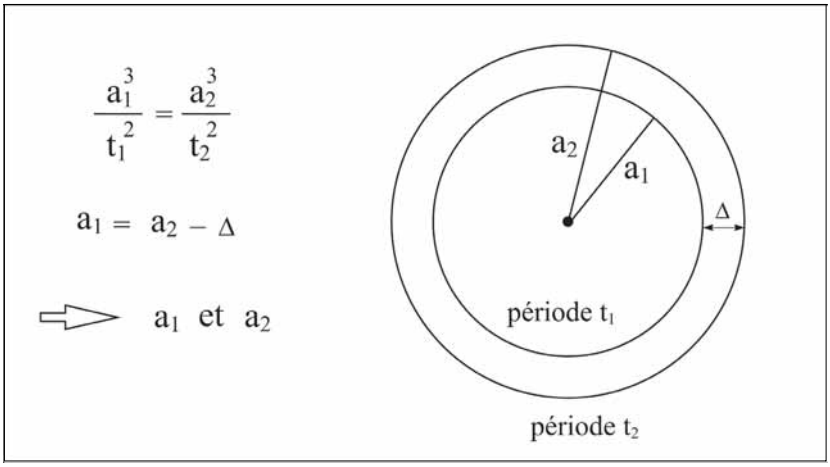


La planète Vénus passe devant le Soleil le 8 juin 2004.

Pourquoi cette éclipse insignifiante va-t-elle mobiliser des générations d'astronomes ? Parce que les astronomes n'ont, au XVII^{e} siècle, toujours pas une bonne représentation du système solaire. Si le modèle héliocentrique s'impose, il reste à le démontrer et à en mesurer la taille. C'est Kepler qui va révolutionner notre connaissance du système solaire. En étudiant les observations de Tycho Brahé, il va

constater deux choses importantes : les planètes ne tournent pas autour du Soleil sur des cercles (hypothèse de Copernic) mais sur des ellipses (c'est ce que l'on appellera la première loi de Kepler) avec une vitesse non uniforme, plus grande quand les planètes s'approchent du Soleil et plus faible quand elles s'en éloignent (c'est la deuxième loi de Kepler). L'autre constatation fondamentale est que les périodes de rotation des planètes et leur distance au Soleil sont liées (voir encadré) et donc, si on connaît une distance dans le système solaire, on les connaît toutes !

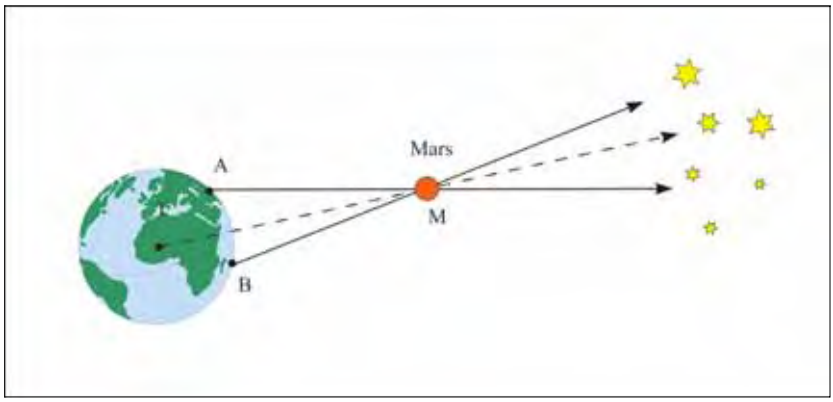
La troisième loi de Kepler.



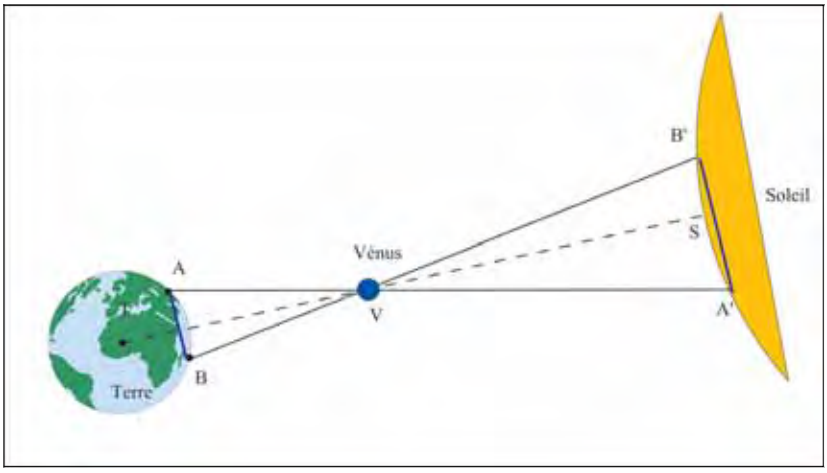
C'est Kepler, en mettant en évidence la nature elliptique des orbites des planètes qui amène une véritable révolution dans notre conception de l'Univers.

Le demi-grand axe a et la période de révolution t de chaque planète autour du Soleil sont liés par la relation : a^3/t^2 = constante. Ainsi connaissant une seule distance dans le système solaire, il suffit de connaître les périodes de révolutions des planètes pour connaître les distances au Soleil.

Jusqu'au XVII^{e} siècle, seule la distance de la Lune est mesurable. Le modèle de système solaire de Kepler va entraîner les astronomes à chercher à mesurer la distance de Mars ou celle de Vénus, les planètes les plus proches de la Terre : la connaissance de cette distance donnera toutes les autres. La méthode de triangulation (ou parallaxe) est difficile sans un repère facilement observable. Kepler prévoit que la planète Vénus doit passer régulièrement devant le Soleil et Halley propose d'utiliser ce passage pour mesurer la distance de Vénus. En effet, deux observateurs sur Terre ne verront pas Vénus passer devant le Soleil au même endroit et cette différence permettra un calcul de triangulation.



La mesure de la parallaxe de Mars sur fond d'étoiles.



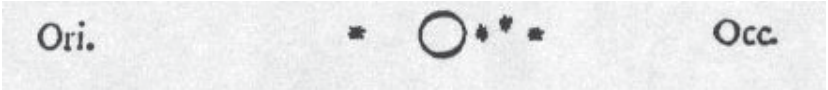
La mesure de la parallaxe et de Vénus sur le disque solaire.

Effectivement les observations du XVIII^{e} siècle résoudront le problème de la taille du système solaire. Voilà donc une petite « éclipse » de Soleil donnant lieu à de grands résultats !

Existe-t-il d'autres éclipses dans le système solaire ? Oui, et pas des moindres puisque ces éclipses vont permettre de mesurer la vitesse de la lumière et de cartographier les continents inconnus sur Terre. Expliquons-nous. Lorsque Galilée découvre les gros satellites de Jupiter, c'est d'abord une révolution philosophique : la planète Jupiter a des satellites ! Tout ne tourne pas exclusivement autour de la Terre. On s'en doutait mais on en avait là une preuve concrète. Ces satellites ont alors été abondamment observés et on a découvert qu'ils passaient régulièrement dans l'ombre de Jupiter (il y avait éclipse). On avait découvert là une horloge parfaite. Leur régularité permettait de prévoir

les dates des éclipses avec une grande précision. Il faut préciser ici qu'à l'époque il n'existait pas d'horloges mécaniques capables de tenir la seconde ou même la minute plusieurs jours de suite. Les satellites de Jupiter ne risquaient pas de se dérégler aussi rapidement ! Et pourtant… On s'aperçut vite qu'ils avançaient pendant 6 mois puis qu'ils retardaient durant les 6 mois suivants !

Les satellites galiléens vus par Galilée.



Les satellites galiléens vus par la sonde Galileo. © NASA.



Ce fut une nouvelle découverte fondamentale due à Römer à l'observatoire de Paris : la lumière n'avait pas une propagation instantanée. Elle mettait plus de temps quand la Terre était loin de Jupiter que lorsqu'elle en était proche. Cette observation combinée aux mesures de distances dans le système solaire fournit la vitesse de la lumière aux physiciens. Nos satellites de Jupiter purent alors devenir l'horloge précise dont on avait besoin pour mesurer les longitudes. En effet, un explorateur d'une contrée lointaine a besoin de connaître l'heure du méridien d'origine qui, par comparaison avec l'heure solaire du lieu, lui donnera sa longitude. Ce seront les éphémérides des éclipses des satellites de Jupiter qui le permettront. Voilà ainsi des éclipses qui auront eu beaucoup d'importance.

Notons que la plupart des planètes ayant des satellites nous montre ce type de phénomène mais Jupiter et ses satellites sont beaucoup plus brillants et plus facilement observables que leurs concurrents…

Revenons aux éclipses de Soleil : ce phénomène a-t-il aussi lieu sur les autres planètes ou bien est-ce un hasard fantastique que la Lune et le Soleil aient le même diamètre apparent ? Pour les principales

planètes, voici les diamètres apparents du Soleil et des satellites vus de la planète elle-même :

Planète	Diamètre apparent du Soleil en minutes de degré	Satellite	Diamètre apparent du satellite en minutes de degré
Terre	32′	Lune	29′ à 33′
Mars	21′	Phobos	7′
		Deimos	2′
Jupiter	6′	Io	30′
		Callisto	9′
Saturne	3′	Mimas	8′
		Téthys	12′
		Rhéa	10′
		Titan	14′

Diamètres apparents des planètes et de leurs satellites.

La Terre n'est pas la seule planète à connaître des éclipses de Soleil : Jupiter et Saturne aussi, mais pas Mars (satellites trop petits) ni Vénus et Mercure (pas de satellites).

On constate que les satellites de Mars sont trop petits pour occulter complètement le Soleil, donc pas d'éclipse de Soleil sur Mars ! En revanche sur Jupiter, les satellites galiléens occultent tous facilement le Soleil, plongeant de grandes zones de Jupiter dans la nuit. Ce sont des « passages d'ombre » que l'on voit très bien depuis la Terre. C'est la même chose sur Saturne.



Passage de l'ombre de Titan, à gauche au-dessus de l'anneau, sur Saturne. © NASA.

Pour terminer, citons d'autres cas d'éclipses :

- les occultations d'étoiles par les astéroïdes. Les étoiles sont des soleils lointains. Les astronomes surveillent les éclipses totales de ces soleils par les astéroïdes, ces petits astres que l'on connaît peu. Ces éclipses permettent d'observer l'ombre des astéroïdes, ce qui donne des informations sur leur forme. Comme pour les éclipses

de Soleil, chaque phénomène donne lieu à une bande de centralité qui correspond à la zone sur Terre d'où l'on verra l'éclipse ;

- les éclipses des étoiles doubles dites « binaires à éclipses ». Lorsque deux étoiles gravitent l'une autour de l'autre, il arrive que l'une des deux soit cachée à la vue des observateurs terrestres qui peuvent ainsi séparer les deux étoiles qui se confondent habituellement ;

- les « transits » des exo-planètes. Comme Vénus passe devant le Soleil, les planètes tournant autour des étoiles lointaines peuvent aussi passer devant leur étoile pour un observateur terrestre : c'est l'une des méthodes pour mettre en évidence ces planètes extra solaires invisibles depuis la Terre.

Comme on peut le constater, les éclipses de Soleil sont l'arbre qui cache la forêt des nombreux autres phénomènes d'éclipses qui intéressent bien plus les astronomes mais qui sont évidemment bien moins spectaculaires pour le simple terrien…

3. Caractéristiques des orbites et distances à la Terre

Les caractéristiques du Soleil, de la Lune et de la Terre.

	Soleil	Terre	Lune
Diamètre en km	696 000	6 378	3 475
Diamètre (Terre = 1)	109	1	0,27
Demi-grand axe de l'orbite en km	-	149 598 023	383 398
Gravité à la surface	28	1	0,17
Vitesse de libération en km/s	618	11	2,4
Période de rotation en jours	27	0,997 3	27,3
Période de révolution en jours	-	365,256	27,3

Les distances à la Terre des astres du système solaire.

Corps céleste	Distance minimale en ua	Distance minimale en millions de km
Vénus	0,266	39,79
Mars	0,372	55,65
Mercure	0,552	82,5
Soleil	0,983	147
Jupiter	3,957	591,97
Saturne	8,050	1 204,28
Uranus	17,292	2 586,88
Pluton	28,699	4 293,37
Neptune	28,817	4 311,02

2 Historique

1. Les représentations mythologiques

Dans presque toutes les cultures anciennes et dans les sociétés sans écriture, le phénomène prodigieux qu'est une éclipse de Lune, et plus encore de Soleil, a été rapporté à une cause surnaturelle, l'intervention d'un dieu, d'un démon ou d'un génie malin menaçant d'éteindre les deux luminaires. Un événement funeste que l'on tentait ordinairement de conjurer avec force vacarme ou des formules magiques destinées à empêcher que la Lune ou le Soleil ne soient dévorés à tout jamais.

En Asie, on rendait un dragon céleste responsable des éclipses (le plus ancien mot chinois pour désigner une éclipse, *shih*, veut dire « manger »). En Inde, c'étaient Rahu et Ketu, les deux parties du démon décapité par Vichnou correspondant respectivement aux *nœuds ascendant et descendant* de la Lune où se produisent les éclipses, qui cherchaient à dévorer la Lune et le Soleil.

Longtemps, en Occident, les astronomes désigneront ces deux nœuds qui font un tour complet du zodiaque en 18,61 ans environ, sous l'appellation de *Caput & Cauda Draconis* (Tête et Queue du Dragon). En Amérique, du Canada jusqu'au Pérou en passant par le Mexique, et encore en Afrique, c'était tel animal mythique ou tel démon qui menaçait de manger soit la Lune, soit le Soleil. Quant à la Grèce ancienne, elle ne fit pas exception à la règle. D'après Démocrite (vers 460-370 av. J.-C.), les éclipses de Lune et de Soleil auraient été au

nombre des événements célestes terrifiants inspirant aux hommes la croyance que des dieux en étaient les auteurs.

2. La compréhension du phénomène des éclipses

2.1. La légende de Thalès

Thalès avait compris la nature du phénomène (« *L'éclipse de Soleil se produit quand la Lune, dont la nature est terrestre, vient se placer à l'aplomb sous lui* »).

Selon une légende solidement établie, Thalès de Milet (VI^{e} siècle av. J.-C.) se serait libéré très tôt de la croyance en la causalité divine des éclipses. En effet, d'après l'historien grec Hérodote (environ 484-425 av. J.-C.), Thalès avait prédit aux Ioniens un obscurcissement du Soleil « *pour l'année dans laquelle elle se produisit* » (*Enquête*, I 74). Peu d'auteurs, tant anciens que modernes, ont mis en doute que celui qui était tenu pour un des sept Sages, ait été en état de prédire une éclipse de Soleil. D'après le Pseudo Plutarque (*Opinion des philosophes*, II 24), Thalès avait compris la nature du phénomène. Mais cela ne lui aurait à l'évidence pas suffi pour passer au stade infiniment plus complexe de la prédiction d'une éclipse se produisant à une date précise et qui soit, en outre, visible en telle région déterminée du globe terrestre.

Aux historiens qui ont fixé avec assurance la date du 28 mai 585 av. J.-C. comme étant celle de l'éclipse solaire annoncée par Thalès, l'historien américain O. Neugebauer a répondu qu'il n'existe aucun cycle pour prédire une éclipse de Soleil en un lieu donné, et que vers 600 av. J.-C. les Babyloniens, compilateurs d'éphémérides luni-solaires que Thalès aurait exploitées, n'avaient élaboré aucune théorie pour la prédiction des éclipses de Soleil. Cette légende relative à Thalès est donc au total aussi peu fiable que celle prêtant à Anaxagore (500-428 av. J.-C.) « *grâce à sa connaissance de la science astronomique* » (Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, II 149), la prédiction d'une chute de météorite !

Si les éclipses de Soleil sont à peu près aussi nombreuses que les éclipses de Lune quand on considère la Terre en sa totalité, on a à peu près deux fois plus de chances d'observer, en un lieu donné, une éclipse de Lune.

2.2. Des Pythagoriciens à Aristote

Certaines périodes sont plus favorisées que d'autres pour observer des éclipses de Soleil dans une même région. L'historien grec Thucydide (460-vers 395 avant J.-C.) vécut dans une telle période. Il note qu'au cours de la guerre du Péloponnèse, les « *éclipses de Soleil furent plus nombreuses qu'à tout autre époque historique* » (*La Guerre du Péloponnèse*, I 23). Cette assertion est confirmée par F. Richard Stephenson (voir la bibliographie à la fin de ce chapitre) qui date les deux éclipses solaires

mentionnées par Thucydide (*op. cit*. II 28 et IV 52) respectivement du 3 août 431 et du 21 mars 424 av. J.-C. La première éclipse (annulaire, visible à Athènes) est décrite en ces termes par l'auteur grec, qui pourrait faire état d'une observation personnelle : « *Un jour de nouvelle Lune (c'est le seul moment semble-t-il où ce phénomène puisse se produire) il y eut en début d'après-midi une éclipse de Soleil. Celui-ci prit la forme d'un croissant et quelques étoiles devinrent visibles ; puis il reprit sa forme normale* ».

Au dire d'Aristote (384-322 av. J.-C.), les Pythagoriciens, qui tenaient les éclipses lunaires pour plus nombreuses dans l'absolu que les éclipses solaires, avaient essayé de rendre compte de ce fait en conjecturant que ce n'était pas seulement la Terre, mais une autre Terre, dite anti-Terre, située à l'opposé de la nôtre et que nous ne voyons pas, qui s'interposait aussi entre la Lune et sa source d'éclairement (*Traité du ciel*, II 13).

Pour gratuite que soit cette hypothèse, elle suppose que les Pythagoriciens, et notamment Philolaos (vers 470-390 avant J.-C.), avaient compris le mécanisme général des éclipses qui postule que les corps célestes sont dotés d'une figure sphérique, que les uns sont opaques et les autres lumineux, et que c'est la position qu'ils occupent par rapport au globe terrestre, à la surface duquel l'observateur est situé, qui détermine pour un temps l'obscurcissement partiel ou total de la Lune ou du Soleil.

Quant à Aristote, il est, semble-t-il, le premier à avoir mentionné parmi les preuves « sensibles » de la rotondité de la Terre la figure que celle-ci projette sur la Lune lorsqu'elle l'éclipse : « *Lors des éclipses, la Lune a toujours pour limite une ligne courbe : par conséquent, comme l'éclipse est due à l'interposition de la Terre, c'est la forme de la surface de la Terre qui est cause de la forme de cette ligne* » (*Traité du ciel*, II 14).

2.3. Les différents types d'éclipses solaires

Géminos (vers 50 av. J.-C.), dans son *Introduction aux phénomènes*, X 1-6, semble offrir le premier exposé synthétique touchant la cause et les différents types d'éclipse solaire. Il précise que le passage de la Lune sous le Soleil (c'est-à-dire lorsqu'elle est en « synode », ou conjonction, avec lui) cause une interception de la lumière solaire, si bien qu'il faudrait en toute rigueur – et la remarque frappe par sa justesse – parler dans ce cas d'*interposition* et non pas d'*éclipse* du Soleil : « *Jamais en effet la plus petite parcelle de Soleil ne s'éclipse ; elle nous devient seulement invisible par interposition de la Lune* ». « *Par suite,* ajoute Géminos, *les éclipses ne sont pas identiques en tous lieux, et il y a de grands écarts dans la*

dimension des éclipses selon les différents climats : en un même instant, le Soleil s'éclipse ici tout à fait, c'est-à-dire pour les lieux situés à l'alignement de l'interposition, ailleurs, dans les lieux situés légèrement en dehors de la ligne d'interposition, il s'éclipse partiellement ; ailleurs encore, on ne voit pas le plus petit début d'éclipse. » (Voir Fig. 2.1., partie droite.)

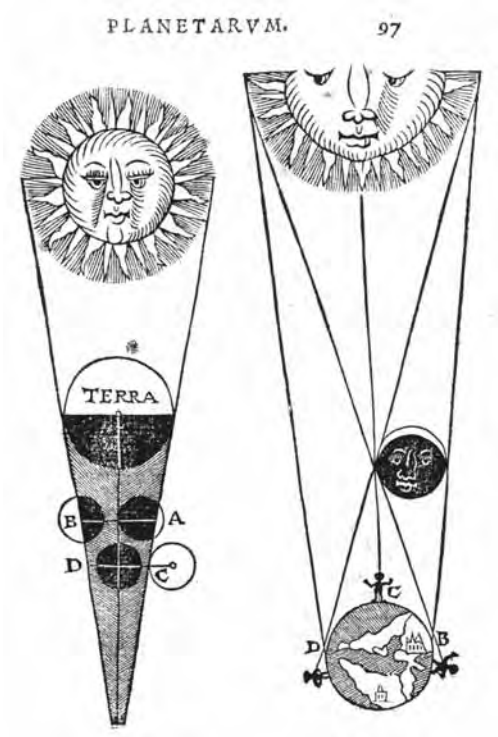


Figure 2.1. Schéma des éclipses de Lune (à gauche) et de Soleil (à droite) tiré de G. Peurbach, Theoricae novae planetarum, Paris 1543. © Observatoire de Paris, cliché n° 2705A.

Ce n'est véritablement qu'avec l'*Almageste*, la plus grande œuvre astronomique de l'antiquité due à l'astronome Claude Ptolémée (II^{e} siècle de notre ère), que le calcul des éclipses de Soleil devient possible, mais pas encore celui de leur zone globale de visibilité.

2.4. La prévision : connaissance des cycles et modèles géométriques

Depuis longtemps, on avait reconnu que les éclipses de Soleil nécessitent deux conditions : que la Lune soit nouvelle et qu'elle soit proche, comme le Soleil, de l'un de ses nœuds. Prévoir une éclipse de Soleil suppose donc que l'on dispose d'une théorie du mouvement de la Lune et d'une théorie du mouvement du Soleil.

Si la théorie de ce dernier mouvement ne posait pas de problème, il n'en allait pas de même dans le cas de la Lune. Notre satellite possède un mouvement complexe en longitude, affecté de nombreuses inégalités. L'observation avait permis de découvrir dans l'antiquité les deux plus importantes, l'*équation du centre* (déjà connue d'Hipparque)

et l'*évection*, justement découverte par Ptolémée. L'auteur de l'*Almageste* savait également que la *parallaxe* lunaire – qui peut dépasser 1° – affecte de façon non négligeable la latitude géocentrique de la Lune, c'est-à-dire sa distance angulaire à l'écliptique. Enfin, Ptolémée connaissait les diamètres apparents du Soleil et de la Lune mis en rapport avec leur distance à la Terre.

C'est ce dernier point qui fait toute la supériorité de l'astronomie grecque sur l'astronomie babylonienne. Car même à son apogée, c'est-à-dire de 300 av. J.-C. jusqu'au début de notre ère, l'astronomie babylonienne n'est capable de prédire que la possibilité ou l'impossibilité d'une éclipse de Soleil. Les éphémérides babyloniennes, qui ne reposent sur aucun modèle géométrique, mais uniquement sur des fonctions arithmétiques, sont néanmoins capables de prévoir, aussi bien que Ptolémée, les coordonnées du Soleil et de la Lune. Mais l'absence de données sur les dimensions relatives de ces deux astres empêche toute prévision sur la visibilité de l'éclipse.

Le calcul d'une éclipse de Soleil se déroule dans l'*Almageste* en trois étapes.

1) Calcul de la distance angulaire de la Lune à l'un de ses nœuds :

On a reconnu assez tôt que les nœuds ne sont pas fixes, mais se déplacent sur l'écliptique, et l'observation a permis de déterminer leur période moyenne de révolution. Tous ces calculs étaient facilités par des tables, de sorte qu'il était assez aisé de prévoir d'une année sur l'autre les dates où une éclipse de Soleil était possible. On savait du reste que les éclipses se produisent sensiblement tous les six mois, lorsque le Soleil franchit un nœud de l'orbite lunaire (*année draconitique*).

2) Calcul, au voisinage de la date où l'éclipse est possible, de l'instant de la conjonction Lune-Soleil :

Autrement dit l'instant de la nouvelle Lune. Ptolémée dispose pour cela d'une bonne valeur du *mois synodique* (intervalle moyen entre deux nouvelles Lunes) qui lui donne l'instant de la conjonction moyenne, puis, après correction de certaines inégalités, l'instant de la conjonction vraie. À ce stade du calcul, il est déjà possible de dire si l'éclipse sera ou non visible : une conjonction ayant lieu en pleine nuit par exemple est évidemment invisible.

3) Calcul, pour une certaine zone en latitude, des conditions d'existence d'une éclipse :

De l'antiquité jusqu'au XVII^{e} siècle, les astronomes chercheront les conditions d'éclipse à l'endroit où se trouve l'observateur et non pour

la Terre en général, comme on le fait aujourd'hui en astronomie moderne. Ce problème, l'un des plus complexes développés dans l'*Almageste*, est traité en utilisant les effets de la parallaxe sur les coordonnées écliptiques de la Lune. Non seulement l'*Almageste* permet de savoir si l'éclipse est partielle ou totale en un certain lieu (la grandeur est exprimée en doigts), mais il rend possible aussi de calculer sa durée et les instants du premier et du dernier contact.

Il est intéressant de noter qu'à aucun moment Ptolémée n'utilise la période de 223 lunaisons – improprement appelée Saros par Edmond Halley – pour prévoir une éclipse de Soleil. Une précision s'impose ici concernant cette période prétendument utilisée par les Babyloniens pour la prédiction des éclipses solaires. Halley publia en 1692 dans les *Philosophical Transactions* un mémoire dans lequel il proposait de corriger un passage de Pline l'Ancien (23-79 ap. J.-C.), où il était question d'une période au terme de laquelle les éclipses se reproduisent dans le même ordre. Certains manuscrits de l'*Histoire naturelle* circulant à l'époque contenaient des variantes, et dans celui qu'il possédait, Halley a pu lire : « *Il est sûr que les éclipses se reproduisent dans le même ordre au bout de 222 mois [Defectus CCXXII mensibus redire in suos orbes], et que le Soleil s'éclipse seulement lorsque la Lune achève ou commence son cours, c'est-à-dire au moment de la conjonction* » (*Histoire naturelle*, II 56). Halley corrigea, à bon droit, 222 en 223 (*CCXXIII*). Mais en consultant la *Souda*, encyclopédie byzantine écrite au X^{e} siècle par un groupe d'érudits (que l'on a longtemps pris pour un savant du nom de *Suidas*), il trouva mention du mot dans les termes suivants : « *Saros, mesure et nombre chez les Chaldéens. Un saros contient 222 mois lunaires qui font 18 ans et six mois. 120 saros correspondent à 2222 (sic* pour *2220) années* ». Croyant à tort que la Souda dépendait ici de Pline (qui n'emploie pas le terme Saros), Halley en conclut que les Babyloniens entendaient par là une période de *223* lunaisons ramenant les éclipses. Mais la Souda dit expressément que 222 mois = 18,5 ans, soit une année de 12 mois exactement (222/18,5 = 12). Or le calendrier babylonien est lunaire, et la durée des mois variable.

La période nommée Saros chez les Babyloniens n'a donc rien à voir avec les éclipses. L'erreur de Halley avait été dénoncée par l'astronome français Guillaume Le Gentil de la Galaisière (1725-1792) dans deux articles très critiques publiés en 1756 : mais ce dernier ne sera pas entendu et depuis, malgré le correctif apporté par nombre d'historiens des sciences, le mot Saros continue de désigner une période de 223 lunaisons, ou 18 ans 11 jours, ou encore 6585 jours, à l'issue de laquelle les éclipses de Soleil et de Lune se reproduisent dans le même ordre.

3. La détermination des zones de visibilité des éclipses de Soleil

La méthode exposée dans l'*Almageste* ne subira pratiquement aucune modification jusqu'au XVII^{e} siècle. On mentionnera néanmoins le grand astronome arabe Al-Battani (milieu IX^{e} –929), qui conclura à la variation du diamètre apparent du Soleil, et donc à la possibilité d'éclipses de Soleil annulaires. Copernic (1473-1543), dans son *De revolutionibus orbium coelestium* paru en 1543, reprendra pratiquement point par point la méthode de Ptolémée, sans y apporter d'amélioration. Une étude complète a montré que cette méthode permettait de détecter pratiquement toutes les éclipses de Soleil ; seules les éclipses faibles, intéressant les régions polaires, échappaient à l'investigation des Anciens.

Les travaux de Tycho Brahe (1546-1601), puis de Kepler (1571-1630), contribueront à augmenter la précision des théories du Soleil et de la Lune ; cette quête de précision ne fera que croître après Newton et la naissance de la mécanique céleste.

À partir du XVI^{e} siècle, on assiste à une augmentation des publications d'éphémérides en Europe ; elles prévoient toutes très correctement les éclipses de Soleil et leur visibilité. Il existe d'ailleurs, depuis le Moyen Âge, des tables spéciales qui prévoient les éclipses très longtemps à l'avance.

L'idée de représenter sur une carte géographique la zone de visibilité d'une éclipse de Soleil remonte au XVII^{e} siècle, avec Jean Kepler et Jean-Dominique Cassini (1625-1712). Il s'agit d'un problème important et délicat qui nécessite la prédiction de l'éclipse générale ; autrement dit, cela consiste à déterminer l'ensemble des points de la surface terrestre qui peuvent voir effectivement une phase de grandeur donnée de l'éclipse (partielle, totale ou annulaire). Edmond Halley, qui disposait des trois éléments indispensables pour réussir une telle prédiction, à savoir une bonne théorie des mouvements du Soleil et de la Lune, une estimation exacte de la distance de la Lune, et enfin des coordonnées géographiques précises, nous a laissé deux cartes remarquables relatives à l'éclipse de Soleil du 22 avril 1715 (dans le calendrier julien) = 3 mai 1715. La première (Fig. 2.2) montre la zone de visibilité de l'éclipse pour le sud de l'Angleterre telle qu'il l'avait *calculée à l'avance*. La seconde (Fig. 2.3), établie cinq mois plus tard, montre la zone de totalité telle qu'elle fut *effectivement observée* sur la base des rapports envoyés par les différents correspondants que Halley avait alertés : la différence de quelque 20 miles par rapport à la prévision de Halley est bien visible sur les cartes reproduites. Neuf ans plus tard, Halley, ainsi que William Whiston et Johannes Gaupp (voir Fig. 2.4) publieront des cartes semblables pour l'éclipse de Soleil du 22 mai 1724 (= 11 mai dans le calendrier julien).

Au XIX^{e} siècle, l'astronome allemand Friedrich Bessel (1784-1846) mettra au point une méthode, toujours utilisée, pour faciliter le calcul des circonstances locales et générales d'une éclipse de Soleil.

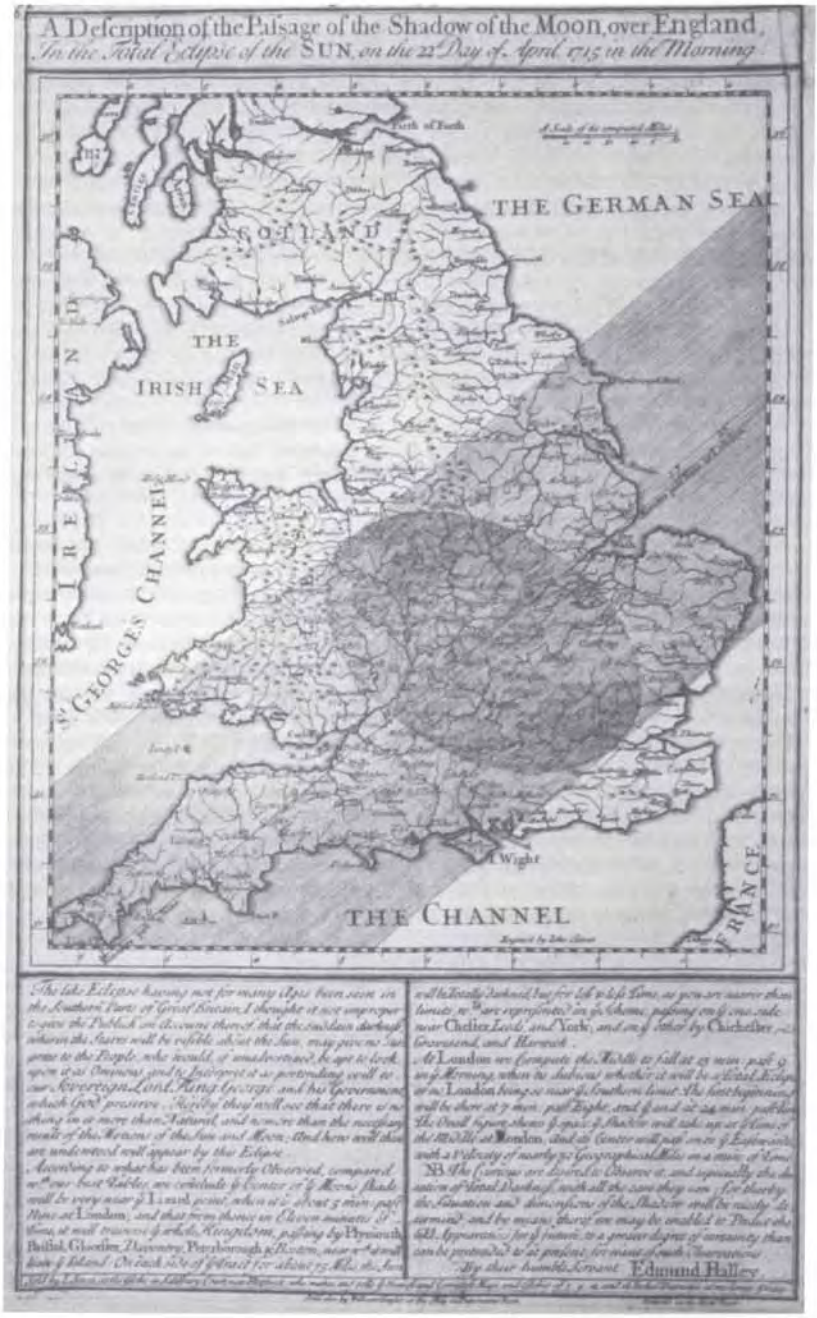


Figure 2.2. Placards représentant l'éclipse totale de Soleil du 22 avril 1715 sur le sud de l'Angleterre telle qu'elle a été prévue par E. Halley et telle qu'elle a été observée (d'après *Sky and Telescope*, n° 62, octobre 1981, pp. 324 et 325).

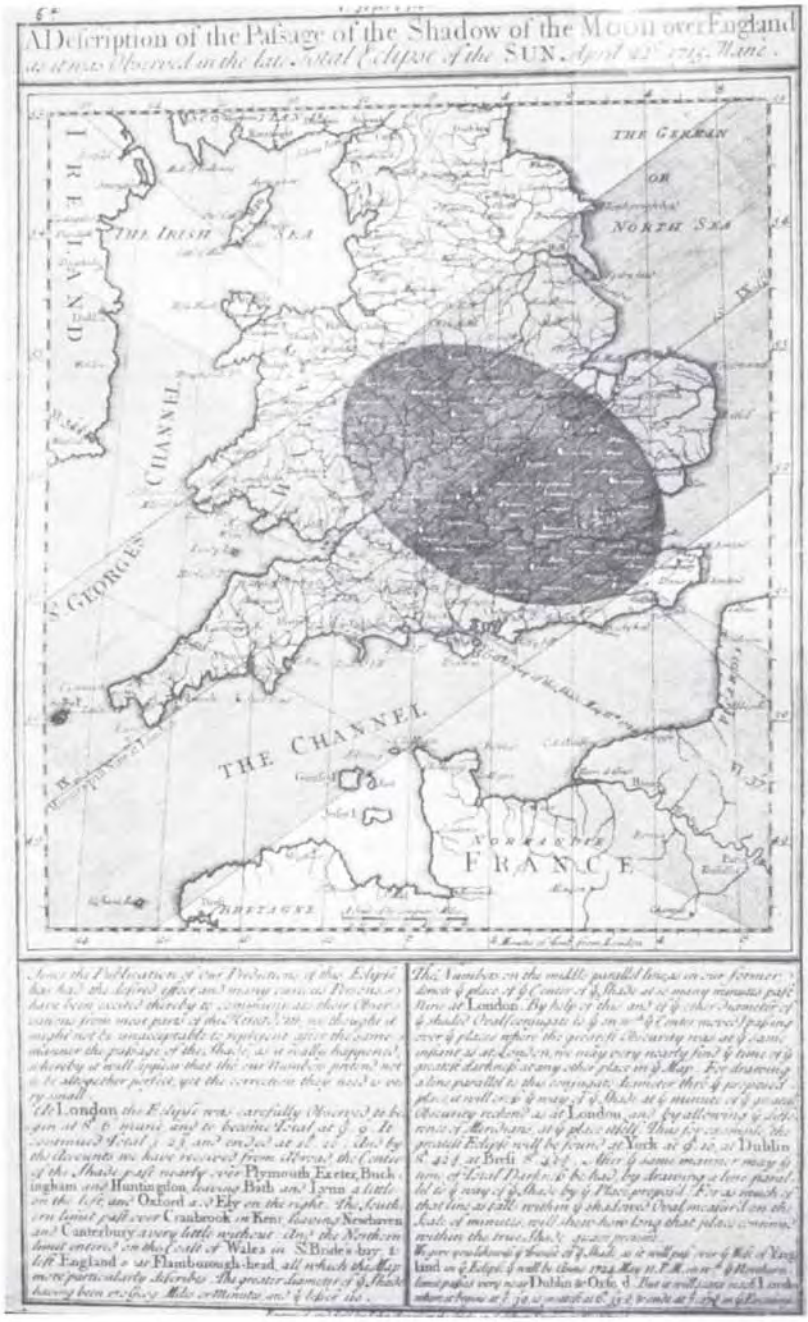

A Description of the Passage of the Shadow of the Moon over England
THE GERMAN
OR
NORTH SEA
THE IRISH SEA
IRELAND
ST GEORGES CHANNEL
THE CHANNEL
NORMANDY
FRANCE
BRETAGNE

Figure 2.3.

C'est surtout l'incessante amélioration de la connaissance des distances Terre-Lune et Terre-Soleil depuis le XVII^{e} siècle qui a rendu possible tous ces progrès. Cependant, encore au début du XX^{e} siècle, le tracé précis de la bande de totalité sur une carte comportait des incertitudes de quelques kilomètres dues à l'imperfection de la théorie de la Lune ; à quoi s'ajoutent, comme on le verra plus bas, les irrégularités de la rotation propre de la Terre.

4. Les éclipses historiques

Nous terminerons par quelques exemples du parti que peuvent tirer de la connaissance des éclipses solaires du passé non seulement les historiens de l'astronomie, mais aussi les historiens et les astronomes. La façon dont fut traité par la science astronomique du Moyen Âge le cas d'une « éclipse » d'un genre bien particulier en est une première illustration.

Le *De Sphaera* de Jean de Sacrobosco (XIII^{e} siècle), un traité qui sera lu et commenté jusqu'au XVII^{e} siècle, se termine en effet sur l'interrogation suivante, née de la lecture d'un passage des Évangiles : « *Quand ce fut la sixième heure, il y eut des ténèbres sur toute la terre, jusqu'à la neuvième heure* » (Évangile selon Marc, 15, 33). La question posée était de savoir si l'éclipse de Soleil qui eut lieu lors de la Passion du Seigneur était naturelle ou au contraire miraculeuse. Question à quoi la théorie ptoléméenne des éclipses parfaitement assimilée par les médiévaux permit d'apporter une réponse dépourvue de toute ambiguïté : il ne pouvait pas s'agir d'un phénomène naturel puisqu'une éclipse de Soleil se produit nécessairement lorsque la Lune est nouvelle : or le Christ fut crucifié à Pâques, alors que la Lune était pleine – des commentateurs de Sacrobosco ajouteront dans le même sens la durée inhabituelle de cette éclipse. Il s'est donc agi d'un miracle à travers lequel s'est manifestée la toute puissance de Dieu.

Une légende (qui confond allègrement plusieurs personnages du nom de Denys) veut qu'apprenant de l'apôtre Paul le caractère miraculeux de l'obscurcissement du ciel qu'il avait observé à Athènes, Denys l'Aréopagite se serait converti au christianisme, qu'il aurait gagné ensuite la France, dont il aurait converti les habitants ; devenu évêque de Paris, il aurait fini martyr.

La mention d'un phénomène céleste exceptionnel et/ou spectaculaire, accompagnant un événement religieux, politique ou militaire, et destinée à en souligner l'importance – les comètes étaient aussi fréquemment convoquées à cette fin – n'est pas rare dans les chroniques

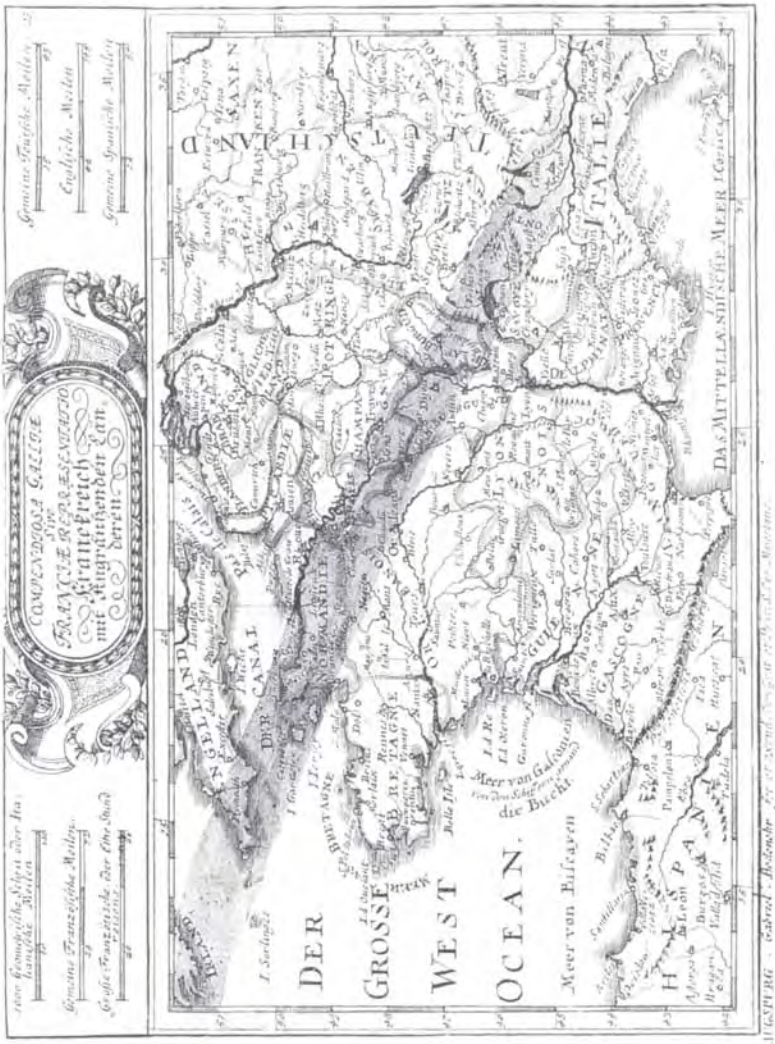


Figure 2.4. Éclipse de Soleil du 11 mai 1724, zone de visibilité au-dessus de la France, d'après J. Gaupp, *Eigentliche Beschreibung der grossen Sommen Finsternuss, Augsburg* 1724. © Observatoire de Paris, cliché n° 2385A.

anciennes. Or, la connaissance précise des éclipses solaires qui se sont produites dans le passé permet aux historiens de vérifier, et éventuellement d'invalider, les récits de certains auteurs.

C'est par exemple le cas pour l'éclipse mentionnée par l'historien byzantin Zozime (fin V^{e}–début VI^{e} siècle) dans son *Histoire nouvelle* (IV, 58). À propos de la bataille qui eut lieu le 5 septembre 394 dans les Alpes Juliennes entre Eugène, Arbogast et Théodose, Zozime écrit : « *Lorsqu'Eugène marcha à leur rencontre avec l'ensemble de ses troupes et que les armées en vinrent aux mains l'une avec l'autre, il se produisit au moment même du combat une éclipse de Soleil si complète qu'il sembla plutôt faire nuit que jour pendant un laps de temps considérable* ». L'indication par Zozime d'une éclipse qui dura un temps considérable est suspecte, et pour cause : il n'y eut pas d'éclipse de Soleil le 5 septembre 394 !

On peut aussi, à partir d'une éclipse de Soleil, dater un événement sur lequel les sources manuscrites ne fournissent que des indications chronologiques plus ou moins vagues. On a ignoré longtemps l'année exacte de la mort de l'empereur d'Occident Louis I^{er} le Pieux, fils de Charlemagne. On disposait seulement du témoignage consigné dans une chronique médiévale d'après lequel l'année où l'empereur Louis mourut « *il y eut une éclipse de Soleil le mercredi avant l'Ascension* » (*eclipsis solis facta est IV. feria ante ascensionem domini*). Or le calcul montre qu'une éclipse totale de Soleil fut visible en Europe le 5 mai 840, veille de l'Ascension. L'empereur est donc mort en 840.

Aujourd'hui, les astronomes n'exploitent plus les éclipses de Soleil en vue d'améliorer la théorie de la mécanique céleste, mais ils continuent de tirer des enseignements essentiels des éclipses anciennes.

5. Éclipses anciennes et méthodes modernes d'analyse

En 1749, l'astronome anglais Richard Dunthorne (1711-1775) utilisa des éclipses mentionnées par Ptolémée. En recalculant ces éclipses, Dunthorne mit en évidence un désaccord régulier entre les instants calculés et ceux observés : le mouvement de la Lune semblait s'accélérer de 20'' par siècle. Ce n'est qu'au XIX^{e} siècle que le problème fut résolu : ce n'est pas la Lune qui accélère, c'est la Terre qui tourne plus lentement sur son axe par suite du frottement des mers sur les fonds océaniques. Puisque la rotation de la Terre se ralentit de façon constante – indépendamment d'irrégularités saisonnières –, le calcul *a posteriori* des éclipses anciennes doit donc prendre en compte ce ralentissement, sous peine de décalages importants.

Des sources babyloniennes mentionnent qu'une éclipse totale de Soleil eut lieu à Babylone le 15 avril 136 avant J.-C. Si l'on recalcule, avec les théories modernes, les circonstances de cette éclipse sans tenir compte du ralentissement de la rotation de la Terre, on trouve que la bande de totalité passait non pas à Babylone (située dans l'Irak actuel à environ 160 km au sud de Bagdad), mais au Maroc. On voit à partir de cet exemple – et de nombreux autres étudiés récemment de façon magistrale par F. Richard Stephenson – que les astronomes d'aujourd'hui tirent grand profit des mentions d'éclipses anciennes pour mettre en évidence les fluctuations de la rotation de la Terre. Cela montre aussi les limites de la mécanique céleste actuelle : toute prévision de la zone de totalité d'une éclipse de Soleil ne peut, à l'échelle de quelques siècles, être d'une précision absolue en raison des irrégularités dans la rotation de notre planète, impossibles à déterminer à l'avance.

Bibliographie sommaire

Principaux textes de référence

Traité du ciel, Aristote, texte grec et trad. fr. par P. Moraux, Paris, Les Belles Lettres, 1965.

Introduction aux phénomènes, Géminos, texte grec et trad. fr. par G. Aujac, Paris, Les Belles Lettres, 1975.

Histoire naturelle, Pline l'Ancien, livre II, texte latin et trad. fr. par J. Beaujeu, Paris, Les Belles Lettres, 1950.

Ptolémée : la seule traduction fiable est celle donnée en langue anglaise par G.J. Toomer sous le titre *The Almagest*, Londres, Duckworth, 1984.

De sphaera, Jean de Sacrobosco, texte latin et trad. angl. par L. Thorndike, *The Sphere of Sacrobosco and its Commentators*, Chicago, 1949.

(N.B. Les textes publiés aux éditions *Les Belles Lettres* sont tous disponibles. On trouvera des extraits en français de certains ouvrages cités ici dans l'anthologie publiée par J.-P. Verdet sous le titre *Astronomie & Astrophysique* [Textes essentiels], Paris, Larousse 1993.)

Quelques études (par ordre chronologique)

Exact Sciences in Antiquity, O. Neugebauer, 2e éd., New York, Dover, 1957, trad. fr. par P. Souffrin, *Les sciences exactes dans l'Antiquité*, Arles, Actes Sud, 1990.

Early Greek Astronomy to Aristotle, D.R. Dicks, Londres, Thames and Hudson, 1970.

A Survey of the Almagest, O. Pedersen, Odense 1974.

"Eighteenth-century eclipse paths", O. Gingerich, *Sky and Telescope*, 62, 1981, pp. 324-327 (repris dans *The Great Copernicus Chase and other adventures in astronomical history*, Cambridge (Mass.), 1992, pp. 152-159.

Une histoire de l'astronomie, J.-P. Verdet, Paris, Le Seuil, 1990.

« Rôle de l'astronomie dans la mesure du temps », D. Savoie, *Revue du Palais de la découverte*, vol. 21, n° 206, mars 1993, pp. 19-35.

Total Eclipses of the Sun, J.B. Zirken, Princeton, Princeton University Press, 1995.

Le monde des sphères, M.-P. Lerner, 2 tomes, Paris, Les Belles Lettres, 1996-1997.

Historical Eclipses and Earth's Rotation, F. Richard Stephenson, Cambridge, CUP, 1997.

« Les prochaines éclipses de Soleil en France », M. Toulmonde, *Les Cahiers Clairaut*, n° 80, 1997, pp. 34-41.

"Ephemeral events: English broadsides of early eighteenth-century solar eclipses", A.N. Walter, *History of Science*, 37, 1999, pp. 1-43.

Observations and Predictions of Eclipse Times by Early Astronomers, J.M. Steele, Dordrecht – Boston – London, Kluwer, 2000.

3

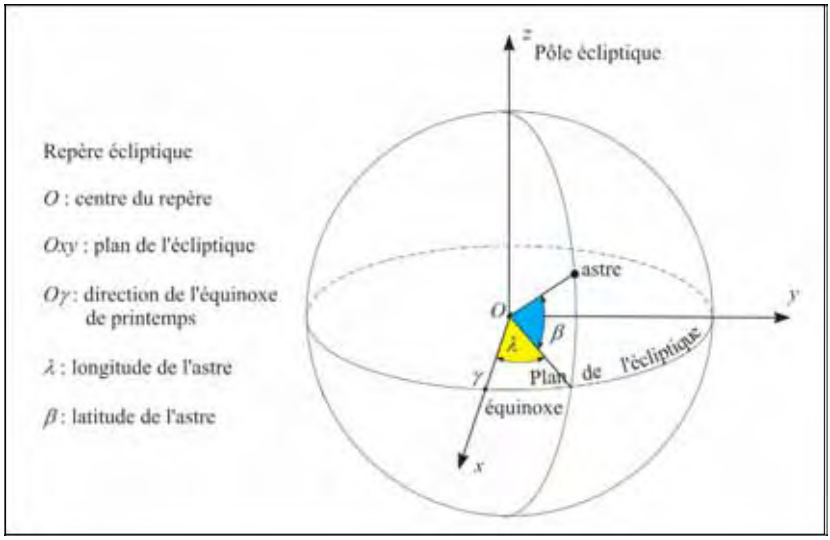
Généralités et définitions

1. Le mouvement de la Terre autour du Soleil

En première approximation on peut supposer que le mouvement de la Terre autour du Soleil obéit aux trois lois de Kepler. La Terre parcourt donc une orbite elliptique plane autour du Soleil, le Soleil étant situé à l'un des foyers de l'ellipse. Le plan de cette orbite s'appelle le plan de l'écliptique, car c'est lorsque la pleine Lune ou la nouvelle Lune est proche de ce plan qu'il y a une possibilité d'éclipses de Lune ou de Soleil. Ce plan sert de plan de base (*Oxy*) au repère de coordonnées polaires écliptiques, l'axe *Oz* de ce repère est normal au plan de l'écliptique et il est orienté de sorte que la trajectoire de la Terre soit dans le sens direct. Dans ce modèle keplerien du mouvement de la Terre, la latitude de la Terre est toujours nulle. Sur son orbite la Terre passe par deux positions particulières situées aux extrémités de la ligne des apsides (le grand axe de l'ellipse) : l'aphélie correspondant à la distance maximale entre la Terre et le Soleil, et le périhélie correspondant à la distance minimale entre la Terre et le Soleil. Suite à la deuxième loi de Kepler, à l'aphélie la vitesse de la Terre est minimale et au périhélie elle est maximale. Ainsi la vitesse angulaire de la Terre progresse 7 % plus vite au périhélie qu'à l'aphélie.

Les deux coordonnées angulaires polaires écliptiques portent les noms de longitude écliptique et de latitude écliptique.

Sphère céleste écliptique.



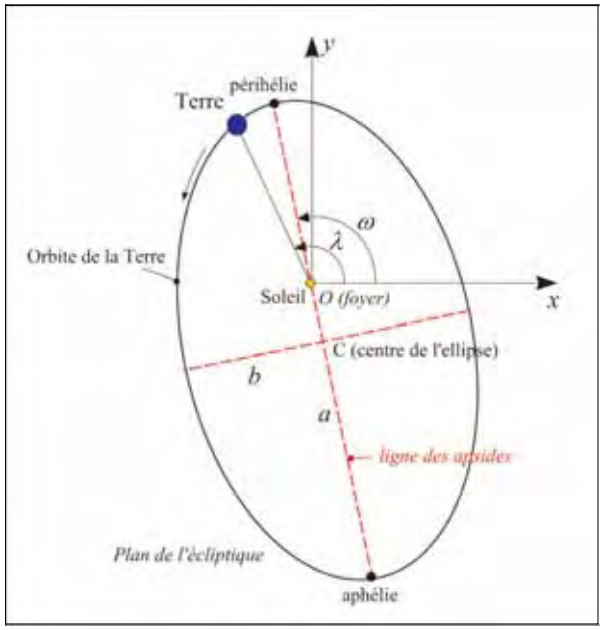
Dans l'étude des éclipses, on utilise le mouvement apparent du Soleil autour de la Terre. Dans ce mouvement le Soleil parcourt une orbite elliptique autour de la Terre, l'orbite a les mêmes caractéristiques que la trajectoire de la Terre autour du Soleil. Cette représentation est correcte d'un point de vue cinématique (changement d'origine du repère), mais n'a aucun sens d'un point de vue dynamique.

1.1. Éléments orbitaux képlériens de l'orbite terrestre

En réalité, suite aux perturbations planétaires l'orbite de la Terre n'est pas képlérienne et ses éléments orbitaux ne sont pas constants mais varient avec le temps.

Le mouvement elliptique de la Terre a lieu dans le plan de l'écliptique, l'ellipse est donc définie géométriquement par la connaissance de la longitude du périastre : ω (angle formé par son demi-grand axe et l'axe Ox), de son demi-grand axe a et de son excentricité e. Le mouvement de la Terre sur l'ellipse est connu lorsque l'on connaît pour une date origine T_0 sa longitude λ et son moyen mouvement n.

Le tableau 3.I donne les éléments moyens de l'orbite de la Terre dans le repère défini par l'équinoxe et l'écliptique moyens dynamiques inertiels de la date (J2000).



Éléments de l'orbite képlérienne de la Terre. Sur cette figure, l'excentricité de l'orbite terrestre a été fortement exagérée.

Paramètres de l'orbite	Valeurs au 1 janvier 2000 à 12 h
Demi-grand axe : a	1,000 001 017 8 ua
Excentricité : e	0,016 708 634 2
Longitude du périhélie : ω	102,937 348 08°
Longitude de la Terre : λ	100,466 456 83°
Moyen mouvement : n	0,985 647 358°/jour

Tableau 3.I. Éléments de l'orbite terrestre.

Comme ces éléments sont donnés dans le repère moyen de la date, repère tenant compte de la précession des équinoxes, l'inclinaison de l'orbite est nulle et le rapport $360°/n$ donne la période de révolution tropique de la Terre autour du Soleil (365,242 190 4 jours). Pour avoir la révolution sidérale de la Terre (365,256 363 2 jours), il faut utiliser le moyen mouvement donné dans le repère fixe J2000 ($n = 0{,}985\,609\,112\,5°$/jour).

La distance entre le Soleil et la Terre au périhélie est donnée par la formule : $D = a \cdot (1 - e)$.

La distance entre le Soleil et la Terre à l'aphélie est donnée par la formule : $D = a \cdot (1 + e)$.

Le demi-grand axe a, le demi-petit axe b et l'excentricité e sont liés par la relation suivante : $e^2 = (a^2 - b^2)/\ a^2$.

La distance c entre le centre de l'ellipse et un de ses foyers est donnée par $c = e.a$

Le diamètre apparent D du Soleil vu du centre de la Terre est donné par la formule : $D = 2 \text{ arctg}(Rs/\Delta)$, où Δ est la distance Terre-Soleil et Rs le rayon du disque solaire.

Le moyen mouvement n est lié au demi-grand axe a de l'ellipse par la troisième loi de Kepler : n^2a^3 = constante.

1.2. Tracé à l'échelle de l'orbite terrestre

Voici un petit exercice que vous pouvez réalisez vous-même : en utilisant les éléments orbitaux de la Terre donnés dans le paragraphe précédent, nous allons calculer la valeur du demi-petit axe b de l'ellipse, la distance c entre le centre de l'ellipse et son foyer. Puis nous calculerons les distances Terre-Soleil lorsque la Terre est au périhélie et lorsque la Terre est à l'aphélie. Ces résultats sont exprimés en unités astronomiques, puis en kilomètres en prenant : 1 ua = 149 597 870 km.

On en déduit les valeurs du diamètre apparent du Soleil vu du centre de la Terre lorsque la Terre est à l'aphélie puis au périhélie (dans ce calcul on prend le rayon solaire égal à 696 000 km). Ensuite, nous traçons un dessin à l'échelle en prenant comme demi-grand axe de l'orbite terrestre une valeur de 10 cm. Puis nous calculons les valeurs précédentes à cette échelle, ainsi que la valeur de $a - b$ différence entre le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipse.

Voici ce que l'on obtient :

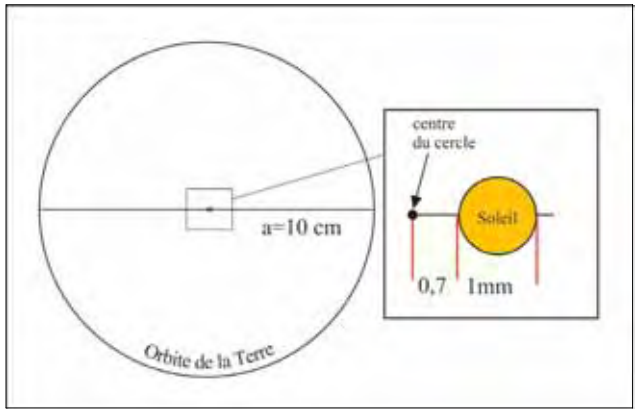
a = 1,000 001 017 ua = 149 598 022,1 km,
b = 0,999 861 417 9 ua = 149 577 138,4 km,
c = 0,016 708 651 2 ua = 249 957 8,6 km.

La distance Soleil-Terre au périhélie est égale à 0,983 292 365 8 ua soit 147 098 443,5 km, la distance Soleil-Terre à l'aphélie est égale à 1,016 709 668 ua soit 152 097 600,7 km.

Le diamètre apparent du Soleil lorsque la Terre est au périhélie est égal à 32′ 32′′ et le diamètre apparent du Soleil lorsque la Terre est à l'aphélie est égal à 31′ 28′′.

Sur le dessin à l'échelle, on obtient : a = 10 cm, b = 9,998 604 01 cm, $a - b$ = 0,001 39 cm = 0,013 9 mm = 13,9 µm et c = 0,167 09 cm.

Soit la distance Soleil-Terre au périhélie égale à 9,832 9 cm, la distance Soleil-Terre à l'aphélie égale à 10,167 1 cm et le diamètre du Soleil sur le dessin est égal à 0,093 cm soit environ 1 mm.



Tracé de l'orbite terrestre.

Conclusion

Le tracé de l'orbite de la Terre autour du Soleil en prenant a = 10 cm est un cercle. En effet la différence entre le demi-grand axe et de demi-petit axe est d'environ 14 µm, elle est donc dans l'épaisseur du trait. En revanche, sur la figure, le Soleil n'occupe pas le centre du cercle mais est excentré d'environ 1,7 mm.

2. Le mouvement de la Lune autour de la Terre

Une première approximation du mouvement de la Lune est donnée par la résolution d'un problème des trois corps (Soleil, Terre et Lune) appelé problème principal.

Contrairement au mouvement de la Terre autour du Soleil, qui peut être considéré en première approximation comme képlérien (solution exacte du problème des deux corps), le mouvement de la Lune est beaucoup plus complexe. Dans le problème principal, le mouvement de la Lune est obtenu en tenant compte de l'attraction du centre de masse de la Terre et des perturbations solaires dans le cadre de la mécanique newtonienne, le mouvement du barycentre Terre-Lune étant représenté par un mouvement képlérien.

La solution complète tient compte de très nombreuses perturbations et les éléments elliptiques se présentent sous la forme de séries

semi-analytiques comportant plusieurs milliers de termes, environ 35 000 pour la solution ELP2000 de Michèle Chapront-Touzé et Jean Chapront.

Les éléments elliptiques de l'orbite lunaire ne sont donc pas constants, mais varient rapidement avec le temps. Les valeurs du demi-grand axe, de l'excentricité et de l'inclinaison oscillent autour de valeurs moyennes ; la ligne des nœuds de l'orbite et la ligne des apsides sont animées de mouvements circulaires non uniformes.

En tenant compte de ces perturbations, la vitesse angulaire de la Lune peut progresser 29 % plus vite à son périgée qu'à son apogée. La variation de distance entre le centre de la Terre et le centre de la Lune va de 56 à 63,8 rayons terrestres selon que la Lune est à son périgée ou à son apogée (la distance moyenne est de 60 rayons terrestres).

2.1. Les éléments elliptiques

Les éléments elliptiques sont une série de six paramètres permettant de définir parfaitement une orbite elliptique képlérienne dans le repère écliptique céleste. L'orbite elliptique képlérienne est la trajectoire d'un corps M gravitant autour d'un corps principal S.

Nous nous plaçons à une époque initiale donnée que l'on notera t_0.

Trois paramètres déterminent les caractéristiques de l'ellipse et du mouvement du corps dans le plan de l'orbite :

- le demi-grand axe a de l'ellipse ;
- l'excentricité e de l'ellipse ;
- l'anomalie vraie du corps pour l'époque donnée, qui est l'angle formé par la direction du périastre et la direction du corps vues du foyer de l'ellipse.

La figure 3.1 donne une représentation de ces paramètres ainsi que d'autres paramètres liés au mouvement elliptique.

Les formules du problème des deux corps permettent de calculer la position de l'astre sur son orbite pour un instant t quelconque.

L'anomalie moyenne M (parfois notée l dans le cas de la Lune) est donnée par $M = n \times (t - t_0)$ où n est le moyen mouvement.

Le moyen mouvement n est lié au demi-grand axe a de l'ellipse par la troisième loi de Kepler (n^2a^3 = constante).

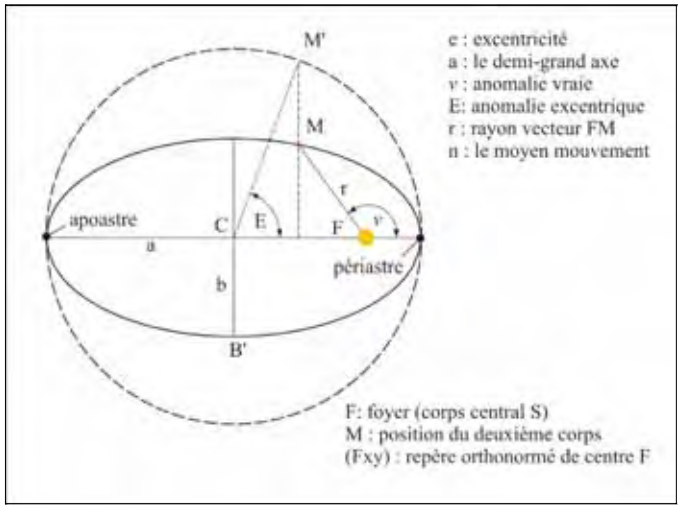


Figure 3.1. Paramètres de l'ellipse képlérienne.

On passe de l'anomalie moyenne M à l'anomalie excentrique E en résolvant par itérations successives l'équation de Kepler : $E - e \sin E = M$.

Enfin, connaissant l'anomalie excentrique, l'anomalie vraie υ et le rayon vecteur r sont donnés par les équations suivantes :

$$r \cos \upsilon = \text{a} (\cos E - e)$$
$$r \sin \upsilon = b \sin E$$
$$r = a (1 - e \cos E).$$

La ligne des nœuds coupe l'orbite du corps en deux points : le nœud ascendant de l'orbite par lequel passe le corps lorsqu'il passe des latitudes négatives aux latitudes positives et le nœud descendant de l'orbite par lequel passe le corps lorsqu'il passe des latitudes positives aux latitudes négatives.

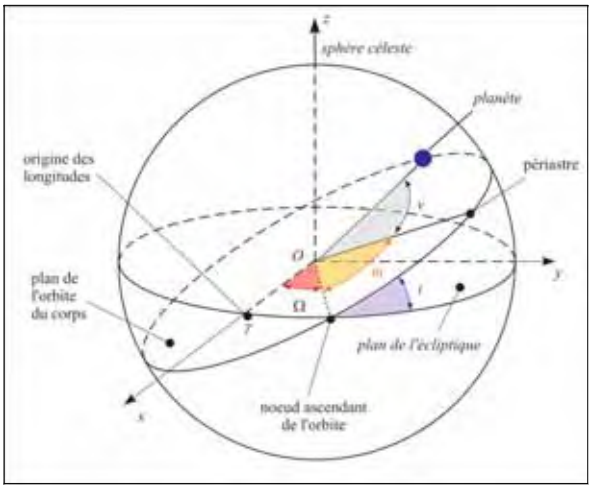
Le plan de l'orbite n'étant pas *a priori* dans le plan de l'écliptique, ces deux plans se coupent suivant une droite appelée ligne des nœuds.

Trois angles permettent de positionner le plan de l'orbite dans l'espace

- La longitude du nœud ascendant de l'orbite Ω : angle formé par la direction de l'axe *0x* et la direction du nœud ascendant de l'orbite.
- L'inclinaison de l'orbite i : angle formé par le plan de l'écliptique et le plan de l'orbite.
- L'argument du périastre ω : angle formé par la direction du nœud ascendant et la direction du périastre.

Parfois on donne l'angle $\varpi = \Omega + \omega$ que l'on appelle longitude du périastre.

Éléments de l'orbite képlérienne.



2.2. Les éléments elliptiques moyens de l'orbite lunaire

Le tableau 3.II donne les éléments elliptiques moyens de la Lune rapportés à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de la date pour l'époque J2000 (1 janvier 2000 à 12 h).

Tableau 3.II. Éléments de l'orbite lunaire.

Éléments	Valeurs	Mouvements dus aux perturbations
Demi-grand axe a	383 397,791 6 km	
Excentricité e	0,055 545 526	
Inclinaison i	5,156 689 83°	
Longitude du nœud Ω	125,044 555 04°	mouvement rétrograde : –19,341 361 8°/an*
Longitude du périgée ϖ	83,353 242 99°	mouvement direct : +40,690 137°/an*
Longitude moyenne Λ	218,316 654 36°	

(*) Dans ce tableau an désigne une année julienne de 365,25 jours.

L'anomalie moyenne M de la Lune est donnée par :

$$M = n\,(t - t_0)$$

où n est le moyen mouvement de la Lune.

La longitude vraie de la Lune Λ est donnée par :

$$\Lambda = \Omega + \omega + \upsilon = \varpi + \upsilon$$

où υ est l'anomalie vraie.

La longitude moyenne de la Lune L est donnée par :

$$L = \Omega + \omega + M = \varpi + M = \varpi + n\,(t - t_0).$$

La période de révolution de la longitude moyenne est égale à la révolution sidérale de la Lune, la période sidérale est l'intervalle de temps qui s'écoule en moyenne entre deux passages de la Lune dans une même direction par rapport aux étoiles.

L'anomalie moyenne $M = L - \varpi$ représente l'angle entre la direction du périgée et la longitude moyenne de la Lune, sa période de révolution s'appelle la période anomalistique, elle représente l'intervalle de temps qui s'écoule en moyenne entre deux passages de la Lune à son périgée, elle diffère de la révolution sidérale car la ligne des apsides (donc le périgée) est animée d'un mouvement de rotation dans le sens direct.

L'angle $D = L - Ls$ est la différence entre la longitude moyenne de la Lune et la longitude moyenne du Soleil. Les phases de la Lune sont liées, non pas à cet angle mais à la différence entre les longitudes vraies des deux corps. Pour la nouvelle Lune, le premier quartier, la pleine Lune et le dernier quartier, cette différence vaut respectivement 0°, 90°, 180° et 270°. En revanche la période moyenne qui ramène la Lune dans une même phase que l'on appelle période synodique ou lunaison moyenne est la période de l'angle D.

L'angle $F = L - \Omega$ est la différence entre la longitude moyenne de la Lune et la direction du nœud ascendant de son orbite. Sa période de révolution s'appelle période draconitique, elle représente l'intervalle de temps qui s'écoule en moyenne entre deux passages de la Lune au nœud ascendant de son orbite, elle diffère de la révolution sidérale car la ligne des nœuds est animée d'un mouvement de rotation dans le sens rétrograde.

2.3. Périodes de révolutions de la Lune

Le tableau 3.III donne les périodes de révolutions moyennes de la Lune.

Tableau 3.III. Périodes de révolutions moyennes de la Lune.

Nom de la période	Durée en jours	Définition
Période sidérale	27,321 661 547	retour dans la même direction par rapport aux étoiles
Période anomalistique	27,554 549 878	retour au périgée de l'orbite
Période synodique	29,530 588 853	retour de la même phase lunaire
Période draconitique	27,212 220 817	retour par le même nœud de l'orbite

Remarques importantes

Toutes les périodes décrites ci-dessus font intervenir la longitude moyenne de la Lune, ce sont donc des périodes de révolutions moyennes et non des périodes de révolutions vraies. Les périodes de révolutions vraies varient continuellement et ne sont pratiquement jamais égales aux périodes de révolutions moyennes. Ainsi, par exemple, l'intervalle de temps qui sépare deux nouvelles Lunes (lunaison vraie) peut présenter des écarts de plus ou moins 7 h avec la valeur de la période synodique moyenne (lunaison moyenne).

2.4. Les variations des éléments elliptiques de la Lune

Nous avons vu que, sous l'action de nombreuses perturbations, les éléments orbitaux de la Lune ne sont pas constants, mais varient avec le temps. Le tableau 3.IV donne les plus grosses variations de ces éléments.

Tableau 3.IV. Variations des éléments orbitaux de la Lune.

Éléments	Amplitude	Périodes	Amplitudes	Périodes
a	3 400,4 km	14,76 j	–635,6 km	31,81 j
e	0,014 217	31,81 j	0,008 551	173,31 j
i			8,105′	173,31 j
ϖ	–15,448°	31,81 j	–9,642°	205,9 j
Ω			–1,497 9°	173,31 j

On constate que ces variations présentent de très fortes amplitudes sur des périodes de temps relativement courtes. Ainsi l'excentricité varie de plus ou moins 0,014 217 sur une période de 31,81 jours ce qui représente un écart de plus de 25 % de la valeur moyenne !

La série suivante donne les premiers termes permettant le calcul de la longitude vraie Λ de la Lune ainsi que leur nom et l'époque de leur découverte :

$\Lambda = L + (6{,}288\ 8° \sin M + 0{,}213\ 6° \sin 2M)$
équation du centre : connue depuis Hipparque (~150 av. J.-C.)

$+ 1{,}274\ 0° \sin (2D - M)$
évection (période 31,81 j) : découverte par Ptolémée (milieu du II^e siècle)

$+ 0{,}658\ 3° \sin 2D$
variation (période 14,76 j) : découverte par Tycho Brahé (XVI^e siècle)

$0{,}185\ 1° \sin M'$
équation annuelle (période 1 an) : découverte par Tycho Brahé (XVI^e siècle)

$0{,}114\ 3° \sin 2F.$
réduction à l'écliptique (période 13,6 j)

2.5. Remarque importante

Comme on le verra par la suite, les diamètres apparents de la Lune et du Soleil vus depuis la Terre sont de l'ordre du demi-degré, donc pour prédire une éclipse du Soleil il faut obligatoirement connaître la position de ces deux corps avec une précision inférieure à ce demi-degré. Pour la Lune, il faut donc connaître l'équation du centre et l'évection, la connaissance de la variation n'est pas nécessaire car le terme sin 2D est presque nul à la pleine Lune et à la nouvelle Lune ($D \simeq 0°$ et $D \simeq 180°$). Il était donc impossible de prédire la visibilité d'une éclipse de Soleil en un lieu donné avant le milieu du II^e siècle, date de la découverte de l'évection par Claude Ptolémée.

3. Les phases de la Lune

Comme nous venons de le voir, la Lune tourne autour de la Terre dans un mouvement d'ouest en est (dans le sens direct). Elle effectue un tour complet autour de la Terre au cours d'une révolution sidérale de 27,321 661 547 jours. Au cours de sa révolution, depuis la Terre, on ne voit pas la partie éclairée de la Lune sous un même angle, cela constitue les phases de la Lune. On distingue quatre positions particulières.

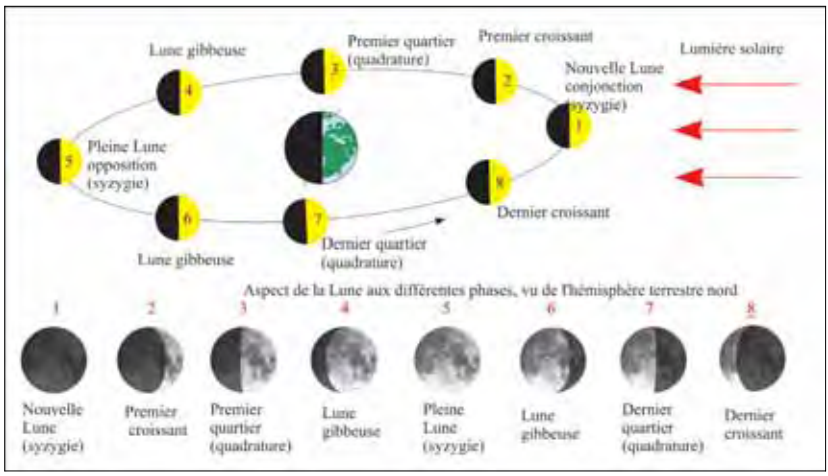
La pleine Lune et la nouvelle Lune portent également le nom de syzygies.

Lorsque la Lune et le Soleil ont la même longitude, on dit qu'ils sont en conjonction, c'est la nouvelle Lune. Lorsque la longitude de la Lune est à 180° de la longitude du Soleil, on dit qu'ils sont en opposition, c'est la pleine Lune. À la nouvelle Lune, la Lune est devant le Soleil, elle se lève et se couche donc presque en même temps que lui. À la pleine Lune, la Lune est à l'opposé du Soleil, donc elle se lève lorsqu'il se couche et elle se couche lorsqu'il se lève. Ainsi la nouvelle Lune n'est levée que le jour et la pleine Lune n'est levée que la nuit.

Les phases comprises entre la nouvelle Lune et la pleine Lune s'appellent phases croissantes et les phases comprises entre la pleine Lune et la nouvelle Lune s'appellent phases décroissantes. Lorsque la longitude de la Lune est à 90° vers l'est de la longitude du Soleil, on aperçoit uniquement une moitié du disque lunaire éclairé, c'est le premier quartier de Lune, on dit également que la Lune est en quadrature Est. Lorsque la longitude de la Lune est à 90° vers l'ouest (270° vers l'est) de la longitude du Soleil, on aperçoit l'autre moitié du disque lunaire éclairé, c'est le dernier quartier de Lune, on dit également que la Lune est en quadrature Ouest. Le premier quartier est donc compris entre la nouvelle Lune et la pleine Lune et le dernier quartier est compris entre la pleine Lune et la nouvelle Lune. Les aspects du premier et du dernier quartier de Lune sont inversés selon que l'on se trouve dans l'hémisphère nord ou dans l'hémisphère sud. Ainsi le premier quartier vu depuis l'hémisphère nord ressemble au dernier quartier vu depuis l'hémisphère sud et inversement. Le premier quartier se trouvant 90° à l'est du Soleil, il est visible l'après-midi à l'est et dans la première partie de la nuit à l'ouest. Le dernier quartier étant à 90° à l'ouest du Soleil, il est visible la seconde moitié de la nuit à l'est et dans la matinée à l'ouest. Entre la nouvelle Lune et les quartiers de Lune, la phase lunaire à l'aspect d'un croissant, entre les quartiers et la pleine Lune, la Lune à la forme d'une bosse et on la qualifie de gibbeuse.

Il y a éclipse de Soleil lorsque la Lune passe devant le Soleil et éclipse de Lune lorsque la Lune passe dans l'ombre de la Terre.

Les éclipses de Soleil ont toujours lieu au voisinage de la conjonction (nouvelle Lune) et les éclipses de Lune ont toujours lieu au voisinage de l'opposition (pleine Lune). Si l'orbite de la Lune était dans le plan de l'orbite du Soleil apparent autour de la Terre (écliptique) il y aurait des éclipses de Soleil à chaque nouvelle Lune et des éclipses de Lune à chaque pleine Lune. Comme les éclipses de Soleil ont lieu à la nouvelle Lune, elles ne sont visibles en un lieu donné que le jour, cela parait évident. De même comme les éclipses de Lune ont lieu à la pleine Lune, elles ne sont visibles en un lieu donné que la nuit.



Les phases lunaires.

4. La lunaison moyenne

La lunaison moyenne est l'intervalle de temps qui s'écoule en moyenne entre deux même phases, c'est la combinaison de deux mouvements moyens : le mouvement moyen de la Lune autour de la Terre, dont la période moyenne de révolution est la révolution sidérale de la Lune SL = 27,321 661 547 jours (27 jours 7 h 43 min 11,56 s), et le mouvement moyen du Soleil apparent autour de la Terre (ou de la Terre autour du Soleil), dont la période moyenne de révolution est la révolution sidérale du Soleil (ou de la Terre) SS = 365,256 363 2 jours. Nous avons donc deux mouvements moyens de période SS et SL dans le même sens, l'intervalle de temps L qui sépare deux nouvelles Lunes, appelée révolution synodique, est solution de l'équation suivante :

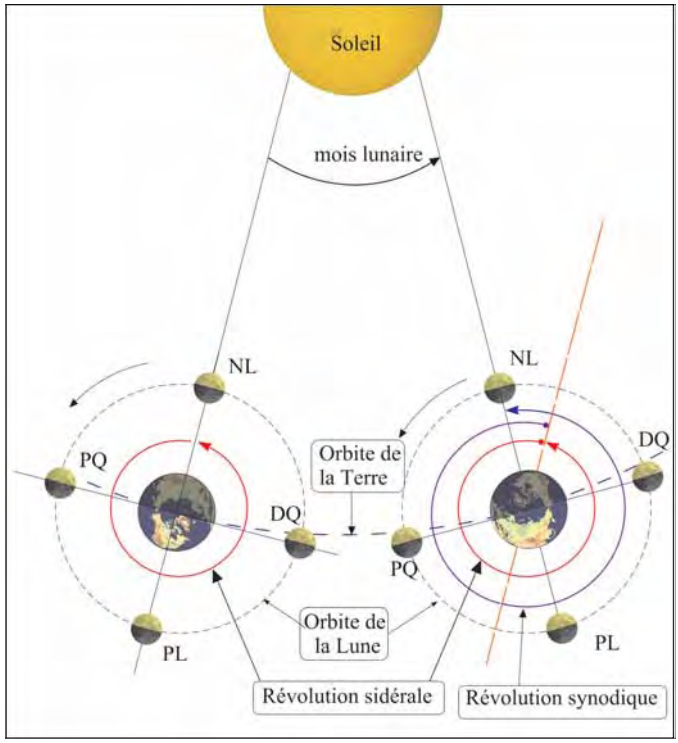
$$1/SL - 1/SS = 1/L.$$

On trouve L = 29,530 588 85 jours soit 29 jours 12 h 44 min 2,88 s.

Sur la figure 3.2, on a représenté le mouvement du système Terre-Lune autour du Soleil en partant d'une position de nouvelle Lune jusqu'à la nouvelle Lune suivante. On voit bien qu'après une révolution sidérale, donc un tour complet de la Lune autour de la Terre, nous ne sommes pas encore en conjonction, la Lune a encore un arc d'orbite à parcourir pour se trouver de nouveau alignée avec le Soleil, cela étant dû au mouvement du système Terre-Lune autour du Soleil. La lunaison est donc plus longue que la révolution sidérale.

La révolution synodique porte également les noms de lunaison et de mois lunaire.

Figure 3.2.
Révolutions sidérale
et synodique.



5. La lunaison vraie

La révolution synodique de la Lune correspond à une valeur moyenne, en réalité comme nous l'avons déjà vu ni le mouvement orbital de la Lune ni le mouvement orbital de la Terre ne sont uniformes. La vitesse angulaire de la Lune est maximale au périgée et minimale à l'apogée. De même, la vitesse de la Terre est maximale en janvier lorsqu'elle est au périhélie et minimale en juillet lorsqu'elle est à l'aphélie. La lunaison vraie va donc être différente de la lunaison moyenne. De plus, la période séparant deux nouvelles Lunes vraies ne sera pas égale à la période séparant deux pleines Lunes vraies. Le graphique ci-dessous nous donne les écarts en heures et fraction d'heure entre la lunaison vraie et la lunaison moyenne. On constate que ces écarts peuvent atteindre plus ou moins sept heures, ce qui est énorme compte tenu de la vitesse angulaire de la Lune, l'écart en longitude entre la Lune vraie et la Lune moyenne peut atteindre jusqu'à 7,5°. Cette valeur est à comparer avec les diamètres apparents de la Lune et du Soleil (0,5°).

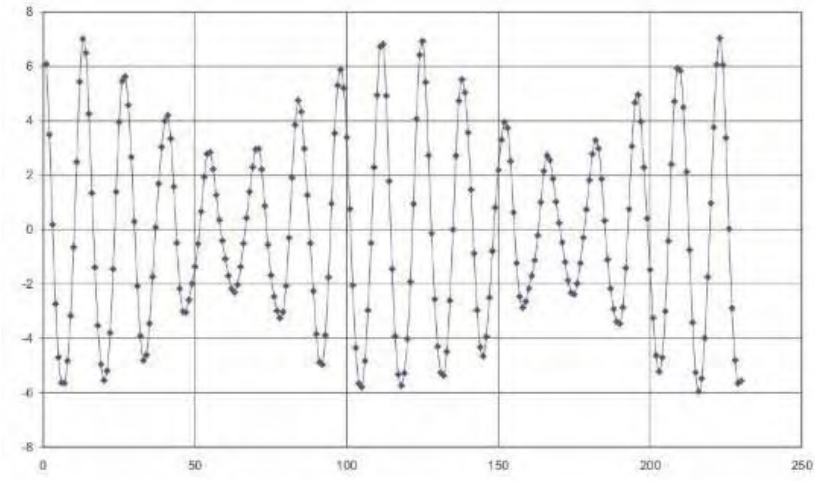


Figure 3.3. Écarts entre la lunaison vraie et la lunaison moyenne sur une période de 18,6 ans.

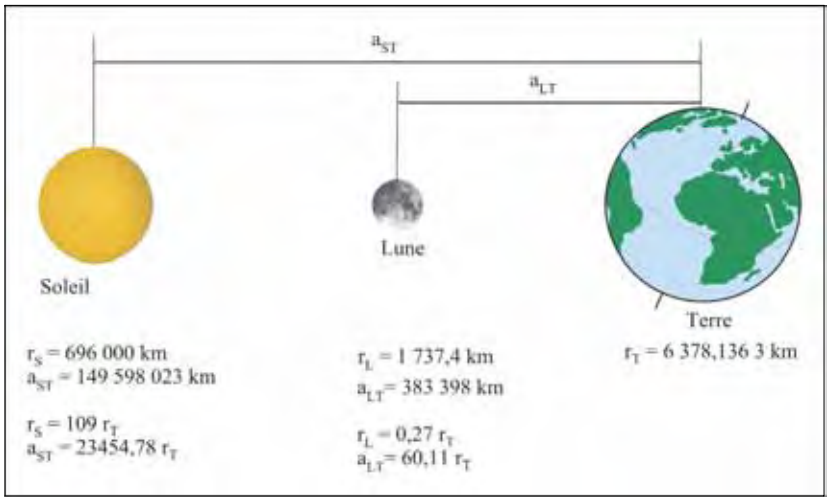
Le graphique de la figure 3.3 fait également apparaître une période de 8,84 ans correspondant à la projection en longitude du mouvement du périgée de la Lune. En effet la ligne des apsides de la Lune tourne dans le sens direct dans le plan de l'orbite lunaire, ce mouvement projeté dans le plan de l'écliptique et combiné avec le mouvement rétrograde des nœuds de l'orbite lunaire produit un mouvement en longitude de la projection du périgée de 40,690 137°/an soit une période d'environ 8,84 ans. Il est normal que l'on retrouve cette période dans la variation de la lunaison vraie car la vitesse angulaire de la Lune varie avec l'anomalie vraie.

6. Dimensions et distances des corps

La figure 3.4 donne les rayons équatoriaux de la Terre, de la Lune et du Soleil, il donne également les distances moyennes entre ces corps, en kilomètres et en rayons terrestres. Comme on le constate, si l'on réalise un dessin comportant les trois corps il est impossible de le faire à l'échelle. Ainsi si la Terre est représentée par un cercle de 2 cm de rayon, la Lune doit être représentée par un cercle de 0,55 cm situé à une distance d'environ 1,20 m de la Terre et si l'on voulait représenter le Soleil celui-ci aurait un rayon de 2,18 m et serait situé à 469 m de la Terre !

Aucun dessin représentant les trois corps n'est donc à l'échelle, et en ne respectant pas les distances et les tailles des corps, on introduit des distorsions dans les figures. Par exemple, certaines droites

Figure 3.4. Tailles et distances.



quasi-parallèles se coupent suivant des angles qui sont beaucoup plus grands que la réalité.

Bibliographie

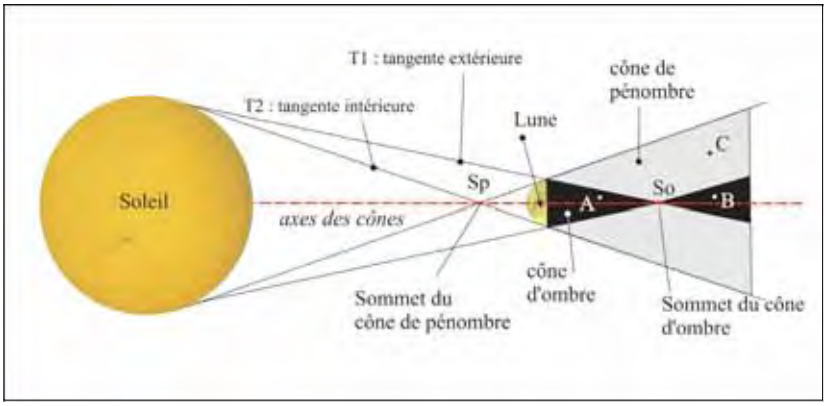
Introduction aux éphémérides astronomiques, supplément explicatif à la Connaissance des temps, publié sous la direction de J.-L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot, Les éditions de Physique, 1997.

Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets, J.-L Simon et al., *Astron. Astrophys.* **282**, 663-683, 1994.

4

La géométrie des éclipses de Soleil

1. Le cône d'ombre et le cône de pénombre



Cônes d'ombre et de pénombre.

La Lune, éclairée par le Soleil, donne naissance, dans la direction opposée au Soleil à deux cônes, un cône d'ombre et un cône de pénombre. La droite joignant le centre du Soleil et le centre de la Lune constitue l'axe de ces cônes. Le sommet Sp du cône de pénombre est situé sur cet axe entre le Soleil et la Lune, et le sommet So du cône

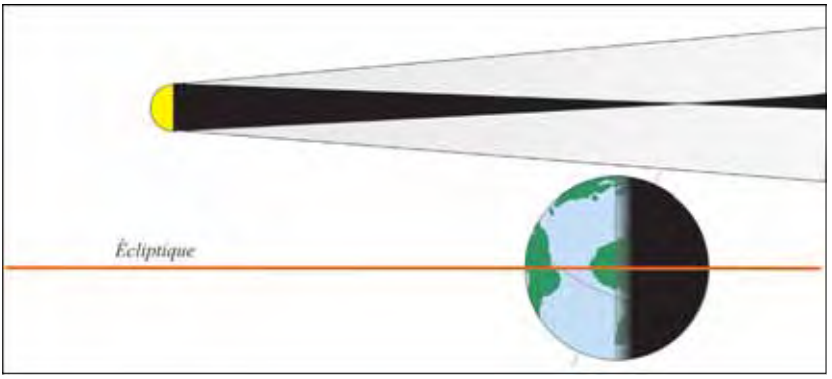
d'ombre est également situé sur cet axe mais de l'autre côté par rapport à la Lune. Le cône d'ombre est construit à l'aide des tangentes extérieures aux sphères solaire et lunaire, le cône de pénombre est construit à partir des tangentes intérieures aux sphères solaire et lunaire. Pour un observateur A placé dans le cône d'ombre, avant son sommet il y a éclipse totale du Soleil, pour un observateur B situé dans le prolongement du cône d'ombre, donc après le sommet du cône d'ombre, il y a éclipse annulaire du Soleil. Lorsqu'un observateur C se trouve dans le cône de pénombre, il assiste à une éclipse partielle, donc un passage partiel de la Lune devant le Soleil. En raison des variations de distances entre la Terre et la Lune, la Terre peut passer dans le cône d'ombre ou dans le prolongement du cône d'ombre.

2. Les différents types d'éclipses de Soleil

2.1. Cas où il n'y a pas d'éclipse

Souvent, au voisinage de la conjonction en longitude de la Lune et du Soleil (nouvelle Lune), au moment où la distance angulaire entre le centre de la Lune et le centre du Soleil vue depuis la Terre est minimale, la latitude de la Lune est trop grande et les cônes d'ombre et de pénombre ne rencontrent pas la surface terrestre. Alors, si la latitude de la Lune est positive, les cônes d'ombre et de pénombre passent au-dessus (au nord) de la Terre et si la latitude de la Lune est négative, les cônes d'ombre et de pénombre passent au-dessous (au sud) de la Terre. Dans ce cas, il n'y a pas d'éclipse de Soleil.

Schéma illustrant le cas où il n'y a pas d'éclipse de Soleil.



2.2. Les éclipses non centrales

Toujours au voisinage de la conjonction, lorsque l'axe des cônes d'ombre et de pénombre ne rencontre pas la surface terrestre mais que le cône de pénombre et parfois également une partie du cône d'ombre rencontrent la Terre, il y a éclipse et l'on dit que l'éclipse est non centrale. On verra par la suite qu'une éclipse non centrale peut être totale, annulaire ou partielle.

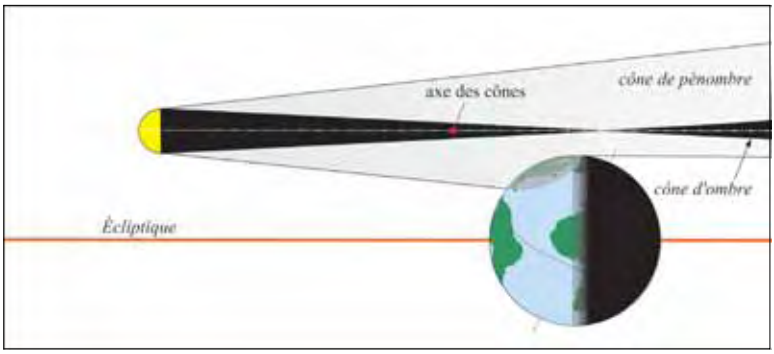


Schéma illustrant le cas d'une éclipse non centrale.

2.3. Les éclipses centrales

Toujours au voisinage de la conjonction, lorsque l'axe des cônes d'ombre et de pénombre rencontre la surface terrestre, il y a éclipse et l'on dit que l'éclipse est centrale. On verra par la suite q'une éclipse centrale peut être totale, annulaire ou mixte (annulaire-totale).

L'intersection de l'axe des cônes d'ombre et de pénombre avec la surface terrestre, lorsqu'elle existe (éclipses centrales) porte le nom de ligne de centralité.

L'ensemble de la surface terrestre parcourue durant une éclipse par le cône d'ombre ou par son prolongement porte le nom de bande de centralité.

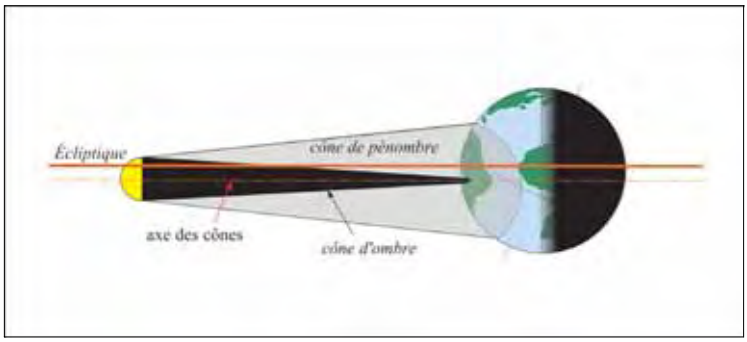


Schéma illustrant le cas d'une éclipse centrale.

On remarquera que ces définitions portent uniquement sur la rencontre de l'axe des cônes d'ombre et de pénombre avec la surface terrestre.

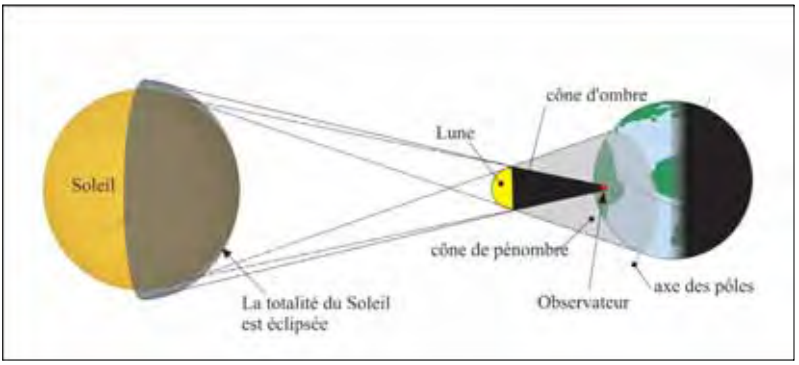
3. Les différents types d'éclipses de Soleil

3.1. Les éclipses totales

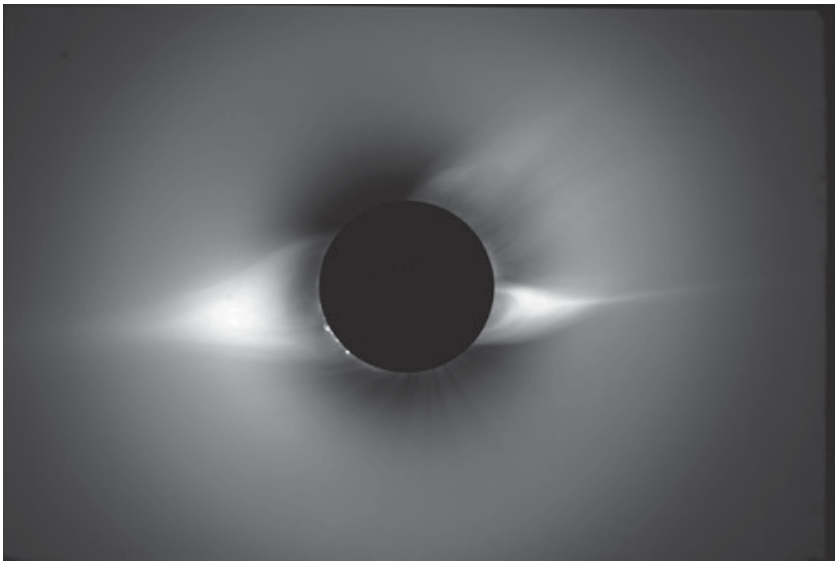
Durant la phase de totalité, la couronne solaire est observable.

Lorsque la surface terrestre rencontre le cône d'ombre entre la Lune et le sommet du cône d'ombre, pour un observateur situé dans ce cône d'ombre la surface du Soleil est complètement occultée par la Lune, alors l'éclipse est dite totale. Le diamètre apparent de la Lune est supérieur au diamètre apparent du Soleil. La bande de centralité porte le nom de bande de totalité. Tous les observateurs situés sur cette bande de totalité observeront d'abord une phase partielle, puis la phase totale, puis de nouveau une phase partielle. En début et en fin de phase de totalité un ou plusieurs points brillants, appelés grains de Baily, apparaît sur le limbe lunaire. Ces points brillants proviennent de la lumière solaire passant par les vallées situées sur le limbe lunaire, ils annoncent le début et la fin de la phase de totalité.

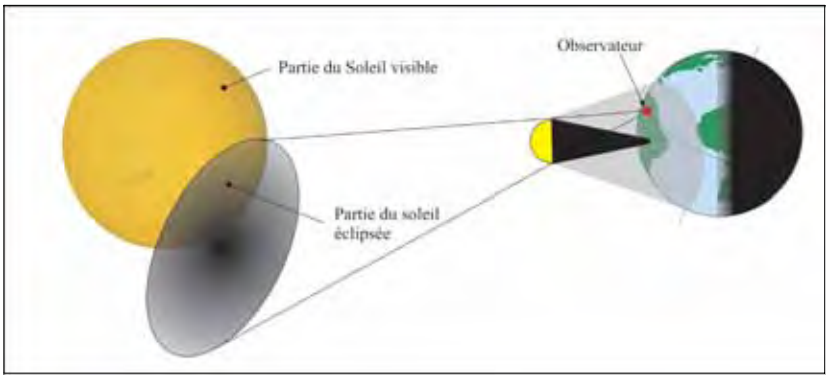
Schéma illustrant une éclipse totale.



Pour un observateur situé uniquement dans le cône de pénombre, une partie seulement du Soleil est occultée par la Lune, dans ce cas l'éclipse est vue par l'observateur sous la forme d'une éclipse partielle. Le diamètre apparent du Soleil est encore inférieur au diamètre apparent de la Lune.



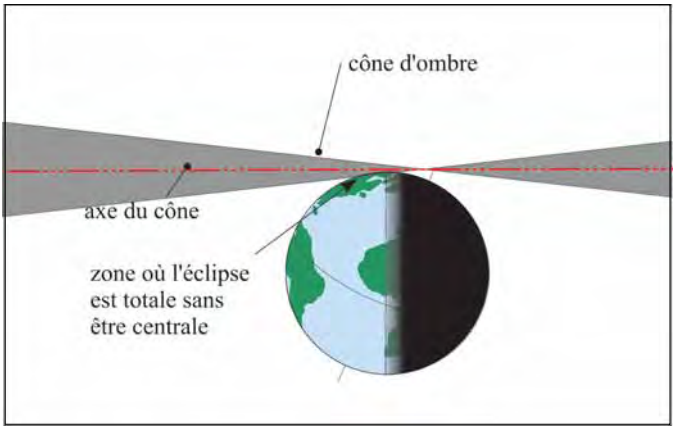
Phase totale.



Phases partielles d'une éclipse totale.

Il est possible que seule une petite partie du cône d'ombre rencontre la Terre sans que l'axe du cône d'ombre ne la rencontre. Dans ce cas, nous avons à faire à une éclipse totale non centrale, la bande de totalité est alors rasante à la surface de la Terre et la ligne de centralité n'existe pas. Sur la figure 4.1, afin de la rendre plus lisible, nous avons ajouté une transparence au cône d'ombre pour voir que son axe ne rencontre pas la Terre, nous avons agrandi l'angle au sommet du cône d'ombre et nous avons supprimé le cône de pénombre.

Figure 4.1. Éclipse totale non centrale.

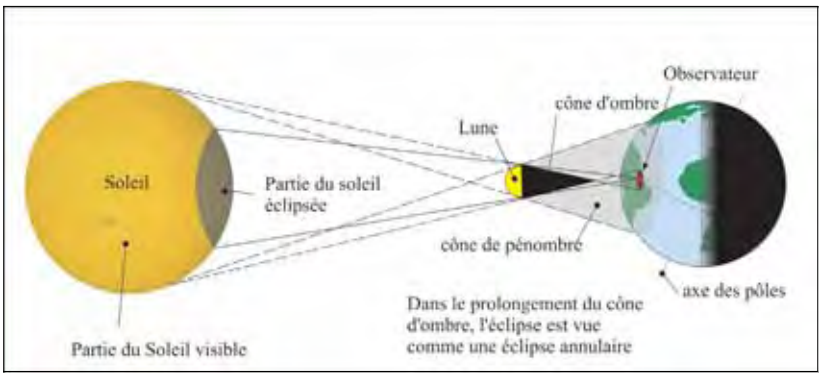


3.2. Les éclipses annulaires

Lors des éclipses annulaires, la couronne solaire n'est pas visible.

Lorsque la surface terrestre rencontre le prolongement du cône d'ombre, pour un observateur situé dans ce prolongement du cône d'ombre la surface du Soleil n'est pas complètement occultée par la Lune et le diamètre apparent de la Lune est plus petit que le diamètre apparent du Soleil. Dans ce cas, l'éclipse est dite éclipse annulaire. Tous les observateurs situés sur la bande de centralité observeront d'abord une phase partielle, puis la phase annulaire, puis de nouveau une phase partielle.

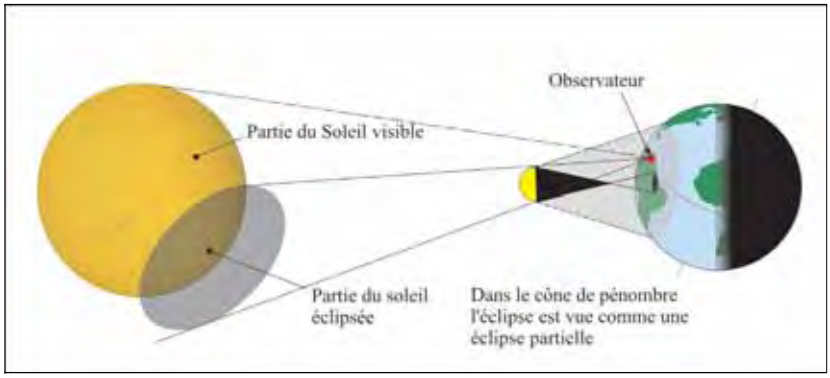
Éclipse annulaire.





Phase annulaire.
© C. Nitschelm.

Pour un observateur situé uniquement dans le cône de pénombre, une partie seulement du Soleil est occultée par la Lune. Dans ce cas, l'éclipse sera vue par l'observateur sous la forme d'une éclipse partielle. Le diamètre apparent du Soleil est supérieur au diamètre apparent de la Lune.

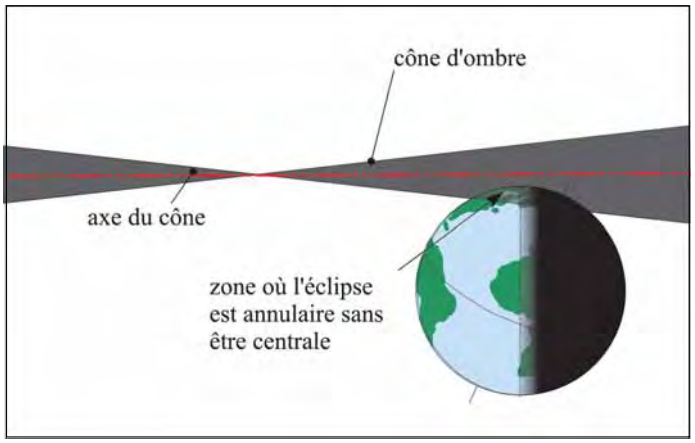


Phases partielles d'une éclipse annulaire.

Comme pour les éclipses totales, il est possible que seule une petite partie du prolongement du cône d'ombre rencontre la Terre sans que l'axe du cône d'ombre ne la rencontre. Dans ce cas, nous avons à faire à une éclipse annulaire non centrale, la bande de centralité est alors rasante à la surface de la Terre et la ligne de centralité n'existe pas. Sur la figure 4.2, afin de la rendre plus lisible, nous avons ajouté une

transparence au cône d'ombre pour voir que son axe ne rencontre pas la Terre, nous avons agrandi l'angle au sommet du cône d'ombre et nous avons supprimé le cône de pénombre.

Figure 4.2. Éclipse annulaire non centrale.

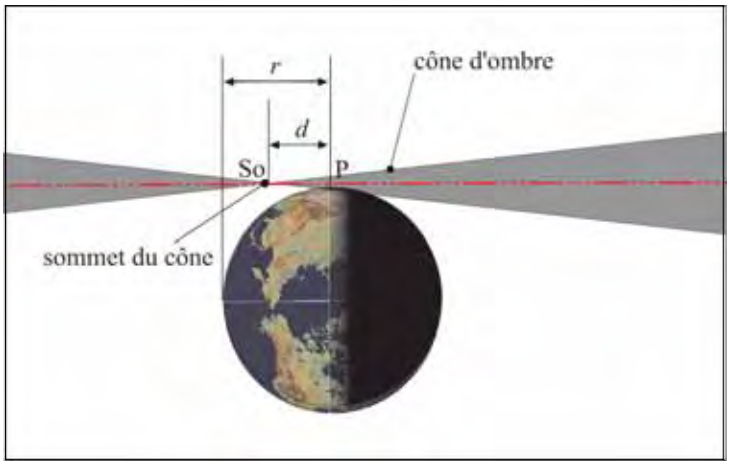


3.3. Les éclipses mixtes ou éclipses annulaires-totales

Soit *d* la distance entre la projection normale P du centre de la Terre sur l'axe du cône d'ombre et le sommet So du cône d'ombre. Si *d* est inférieure au rayon terrestre *r* et si P est situé après le sommet du cône d'ombre, alors le premier contact entre la Terre et le cône d'ombre se fait dans le prolongement du cône d'ombre et l'éclipse débute par une éclipse annulaire. L'intersection de la Terre et du cône d'ombre se fait ensuite au sommet du cône d'ombre puis en avant du sommet du cône d'ombre, l'éclipse est alors totale. Par la suite, l'intersection entre la Terre et le cône d'ombre se fait au sommet du cône, puis dans le prolongement du cône d'ombre. Donc au cours de son trajet sur la surface terrestre, l'éclipse est d'abord annulaire, puis totale, puis de nouveau annulaire. Ce type d'éclipse s'appelle éclipse mixte ou éclipse annulaire-totale.

Elle est également appelée éclipse perlée. En effet, durant ces éclipses, le diamètre apparent de la Lune est toujours très proche du diamètre apparent du Soleil car l'intersection de la Terre et du cône d'ombre reste toujours au voisinage du sommet du cône d'ombre ; or le limbe lunaire n'est pas un cercle parfait car il est constitué par une succession de montagnes et de vallées, chaque vallée laisse passer la lumière solaire et parsème le limbe lunaire de nombreux grains de Baily

donnant au limbe l'aspect d'un collier de perles. De plus, comme l'intersection du cône d'ombre et de la Terre se fait toujours au voisinage du sommet du cône d'ombre, les éclipses perlées sont caractérisées par une bande de centralité très étroite.



Éclipses perlées ou mixtes.

3.4. Les éclipses partielles

Enfin, lorsque la Terre rencontre uniquement le cône de pénombre de la Lune, seule une partie du Soleil est occultée et l'éclipse est dite partielle.



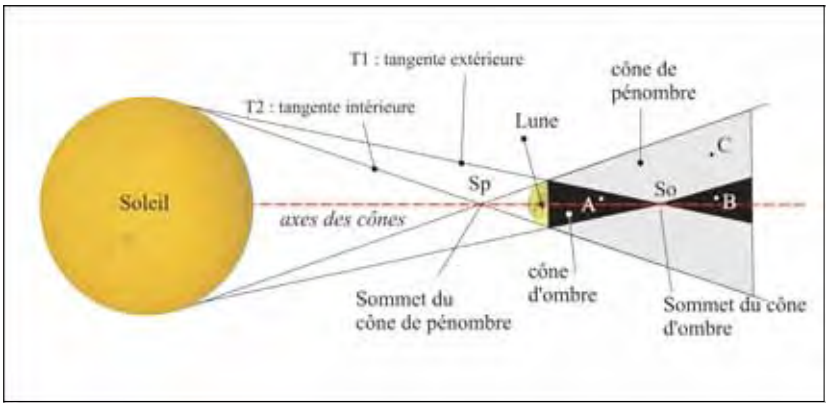
Éclipse partielle.
© P. Rocher.
Imcce - Observatoire de Paris.

Une phase partielle ou une éclipse partielle peut parfois être observée à l'œil nu lorsque le ciel est suffisamment couvert ou au lever le matin ou encore au coucher le soir.

4. Caractéristiques des cônes d'ombre et de pénombre

4.1. Les tailles

Figure 4.3. Cônes d'ombre et de pénombre.



La pénombre ne recouvre jamais entièrement la surface terrestre, mais uniquement 16 % d'un hémisphère terrestre.

Le dessin de la figure 4.3 est trompeur. En effet nous avons représenté les trois corps sur la même figure et cela introduit, comme nous l'avons déjà signalé, des erreurs dans la taille des angles. Ainsi l'angle au sommet du cône de pénombre est de l'ordre du demi-degré. De même, le Soleil étant très loin, les tangentes T1 (extérieure) et T2 (intérieure) sont quasi-parallèles, donc le rayon d'une section normale au cône de pénombre au niveau de la Terre est très proche du diamètre de la Lune, et donc le diamètre de la section normale du cône de pénombre au niveau de la Terre est de l'ordre de deux diamètres lunaires, soit environ 7 000 km.

La taille du diamètre de la section normale au cône d'ombre au niveau de la Terre dépend des distances Terre-Lune et Soleil-Lune. On montre, à l'aide des valeurs extrêmes de ces distances que le diamètre de la section normale au cône d'ombre pour une éclipse totale est au maximum de 268 km et que le diamètre de la section normale au prolongement du cône d'ombre pour une éclipse annulaire est au maximum de 375 km. Bien évidemment, l'ombre et son prolongement coupent la surface de la Terre suivant un ovale (intersection d'un cône et d'une sphère) dont le grand axe peut dépasser largement ces valeurs extrêmes, c'est le cas notamment pour les éclipses rasantes (proches des pôles).

4.2. Les vitesses

La vitesse à laquelle se déplace l'ombre où son prolongement sur la surface de la Terre est la combinaison de deux mouvements : le mouvement de l'ombre dans l'espace qui est égal au mouvement de la Lune par rapport au Soleil vu depuis la Terre fixe et le mouvement de la surface terrestre dû à la rotation de la Terre sur elle-même. Depuis la Terre, le Soleil et la Lune se déplacent par rapport aux étoiles d'ouest en est (mouvement direct) : la Lune se déplace environ treize fois plus vite que le Soleil et la vitesse de son ombre est d'environ 1 km/s par rapport à la Terre supposée fixe. La Terre tourne sur elle-même également d'ouest en est. La vitesse de l'ombre par rapport au sol est donc égale à la différence de la vitesse de l'ombre de la Lune et de la vitesse du sol. À l'équateur la vitesse du sol est de l'ordre de 500 m/s, la différence des deux vitesses est de 500 m/s ; plus on s'écarte en latitude de l'équateur, plus la vitesse de l'ombre est grande pour atteindre 1 km/s aux pôles (vitesse du sol nulle).

4.3. Le calcul des rayons de l'ombre et de la pénombre

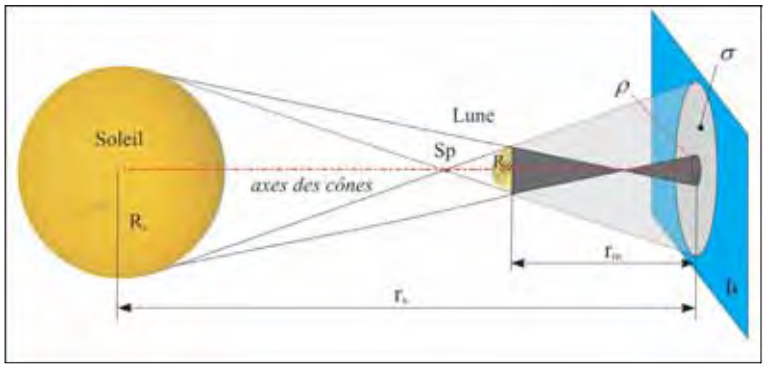


Figure 4.4. Cônes d'ombre et de pénombre d'une éclipse totale.

Sur la figure 4.4, soit P un plan normal à l'axe des cônes d'ombre et de pénombre, ρ et σ les rayons des cercles définis par les intersections du cône d'ombre et du cône de pénombre avec ce plan. Soit R_s le rayon solaire, R_m le rayon lunaire, r_s et r_m les distances respectives du centre du Soleil et du centre de la Lune au plan P. Une simple application du théorème de Thalès nous donne les valeurs de ρ et σ en fonction de R_s, R_m, r_s et r_m.

$$\rho = R_m - r_m \times \frac{R_s - R_m}{r_s - r_m}$$

$$\sigma = R_m + r_m \times \frac{R_s + R_m}{r_s - r_m}.$$

Lorsque l'éclipse est annulaire, le plan P coupe l'axe des cônes après le sommet du cône d'ombre, il coupe donc le prolongement du cône d'ombre. Les formules précédentes sont également applicables si l'on accepte que les rayons aient des valeurs négatives.

Le tableau 4.I donne les valeurs extrêmes de ρ et σ en fonction des distances Terre-Soleil et Terre-Lune. Dans ce tableau, on se place d'abord dans le plan du centre de la Terre, puis l'on se place à la surface de la Terre avec les deux corps au zénith, les distances Terre-Lune et Terre-Soleil sont alors diminuées d'un rayon terrestre (en fait, on néglige le rayon terrestre devant la distance Terre-Soleil). Dans ce tableau, le rayon solaire est pris égal à $R_s = 696\,000$ km, le rayon lunaire est pris égal à $R_m = 1\,738{,}1$ km et le rayon terrestre est pris égal à $R_e = 6\,400$ km. Nous donnons également ρ et σ en secondes d'arcs, dans ce cas, ces valeurs représentent les rayons sélénocentriques (c'est-à-dire vus depuis le centre de la Lune) apparents des intersections des cônes d'ombre et de pénombre avec le plan P.

Tableau 4.I. Valeurs extrêmes et moyennes des rayons des cônes d'ombre et de pénombre.

		Périgée	Moyenne	Apogée
Observateur au centre de la Terre	r_m (km)	357 200	381 300	407 000
	r_s (km)	$1{,}52 \times 10^8$	$1{,}50 \times 10^8$	$1{,}48 \times 10^8$
	ρ (km)	104,9	–34,7	–187,4
	ρ (″)	60,5	–18,7	–94,8
	σ (km)	3 379	3 520	3 673
	σ (″)	1 948	1 901	1 859
Observateur à la surface avec les corps au Zénith	$r_m - R_e$ (km)	305 800	374 900	400 600
	ρ (km)	134,1	–5.0	–157
	ρ (″)	78,7	–2,8	–80,8
	σ (km)	3 350	3 490	3 643
	σ (″)	1 966	1 918	1 873

Les valeurs extrêmes pour les éclipses périgées et apogées sont en rouge et l'on retrouve bien les valeurs des diamètres de 268 km pour une éclipse périgée (donc totale) et de 375 km pour une éclipse apogée (donc annulaire). De même, on constate que le diamètre de la pénombre qui est compris entre 6 700 km et 7 300 km est bien du même ordre de grandeur que deux diamètres lunaires.

4.4. La vitesse de l'ombre à la surface terrestre

En réalité, le calcul de la vitesse de l'ombre à surface du sol est plus complexe, dans l'explication précédente nous avons fait des simplifications qui ne sont vraies que lorsque les vecteurs vitesses de l'ombre et du sol sont colinéaires. Dans un premier temps, on peut supposer une Terre fixe avec une ombre de la Lune se déplaçant avec une vitesse constante V par rapport à la Terre. Sur la figure 4.5 nous avons tracé la position du cône d'ombre et de son axe à des instants T_0, T_1, T_2 et T_3 séparés par un intervalle de temps dt constant. Durant le premier intervalle d$t = T_1 - T_0$ l'ombre de la Lune s'est déplacée de $ab = V\mathrm{d}t$ dans l'espace et dans le plan passant par le centre de la Terre et normal à l'axe du cône d'ombre (plan de Bessel), alors que l'ombre a parcouru l'arc *ac* à la surface de la Terre. À la fin de l'intervalle dt suivant, l'ombre se trouve en *d* et a parcouru l'arc *cd*, puis à la fin de l'intervalle dt suivant, elle se trouve en *e* ayant parcouru l'arc *de*. Nous avons donc la projection d'un mouvement rectiligne uniforme sur un cercle de la sphère terrestre. Dans l'hypothèse d'une Terre fixe, ce cercle est l'intersection de la droite Soleil-Lune avec la sphère terrestre. La vitesse de l'ombre à la surface de la Terre est donnée par la formule $\mathrm{d}l/\mathrm{d}t = V/\sin(\mathrm{H})$, comme on le voit elle est très grande, proche de *a* (H ~ 0°) et égale à V en *d* (H = 90°).

La vitesse de la projection de l'ombre est donc très grande après le premier et avant le dernier contact avec la surface terrestre (l'axe est tangent à la sphère terrestre).

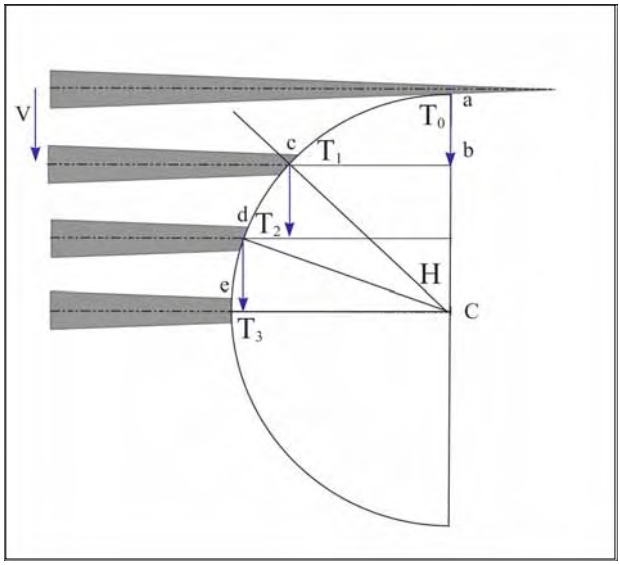
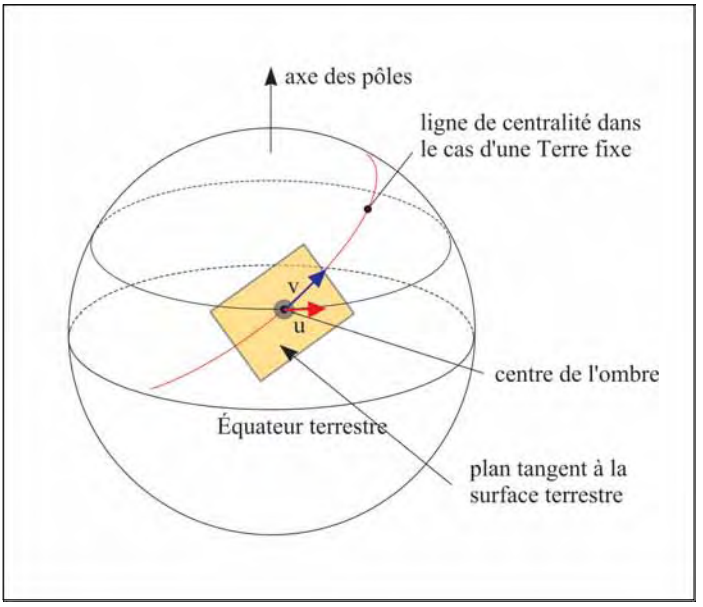


Figure 4.5. Vitesse de l'ombre à la surface d'une Terre fixe.

Pour avoir la vitesse et la trajectoire de l'ombre par rapport au sol dans le cas d'une Terre en rotation sur elle-même, il convient de combiner les deux mouvements. Si v est le vecteur vitesse de l'ombre (par rapport à la Terre fixe) dans le plan tangent au point de contact de l'axe du cône avec la surface terrestre et u le vecteur vitesse du sol dans le même plan, alors la vitesse de l'ombre par rapport au sol est égale à la différence des deux vecteurs vitesses $(v - u)$. Ces deux vitesses ne sont pas colinéaires en raison de l'inclinaison de l'orbite lunaire sur l'équateur terrestre. La trajectoire de l'ombre sur le sol, donc sur une carte, est la combinaison des deux mouvements et n'est donc plus un petit cercle de la sphère terrestre. En réalité, la Terre n'est pas une sphère mais un ellipsoïde de révolution. Cela complique encore un peu les calculs.

Combinaison des vitesses.



5. Magnitude ou grandeur d'une éclipse de Soleil

Toutes les éclipses de Soleil ne sont pas identiques, il convient donc de trouver un paramètre qui les caractérise : ce paramètre est la grandeur ou la magnitude de l'éclipse, ces deux termes désignant la même quantité.

À un instant donné, la grandeur g de l'éclipse est l'inverse du rapport du diamètre du Soleil sur la distance du bord du Soleil le plus rapproché du centre de la Lune au bord de la Lune le plus rapproché du centre du Soleil.

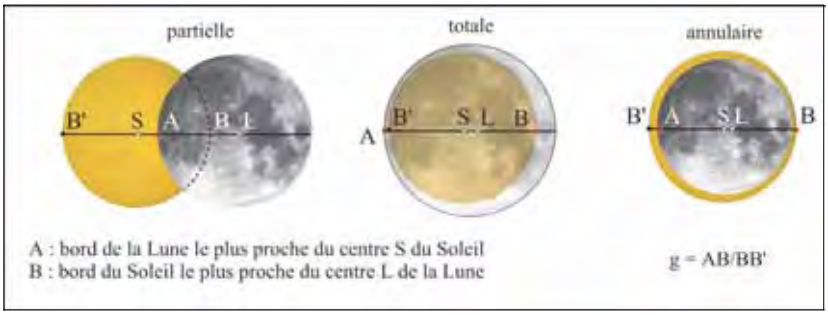
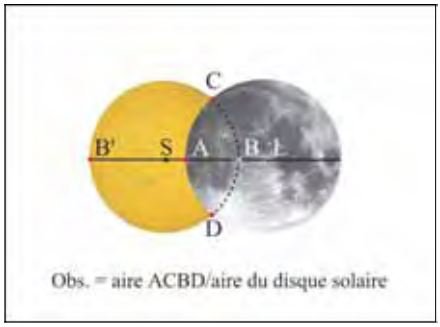


Figure 4.6. Grandeur ou magnitude d'une éclipse de Soleil.

Sur la figure 4.6, nous avons ajouté une transparence à la Lune dans le cas de l'éclipse totale, cela permet de voir la position du Soleil. Comme on le constate sur la figure, les éclipses partielles et annulaires ont une grandeur inférieure à un et les éclipses totales ont une grandeur supérieure à un. Les éclipses mixtes ont une grandeur très proche de un. Pour les éclipses annulaires, plus la grandeur s'approche de un, plus le diamètre apparent de la Lune est proche du diamètre apparent du Soleil, donc plus l'éclipse est courte. Pour les éclipses totales, plus on s'écarte de un, plus le diamètre apparent de la Lune est grand par rapport au diamètre apparent du Soleil, donc plus l'éclipse est longue.

6. Degré d'obscuration d'une éclipse

Le degré d'obscuration est aussi un paramètre caractéristique des éclipses de Soleil. Le degré d'obscuration est le pourcentage de la surface du disque solaire occultée par la Lune.



Le degré d'obscuration (obs.).

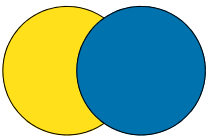
Le degré d'obscuration donne une information pour les éclipses annulaires et partielles car sa valeur est inférieure à 100 %. En revanche, toutes les éclipses totales ont un degré d'obscuration de 100 % quelle que soit la grandeur de l'éclipse.

La grandeur et le degré d'obscuration sont donnés dans les circonstances générales des éclipses. Ce sont alors les valeurs maximales de ces paramètres sur toute la durée de l'éclipse, elles correspondent à un instant et un lieu bien défini sur la Terre : le lieu du maximum de l'éclipse (lieu sur la Terre où la grandeur est maximale) et l'instant où la grandeur est maximale en ce lieu. Ces deux valeurs sont également données dans les circonstances locales des éclipses, dans ce cas elles sont toujours inférieures ou égales (si on est au lieu du maximum) à celles données dans les circonstances générales.

Bibliographie

Explanatory supplement to the Astronomical Almanac, édité par P.N. Seidelmann, U.S. Naval Observatory, Washinton, D.C., 1992.

5



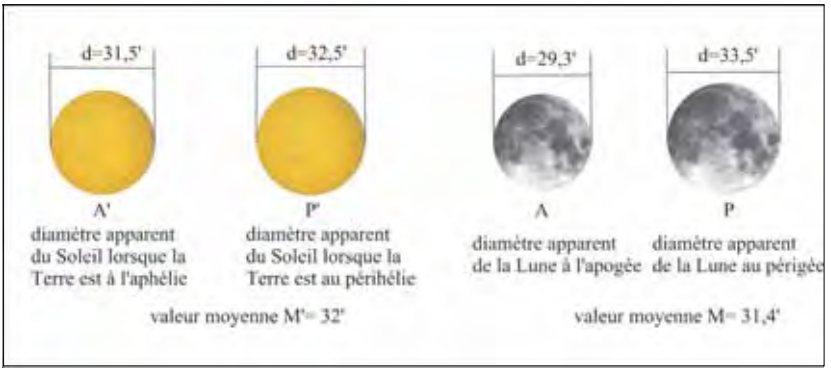
Détermination des types d'éclipses en fonction des positions orbitales

1. Diamètres apparents

En raison des mouvements orbitaux de la Terre et de la Lune, les distances Terre-Lune et Soleil-Terre ne sont pas constantes, les diamètres apparents de la Lune et du Soleil sont donc variables. Le diamètre apparent de la Lune est maximal lorsque la Lune est proche de la Terre donc à son périgée, et il est minimal lorsque la Lune est loin de la Terre donc à son apogée. De même, le diamètre apparent du Soleil est maximal lorsqu'il est proche de la Terre donc lorsque le Soleil apparent est à son périgée ou la Terre est à son périhélie (actuellement vers le 4 janvier) et le diamètre apparent du Soleil est minimal lorsque le Soleil est loin de la Terre, donc lorsque le Soleil apparent est à l'apogée ou la Terre à l'aphélie (actuellement vers le 4 juillet).

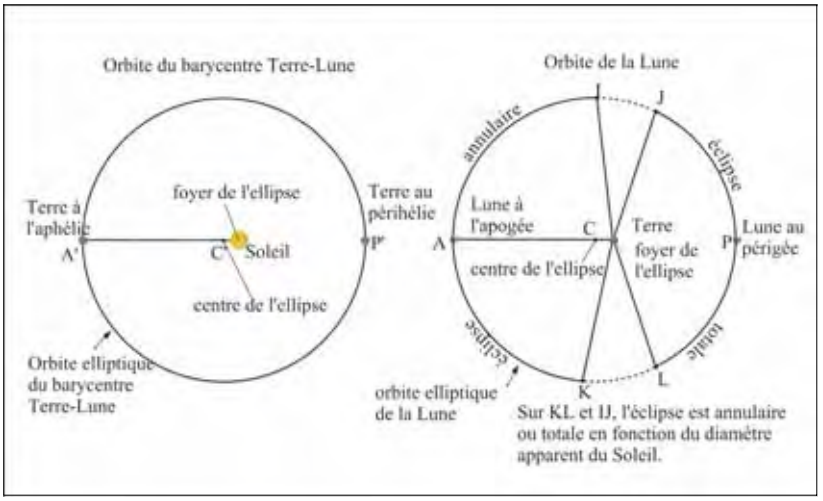
Comme on le constate sur la figure 5.1, le diamètre apparent moyen de la Lune est plus petit que le diamètre apparent moyen du Soleil, on peut donc s'attendre à avoir en moyenne plus d'éclipses annulaires que d'éclipses totales.

Figure 5.1. Valeurs extrêmes et moyennes des diamètres apparents du Soleil et de la Lune.



2. Positions orbitales

Figure 5.2. Orbites de la Terre et de la Lune.



Comme nous venons de le voir, nous pouvons calculer les valeurs extrêmes des diamètres apparents de la Lune et du Soleil vus depuis la Terre. Nous allons affiner un peu notre étude. En effet, nous pouvons déterminer la portion de l'orbite lunaire sur laquelle le diamètre apparent de la Lune est toujours plus grand que le plus grand diamètre apparent du Soleil (32,5'), c'est l'arc d'orbite LJ sur la figure 5.2. Sur cette portion d'orbite lunaire, les éclipses centrales sont toujours totales, quelle que soit la position de la Terre sur son orbite. Nous pouvons également déterminer la portion de l'orbite lunaire sur laquelle la Lune a un diamètre apparent toujours plus petit que le plus petit diamètre

apparent du Soleil (31,5′), c'est l'arc d'orbite IK sur la figure 5.2. Sur cette portion d'orbite, les éclipses centrales sont toujours annulaires quelle que soit la position de la Terre sur son orbite. Sur les portions d'orbites IJ et KL, le diamètre apparent de la Lune varie entre 31,5 et 32,5′ (valeurs extrêmes du diamètre apparent du Soleil) et le type de l'éclipse centrale est donc déterminé par le diamètre apparent du Soleil donc par la position de la Terre sur son orbite. C'est sur ces portions de l'orbite de la Lune que l'on trouve les éclipses mixtes.

Remarques

On remarquera que sur la figure 5.2, les orbites de la Terre et de la Lune sont représentées par des cercles, cela est totalement justifié compte tenu des faibles excentricités des orbites lunaire et terrestre. En revanche, les corps centraux ne sont pas aux centres des cercles mais sont excentrés. On notera également que l'arc LJ est centré sur le périgée de la Lune, donc les éclipses avec la Lune au périgée sont toujours des éclipses totales, de même l'arc IK est centré sur l'apogée de la Lune donc les éclipses avec la Lune en apogée sont toujours des éclipses annulaires. Enfin, l'arc IK est plus grand que l'arc LJ, cela confirme le fait qu'il y ait en moyenne plus d'éclipses annulaires que d'éclipses totales.

3. Types d'éclipses en fonction des distances des corps

Nous pouvons avoir une autre approche du problème en considérant les distances Soleil-Lune et Lune-Terre car en effet il y a équivalence entre les diamètres apparents et les distances des corps entre eux.

La figure 5.3 donne les distances extrêmes de la Terre et du cône d'ombre, en fonction des positions extrêmes de la Lune, du Soleil et de la Terre. (1) est la distance observateur-Lune minimale, d = 55,0 rayons terrestres, c'est-à-dire avec la Lune au périhélie et l'observateur avec la Lune au zénith. (4) est la distance observateur-Lune maximale, d = 63,8 rayons terrestres, c'est-à-dire avec la Lune à l'apogée et l'observateur avec la Lune à l'horizon. (2) correspond à une distance Lune-sommet du cône d'ombre de longueur minimale, l = 57,5 rayons terrestres, c'est à dire une distance Soleil-Terre minimale donc un Soleil au périgée (ou la Terre au périhélie). (3) correspond à une distance Lune-sommet du cône d'ombre de longueur maximale, l = 59,5 rayons terrestres, c'est-à-dire une distance Soleil-Terre maximale donc un Soleil à l'apogée (ou la Terre à l'aphélie). L'origine des distances est le centre de la Lune et les distances sont exprimées en rayons terrestres.

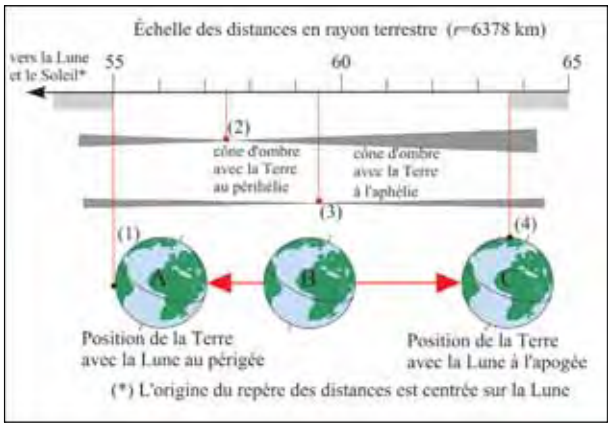
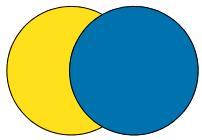


Figure 5.3. Positions extrêmes pour les éclipses centrales de Soleil.

La distance observateur-Lune varie de 55 à 63,8 rayons terrestres. La distance entre la Lune et le sommet du cône d'ombre varie, elle, de 57 à 59,5 rayons terrestres. Cette figure nous montre que si, au moment de l'éclipse, on est dans la position **A**, c'est-à-dire avec la Lune au périgée, alors quelle que soit la position de la Terre sur son orbite, l'éclipse est totale car la Terre coupe toujours le cône d'ombre avant son sommet. De même si, au moment de l'éclipse, on est en position **C**, c'est-à-dire avec la Lune à son apogée, alors quelle que soit la position de la Terre sur son orbite l'éclipse est annulaire car la Terre coupe toujours le prolongement de l'ombre. En faisant varier la position de la Terre (par rapport à la Lune) entre ces deux positions, on peut visualiser tous les cas intermédiaires possibles. Par exemple, lorsque la Terre est en **B** (distance Lune-Terre = 59 *r*), si la Terre est au périhélie (cône d'ombre en position 2) l'éclipse est annulaire car la Terre coupe le prolongement du cône d'ombre. Si la Terre est à l'aphélie (cône d'ombre en position 3) alors l'éclipse est totale car la Terre coupe le cône d'ombre. Avec un cône d'ombre entre les positions 2 et 3, toutes les configurations sont possibles (éclipses totales, annulaires ou mixtes).

6 

Circonstances générales et locales des éclipses de Soleil

1. Circonstances générales

Les circonstances générales d'une éclipse correspondent aux différentes phases de l'éclipse générale ; ces phases sont les suivantes :

- le commencement et la fin de l'éclipse générale. Ce sont les deux instants et les deux lieux sur Terre où le cône de pénombre de la Lune est tangent extérieur à la surface de l'ellipsoïde terrestre ;
- le commencement et la fin de l'éclipse totale ou annulaire. Ce sont les deux instants et les deux lieux sur Terre où le cône d'ombre de la Lune est tangent extérieur à la surface de l'ellipsoïde terrestre ;
- le commencement et la fin de la centralité. Ce sont les deux instants et les deux lieux sur Terre où l'axe du cône d'ombre de la Lune est tangent à la surface de l'ellipsoïde terrestre ;
- le maximum de l'éclipse. C'est l'instant et le lieu sur Terre où la grandeur de l'éclipse est maximale ;
- l'éclipse centrale à midi ou minuit vrai. C'est l'instant et le lieu sur Terre où le maximum de l'éclipse se produit lorsque le Soleil est dans le plan du méridien. L'éclipse peut effectivement être

centrale à minuit vrai, cela arrive lorsque l'éclipse est proche des pôles terrestres, le Soleil passe alors deux fois au méridien par jour à midi vrai et à minuit vrai.

Comme on le constate, ces différentes phases sont liées à l'évolution de l'ombre et de la pénombre à la surface de la Terre, les débuts et fins de chaque phase correspondant à un instant bien particulier et à un lieu unique à la surface du globe terrestre. La différence de temps entre le début et la fin de l'éclipse générale nous donne le temps mis par la pénombre pour parcourir la surface terrestre. De même, la différence de temps entre le début et la fin de la phase totale ou annulaire, lorsqu'elles existent, donne le temps mis par l'ombre ou son prolongement pour parcourir la surface terrestre.

1.1. Exemple de circonstances générales

Circonstances générales de l´éclipse des 10 et 11 juin 2002

Dans le tableau 6.I, les longitudes sont comptées positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. On remarquera que l'éclipse se déplace d'ouest en est et du sud vers le nord. On donne toujours les instants des différentes phases des éclipses en Temps universel coordonné, cela évite les problèmes liés aux heures locales. Dans notre exemple, l'éclipse est à cheval sur deux jours en Temps universel coordonné, le 10 et le 11 juin 2002.

Tableau 6.I. Circonstances générales de l'éclipse annulaire des 10 et 11 juin 2002.

Circonstance	UTC	Longitude	Latitude
Commencement de l´éclipse générale	le 10 à 20 h 51,8 min	–137° 58,5′	– 2° 30,0′
Commencement de l´éclipse annulaire	le 10 à 21 h 53,9 min	–120° 51,7′	+1° 16,0′
Commencement de l´éclipse centrale	le 10 à 21 h 54,5 min	–120° 40,8′	+1° 19,5′
Maximum de l´éclipse	le 10 à 23 h 44,3 min	+178° 36,8′	+34° 32,7′
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	le 10 à 23 h 48,2 min	+177° 11,4′	+34° 55,3′
Fin de l´éclipse centrale	le 11 à 1 h 34,0 min	+104° 49,2′	+19° 48,1′
Fin de l´éclipse annulaire	le 11 à 1 h 34,6 min	+104° 59,4′	+19° 44,9′
Fin de l´éclipse générale	le 11 à 2 h 36,6 min	+122° 15,8′	+16° 1,0′

La phase annulaire débute le 10 juin à 21 h 53,9 min UTC en un point de longitude –120° 51,7′ (est) et de latitude 1° 16,0′ (nord). Ce lieu se trouve à l'est du méridien international, en Indonésie (au nord des Célèbes). La phase annulaire se termine le 11 juin à 1 h 34,6 min UTC en

un point de longitude +104° 59,4' (ouest) et de latitude +19° 44,9' (nord), lieu qui se trouve sur la côte ouest du Mexique. Si l'on exprime ces instants en heures locales, le début de la phase annulaire, en Indonésie est le 10 juin à 21 h 53,9 min + 8 h = 29 h 53,9 min soit le 11 juin à 5 h 53,9 min temps légal en Indonésie, donc le 11 juin 2002 au matin, et la fin de la phase annulaire, au Mexique est le 11 juin à 1 h 34,6 min - 7 h = –5 h 25,4 min = 18 h 34,6 min le 10 juin en temps légal au Mexique, donc le 10 juin 2002 au soir. On a donc la phase annulaire qui commence le matin du 11 juin 2002 en Indonésie et qui se termine le soir du 10 juin au Mexique, elle finit donc en temps légal avant d'avoir commencé, ce qui est normal car la bande de centralité traverse la ligne de changement de date d'ouest en est donc on perd un jour en temps légal.

L'usage systématique du Temps universel évite ces paradoxes temporels pour les éclipses franchissant la ligne de changement de date. Néanmoins l'observateur, lors de ses déplacements, doit tenir compte des passages en heures légales s'il ne veut pas arriver un jour trop tard pour son observation !

2. Circonstances locales

Il ne faut pas les confondre avec les circonstances générales décrites dans le paragraphe précédent. Les circonstances locales d'une éclipse décrivent, **en un lieu donné**, les différentes phases de l'éclipse, observables par un observateur situé en ce lieu.

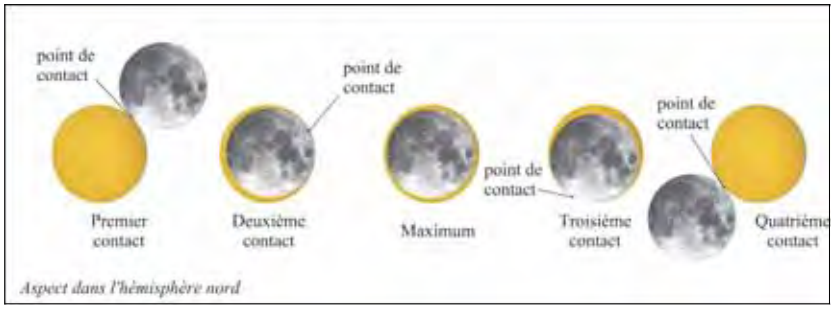


Figure 6.1. Phases locales d'une éclipse totale.

La figure 6.1 nous montre les différentes phases observables par un observateur situé dans la bande de totalité durant une éclipse totale de Soleil. Pour rendre le dessin plus lisible, nous avons ajouté une transparence à la Lune durant la totalité pour permettre de voir la position du Soleil occulté par la Lune. La durée de la phase de totalité en ce lieu est égale à l'intervalle de temps séparant les second et troisième contacts. La durée de l'éclipse locale (phases partielles et phase totale) est égale à l'intervalle de temps séparant les premier

et quatrième contacts. Les grains de Baily apparaissent au voisinage des second et troisième points de contacts.

Figure 6.2. Phases locales d'une éclipse annulaire.



La figure 6.2 nous montre les différentes phases observables par un observateur situé dans la bande de centralité d'une éclipse annulaire. La durée de la phase annulaire en ce lieu est égale à l'intervalle de temps séparant les second et troisième contacts. La durée de l'éclipse locale (phases partielles et phase annulaire) est égale à l'intervalle de temps séparant les premier et quatrième contacts.

Figure 6.3. Phases locales d'une éclipse partielle.



La figure 6.3 nous montre les différentes phases observables par un observateur situé sur le trajet du cône de pénombre d'une éclipse. L'éclipse peut être partielle, annulaire ou totale. Dans les deux derniers cas, l'observateur n'est pas dans la bande de centralité, il observe donc l'éclipse annulaire ou totale sous la forme d'une éclipse partielle. La durée de l'éclipse locale (phase partielle) est égale à l'intervalle de temps séparant les premier et quatrième contacts.

Ces phases sont les suivantes :

- le début de l'éclipse partielle, appelé également *premier contact* (parfois premier contact extérieur) ;
- le début de l'éclipse totale ou annulaire (si l'observateur est dans la bande de centralité), appelé également *deuxième contact* (parfois premier contact intérieur) ;

- le maximum de l'éclipse, instant où la grandeur est maximum en ce lieu ;
- la fin de l'éclipse totale ou annulaire (si l'observateur est dans la ligne de centralité), appelée également *troisième contact* (parfois deuxième contact intérieur) ;
- la fin de l'éclipse partielle, appelée également *quatrième contact* (parfois deuxième contact extérieur).

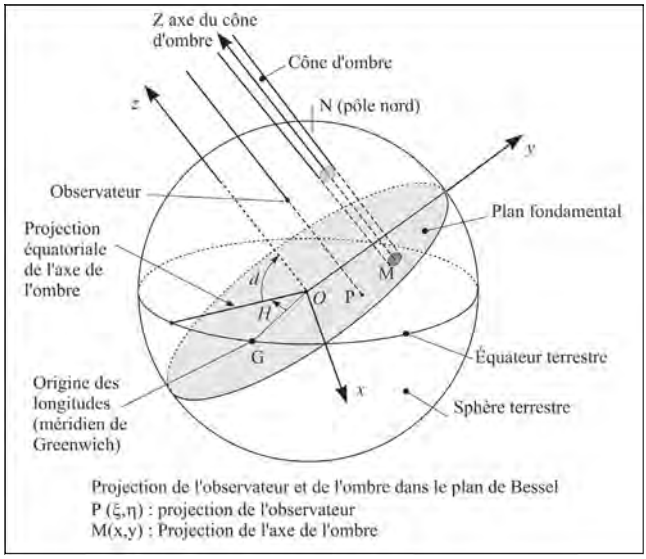
Pour chacun des contacts, en plus des instants du contact, on donne à l'observateur l'angle au pôle ***P*** et l'angle au zénith ***Z***. On remarquera que les points des contacts intérieurs des éclipses totales sont diamétralement opposés aux points des contacts intérieurs des éclipses annulaires.

3. Définition des éléments de Bessel

Au XIX^{e} siècle, l'astronome allemand Friedrich Bessel (1784-1846) a mis au point une méthode, toujours utilisée de nos jours, pour faciliter le calcul des circonstances locales et générales d'une éclipse de Soleil.

Pour un lieu donné, il y a lieu de déterminer :

- les instants des différents contacts ;
- l'instant du maximum de l'éclipse et la grandeur de l'éclipse à cet instant ;
- les angles au pôle et au zénith de chacun des contacts.



Les éléments de Bessel.

Le lieu d'observation est défini par sa longitude λ (positive à l'ouest et négative à l'est du méridien de Greenwich), sa latitude ϕ et son altitude h au-dessus du niveau de la mer.

On définit à chaque instant un système de coordonnées $Oxyz$ de sens direct, dans lequel :

– O est le centre de la Terre.

– L'axe Oz est parallèle à l'axe des cônes de pénombre et d'ombre, le sens positif étant celui qui va de la Terre à la Lune.

– L'axe Ox est l'intersection du plan fondamental Oxy perpendiculaire à Oz et du plan de l'équateur terrestre, le sens positif étant vers l'est.

– L'axe Oy est normal à Ox dans le plan fondamental, le sens positif étant vers le nord.

En utilisant comme unité de longueur le rayon équatorial terrestre, les éléments de Bessel sont définis de la manière suivante :

– x, y, z sont les coordonnées du centre de la Lune.

– d et H sont la déclinaison de l'axe Oz et son angle horaire par rapport au méridien de Greenwich.

– f_e et f_i sont les demi-angles au sommet des cônes de pénombre et d'ombre, f_e étant pris par convention positif et f_i négatif.

– u_e et u_i sont les rayons des sections circulaires des cônes de pénombre et d'ombre par le plan fondamental Oxy et s'obtiennent par les formules suivantes :

$$u_e = z \,.\, \tan f_e + k \,.\, \text{séc}\, f_e$$
$$u_i = z \,.\, \tan f_i + k \,.\, \text{séc}\, f_i$$

où k est le rayon de la Lune exprimé en rayon équatorial terrestre.

Les coordonnées ξ, η, ζ du lieu d'observation dans le système $Oxyz$ sont :

$$\xi = \rho \,.\, \cos \phi' \,.\, \sin (H - \lambda),$$
$$\eta = \rho \,.\, \sin \phi' \,.\, \cos d - \rho \,.\, \cos \phi' \,.\, \sin d \,.\, \cos (H - \lambda),$$
$$\zeta = \rho \,.\, \sin \phi' \,.\, \sin d + \rho \,.\, \cos \phi' \,.\, \cos d \,.\, \cos (H - \lambda),$$

avec

$$\rho \,.\, \cos \phi' = \cos u + h/r_0 \,.\, \cos \phi$$
$$\rho \,.\, \sin \phi' = (1 - f) \,.\, \sin u + h/r_0 \,.\, \sin \phi$$

et

$$\tan u = (1 - f) \,.\, \tan \phi$$

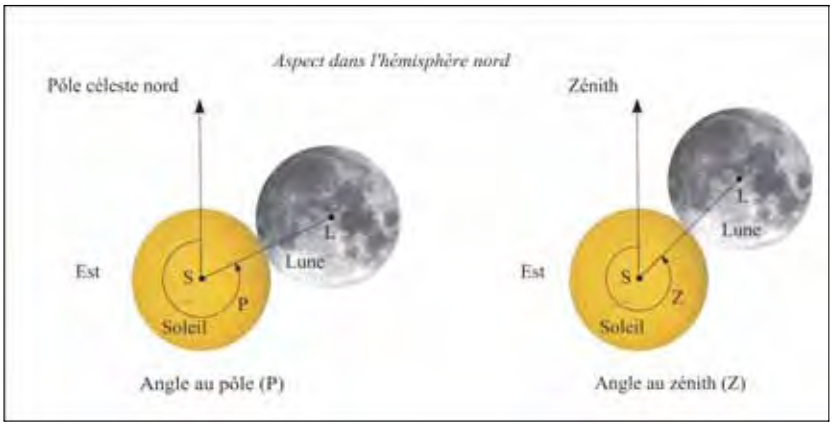
où h est l'altitude du lieu exprimée en mètres, r_0 est le rayon équatorial terrestre exprimé en mètres et f l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre (f = 1/298,257 = 0,003 352 81).

Les variations horaires ξ', η', ζ' de ces coordonnées sont fournies avec une précision de l'ordre de la seconde de temps par les formules suivantes, H' étant exprimé en radians par heure

$$\xi' = H' \,.\, \rho \,.\, \cos \phi' \,.\, \cos (H - \lambda),$$
$$\eta' = H' \,.\, \xi \,.\, \sin d,$$
$$\zeta' = - H' \,.\, \xi \,.\, \cos d.$$

Les rayons l_e et l_i des sections circulaires des cônes de pénombre et d'ombre par le plan mené par le lieu d'observation parallèlement au plan fondamental s'obtiennent par les formules suivantes :

$$l_e = u_e - \zeta \tan f_e$$
$$l_i = u_i - \zeta \tan f_i.$$



Définitions des angles au pôle et au zénith.

L'angle au pôle P d'un contact est l'angle de la direction nord N (partie boréale du cercle horaire du centre S du Soleil) avec l'arc de grand cercle joignant les centres S et L du Soleil et de la Lune, compté positivement vers l'est, dans le sens nord-est-sud-ouest.

L'angle au zénith Z d'un contact a une définition analogue à celle de P, en remplaçant le cercle horaire du centre S du Soleil par le vertical du même point.

Remarques

Sous nos latitudes (en France) et pour les latitudes positives situées au-dessus du tropique du Cancer (latitudes supérieures à 23°), le Soleil

La connaissance des instants et positions du deuxième et du troisième point de contact est très importante pour les éclipses totales de Soleil car elle indique quand et où vont apparaître les grains de Baily.

passe au méridien au sud, donc quand on regarde le Soleil, l'ouest est à droite du Soleil et l'est est à sa gauche. La Lune éclipse le Soleil d'ouest en est (donc de la droite vers la gauche lorsque l'on regarde le Soleil). Pour les latitudes négatives situées sous le tropique du Capricorne (latitudes inférieures à –23°), le Soleil passe au méridien au nord, l'aspect du phénomène est inversé, l'éclipse a, bien évidemment, toujours lieu d'ouest en est, mais elle a lieu de la gauche vers la droite car on regarde le Soleil vers le nord. Dans la zone intertropicale, les deux cas de figure sont possibles, cela dépend de la date de l'éclipse et du lieu d'observation.

Avec l'instant du maximum, on donne également la grandeur de l'éclipse, le degré d'obscuration, la hauteur h et l'azimut a du Soleil.
La hauteur h du Soleil sur l'horizon est l'angle de la direction du Soleil et du plan horizontal, compté en degrés de –90° à +90°.
L'azimut est l'angle formé par la projection de la direction du Soleil dans le plan horizontal avec la direction du sud, compté en degré dans le sens rétrograde (sud = 0°, ouest = 90°, nord = 180°, est = 270°).
Les circonstances locales d'une éclipse peuvent être calculées à l'aide des éléments de Bessel.

4. Calcul des circonstances locales

Chaque élément de Bessel que l'on pourra désigner par b est représenté sur un intervalle de temps (t_0, t_1) par des coefficients de développements en polynômes du temps, à l'exception de $\tan f_e$ et de $\tan f_i$ qui sont considérées comme constantes sur l'intervalle. Un élément de Bessel se calcule à un instant t par la formule :

$$b = b_0 + b_1 \,.\, T + b_2 \,.\, T^2 + b_3 \,.\, T^3$$

$$\text{avec } T = t - t_0.$$

T, exprimé en heure, représente le temps écoulé depuis l'instant origine t_0.

La variation horaire b' d'un élément de Bessel se calcule par la formule :

$$b' = b_1 + 2\, b_2 \,.\, T + 3\, b_3 \,.\, T^2.$$

4.1. Calcul de la grandeur maximale en un lieu

Soit

$$U = x - \xi\,,\ U' = x' - \xi'\,,$$
$$V = y - \eta\,,\ V' = y' - \eta'\,.$$

On prend comme valeur de départ t_d l'époque du maximum de l'éclipse, l'instant du maximum t_m se calcule en ajoutant à t_d la valeur Dt_m donnée par

$$Dt_m = -(UU' + VV') / (U'^2 + V'^2).$$

On doit réitérer le calcul en prenant comme nouvelle valeur de départ la valeur de t_m.

La grandeur maximale est donnée par

$$g = (l_e - l_m) / (l_e - l_i)$$

pour une éclipse annulaire ou totale au lieu considéré, où

$$g = (l_e - l_m) / (2\,l_e - 0{,}546\,5)$$

pour une éclipse partielle, avec

$$l_m = (U^2 + V^2)^{1/2}.$$

4.2. Calcul des instants des contacts en un lieu

On prend comme valeurs de départ t_d du premier et du quatrième contacts (contacts extérieurs) des valeurs approchées déduites de la carte de l'éclipse et l'on prend comme valeurs de départ du second et du troisième contacts (contacts intérieurs), lorsqu'ils existent, la valeur t_m du maximum calculée précédemment.

Pour chaque valeur t_d de départ, on calcule les quantités suivantes :

$$\beta = (UU' + VV') / (U'^2 + V'^2)\,,$$
$$\gamma = (U^2 + V^2 - l^2) / (U'^2 + V'^2)\,,$$
$$\theta = \pm(\beta^2 - \gamma)^{1/2}$$

avec $l = l_e$ ou $l = l_i$ et θ étant du signe de β.

Les instants du premier et du quatrième contacts se calculent par la formule

$$t = t_d - \beta + \theta$$

et les instants du second et du troisième contacts se déterminent par les relations

$$t = t_d - \beta - |\theta| \text{ pour le second contact,}$$

et

$$t = t_d - \beta + |\theta| \text{ pour le troisième contact.}$$

Comme pour le calcul du maximum, on doit réitérer les calculs en prenant comme nouvelles valeurs de départ les valeurs t.

4.3. Calcul de l'angle au pôle et de l'angle au zénith

La valeur de l'angle au pôle P d'un point de contact est donnée par :

$$\tan P = U/V ,$$

où sin P a le signe de U, sauf pour les second et troisième contacts (contacts intérieurs) d'une éclipse totale pour lesquels sin P est de signe contraire à U.

L'angle au zénith Z d'un point de contact est donné par

$$Z = P - \Gamma ,$$

en désignant par Γ l'angle parallactique défini d'une façon approchée par

$$\tan \Gamma = \xi / \eta ,$$

sin Γ étant du signe de ξ.

5. Les cartes d'éclipses

On distingue deux types de cartes, les cartes générales et les cartes locales.

Pour chaque éclipse, on trace généralement une ou deux cartes générales de l'éclipse. Sur ces cartes, on fait figurer les courbes suivantes : la bande de centralité (lorsqu'elle existe), les limites boréale et australe de l'éclipse, les courbes de commencement, de fin et de maximum au lever et au coucher du Soleil, ainsi que les courbes de

commencement et fin pour des instants donnés (toutes les heures en général). Pour le tracé de ces cartes, on utilise une projection stéréographique, c'est-à-dire une projection azimutale conforme. Cette projection, qui conserve les angles mais pas les distances, déforme les continents mais permet d'avoir une représentation des pôles terrestres sur la carte. On utilise également une projection orthographique qui permet de représenter la trajectoire de l'éclipse sur un globe terrestre vu de l'espace. Les informations sont toujours données en temps universel coordonné (UTC).

On trace également un certain nombre de cartes locales. Sur ces cartes, on donne également les courbes de commencement, de fin et de maximum pour des instants donnés (avec un pas plus adapté à la carte), et parfois on trace aussi la projection de l'ombre pour des instants donnés. Les cartes locales sont tracées à l'aide de différentes projections en fonction des lieux représentés (projection conforme de Lambert, projection de Mercator...).

5.1. Carte en projection stéréographique



Figure 6.4. Carte générale de l'éclipse des 10-11 juin 2002.

Sur la carte de la figure 6.4 on a tracé la bande de centralité (en rouge) et les limites boréale et australe de l'éclipse qui sont les limites

boréale et australe du cône de pénombre durant l'éclipse. On donne également les limites du cône de pénombre toutes les heures (commencement et fin à un instant donné, courbes bleues) et les lieux des commencements, maxima et fins d'éclipse au lever et au coucher du Soleil (courbes noires et rouges joignant les extrémités des limites boréale et australe de l'éclipse). On notera la différence de taille entre la surface terrestre où l'éclipse est visible sous la forme d'une éclipse partielle (surface grisée) et la surface de la bande de centralité.

Des cartes plus grandes, et plus lisibles, sont disponibles sur le serveur de l'IMCCE.

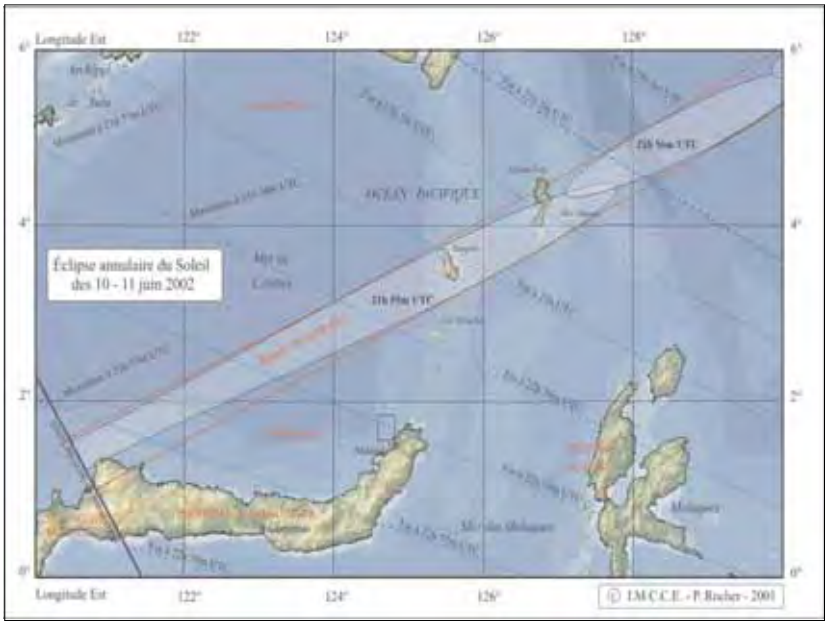
5.2. Carte en projection orthographique



Projection orthographique de l'éclipse du 11 août 1999.

La projection orthographique permet de représenter l'éclipse générale sur la Terre, vue depuis l'espace. Les courbes représentées sont les mêmes que dans la représentation stéréographique.

5.3. Carte locale



Carte locale de l'éclipse des 10-11 juin 2002 sur l'Indonésie.

Cette carte locale en projection de Lambert donne le tracé de la ligne de centralité sur une partie de l'Indonésie, les deux îles de cette carte sont les deux seuls lieux terrestres où la phase annulaire de l'éclipse fut observable. On a également tracé l'intersection du prolongement du cône d'ombre avec la surface terrestre. Comme on est en début d'éclipse, on notera l'aspect très allongé de la projection.

Bibliographie

Serveur de l'IMCCE : www.imcce.fr

7

Quand ont lieu les éclipses de Soleil ?

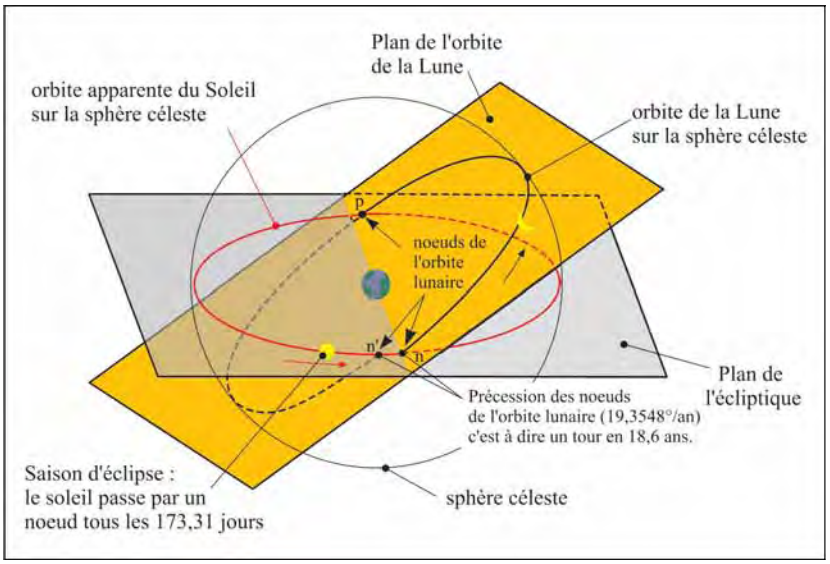
1. Le mouvement moyen de la ligne des nœuds

Il y a éclipse de Soleil lorsque la Terre passe dans le cône d'ombre ou dans le cône de pénombre de la Lune. Le Soleil, la Lune et la Terre sont alors presque alignés, et on est au voisinage de la nouvelle Lune (conjonction). Si le plan de l'orbite de la Lune était le même que le plan de l'orbite de la Terre (écliptique), il y aurait une éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune, or le plan de l'orbite de la Lune est incliné d'environ 5° 17′ sur le plan de l'orbite terrestre à la nouvelle Lune. À chaque instant, l'intersection de ces deux plans est une droite appelée ligne des nœuds et les intersections de cette droite avec l'orbite de la Lune sont appelées nœuds de l'orbite lunaire.

Cette ligne des nœuds n'est pas fixe, elle est animée, dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre), d'un mouvement de précession d'une période de 18,6 ans, soit un déplacement moyen de 19,354 8° par an.

Pour qu'il y ait une éclipse il faut donc, dans le repère écliptique géocentrique, que la direction Terre-Soleil soit près de la ligne des nœuds lunaires au moment de la nouvelle Lune. Compte tenu du mouvement

Orbites de la Lune, mouvement de la ligne des nœuds.



Le Soleil passe par le même nœud de l'orbite lunaire en moyenne tous les 346,32 jours, cette période porte le nom d'année des éclipses.

moyen de précession des nœuds, le Soleil apparent passe en moyenne par l'un des deux nœuds tous les 173,31 jours. Cette période porte le nom de saison d'éclipses.

2. Le calcul de la saison des éclipses

Nous avons vu que la ligne des nœuds de l'orbite lunaire se déplace en moyenne de 19,3413618°/an dans le sens rétrograde dans le repère moyen de la date (chapitre 3, tableau 3.III), « an » étant l'année julienne moyenne de 365,25 jours. Comme cette valeur est donnée dans le repère moyen de la date, le mouvement de la Terre doit être donné dans le même repère, la Terre faisant donc une rotation de 360° en une année tropique de 365,242 19 04 jours. Nous devons, avant de combiner ces deux mouvements, les exprimer dans une même unité, par exemple le degré par année julienne. 360° par année tropique correspond à 360,007 697 4° par année julienne. On a donc deux mouvements en sens contraire. La période T qui ramène le Soleil apparent dans la direction d'un même nœud de l'orbite lunaire est solution de l'équation suivante :

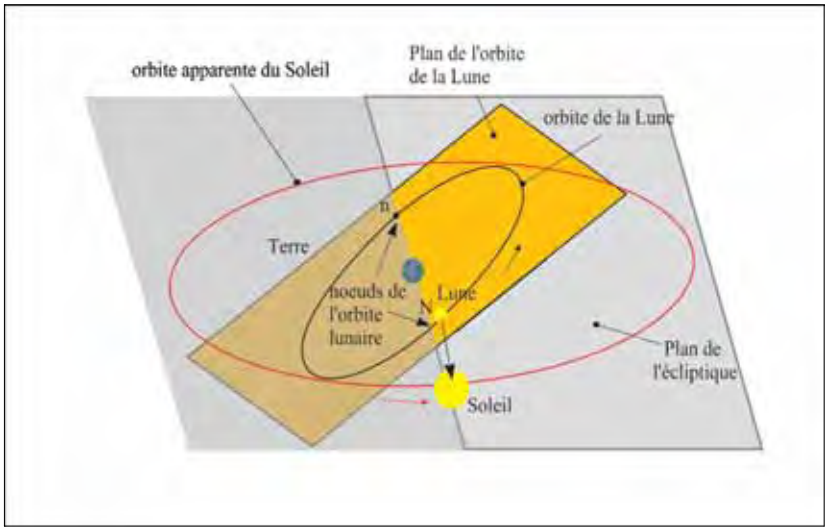
T . 360,007 697 4°/an + T . 19,341 361 8°/an = 360°, ce qui donne T = 360/(360,007 697 4 + 19,341 361 8) an = 0,948 an. Il suffit de multiplier par la valeur de l'année julienne pour avoir la valeur en jour : 1 an = 365,25 jours et donc T = 346,620 076 5 jours ~ 346 j 14 h 52 min 55 s.

La saison des éclipses correspond à l'intervalle de temps mis par le Soleil apparent pour passer d'un nœud de l'orbite lunaire à l'autre, elle est donc égale à $T/2 \sim 173{,}31$ jours.

La valeur de cette période T nous permet de calculer la vitesse moyenne du Soleil apparent (ou de la Terre) dans un repère tournant lié à la ligne des nœuds de l'orbite lunaire. Par rapport à cette ligne des nœuds, le Soleil apparent fait un tour de 360° en 346,62 jours, sa vitesse moyenne par rapport à la ligne des nœuds est donc de 360°/346,62 j = 1,0386°/j.

3. Le mouvement réel de la ligne des nœuds

En réalité, le mouvement rétrograde de la ligne des nœuds présente des inégalités importantes. À certaines époques, sa vitesse est le double de la moyenne. À d'autres moments, sa vitesse est presque nulle, les nœuds sont alors quasi stationnaires. Cela se produit aux voisinages du passage du Soleil dans la direction de la ligne des nœuds, donc au voisinage des éclipses de Soleil (et aussi de Lune). On peut expliquer ce phénomène de la manière suivante, lorsque le Soleil est sur la ligne des nœuds, il se trouve dans le plan de l'orbite de la Lune, la force perturbatrice du Soleil est alors comprise dans le plan de l'orbite de la Lune, donc la composante perpendiculaire à ce plan est nulle et ne « tire » pas sur le plan de l'orbite. Le fait que les nœuds soient quasi



Système Terre-Lune-Soleil lorsque le Soleil est sur la ligne des nœuds.

stationnaires au moment des éclipses est très important. En effet les positions moyennes des nœuds sont alors presque égales aux positions vraies, donc dans l'étude des éclipses on peut utiliser le mouvement moyen des nœuds.

4. Critère en latitude

4.1. Définition

On démontre qu'une éclipse de Soleil se produira si, au moment de la nouvelle Lune (instant où les longitudes géocentriques de la Lune et du Soleil sont égales, c'est-à-dire au moment de la conjonction en longitude), la valeur absolue de la différence b des latitudes géocentriques apparentes du centre de la Lune et du centre du Soleil est inférieure à 1,41° (1° 24′ 37″). Elle se produira peut-être si $|b|$ est comprise entre 1,41° (1° 24′ 37″) et 1,58° (1° 34′ 46″) mais elle ne se produira pas si $|b|$ est supérieure à 1,58° (1° 34′ 46″).

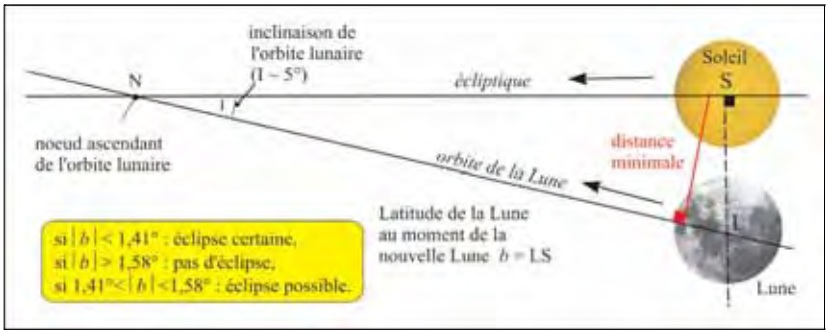


Figure 7.1. Critères en latitude pour les éclipses de Soleil (vue depuis la Terre).

Sur la figure 7.1, la distance minimale correspond à l'instant où, pour un observateur terrestre, le centre de la Lune est le plus près possible du centre du Soleil, cela correspond si l'éclipse a lieu, au maximum de l'éclipse. Durant une éclipse de Soleil on a toujours un des deux scénarios suivants :

- si l'éclipse a lieu avant le passage de la Lune au nœud, on observe d'abord la conjonction (nouvelle Lune), puis le maximum de l'éclipse, puis le passage au nœud ;
- si l'éclipse a lieu après le passage de la Lune au nœud, on observe d'abord le passage au nœud, puis le maximum de l'éclipse et enfin la conjonction.

La géométrie de ce dessin montre également que plus la conjonction est proche du nœud, plus la distance minimale entre la Lune et le Soleil est petite et plus la magnitude de l'éclipse est grande. Ainsi, les éclipses partielles correspondent à des conjonctions situées loin des nœuds de l'orbite lunaire et les éclipses centrales (annulaires, totales ou mixtes) correspondent à des conjonctions proches des nœuds de l'orbite lunaire.

On peut détailler le critère en latitude en déterminant pour quelle valeur de b (0,88°) on a une éclipse centrale avec certitude et pour quelle valeur de b (1,05°) on n'a pas d'éclipse centrale avec certitude (mais une éclipse partielle avec certitude). Ces valeurs sont données dans le graphique 7.2.

On rappelle que le fait qu'une éclipse centrale soit annulaire, totale ou mixte ne dépend pas de la distance de la conjonction aux nœuds de l'orbite lunaire, mais dépend uniquement des tailles des diamètres apparents des corps, donc de leurs positions sur leur orbite.

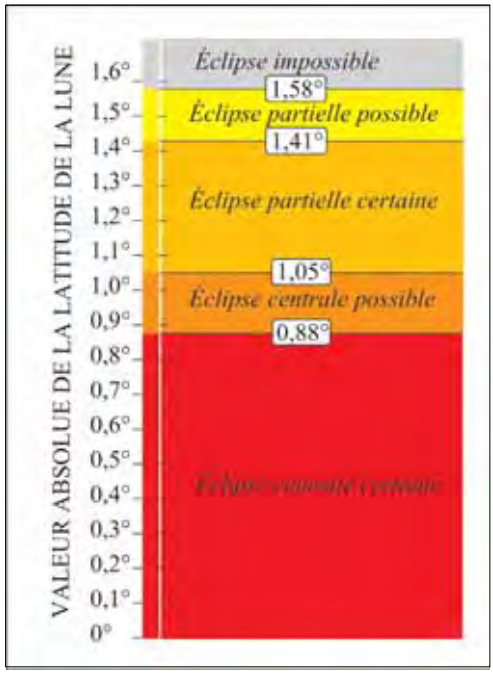


Figure 7.2. Critères en latitude.

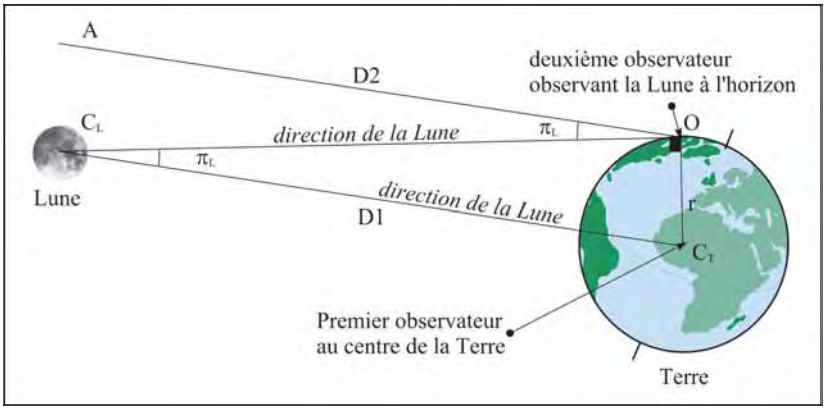
On peut également calculer les valeurs moyennes de ces critères en latitude. Pour avoir une éclipse de Soleil il faut que b soit inférieure à $\beta_m = 1{,}48°$ et pour avoir des éclipses centrales il faut que b soit inférieure à $\beta_m = 0{,}95°$. Ces valeurs moyennes permettent de calculer également la proportion d'éclipses partielles (36 %) et la proportion d'éclipses centrales (64 %).

4.2. La parallaxe solaire et la parallaxe lunaire

La démonstration du critère en latitude fait intervenir la notion de parallaxe équatoriale solaire et de parallaxe équatoriale lunaire, il convient donc de les définir.

La parallaxe équatoriale solaire est égale à l'angle sous lequel un observateur situé au centre du Soleil voit le rayon terrestre. De même la parallaxe équatoriale lunaire est l'angle sous lequel un observateur situé au centre de la Lune voit le rayon terrestre. C'est également la différence angulaire sous laquelle deux observateurs, l'un situé au centre de la Terre, l'autre situé sur la Terre et observant la Lune à l'horizon, voient le centre de la Lune.

Figure 7.3. La parallaxe équatoriale lunaire.



Comme on le constate sur la figure 7.3, les deux droites D1 et D2 étant parallèles, les angles AOC_L et OC_LC_T sont des angles alternes internes, donc égaux. Ainsi, si les éphémérides donnent une direction angulaire géocentrique de la Lune b, un observateur qui regarde la Lune à l'horizon, la voit dans la direction $b - \pi_L$.

La parallaxe se calcule par la formule

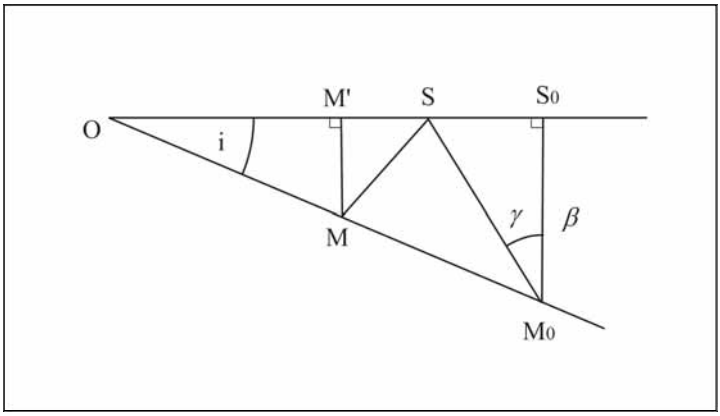
$$\sin \pi = r/\Delta,$$

Δ étant la distance entre le centre de la Terre et le centre du corps, et r le rayon terrestre. On constate que plus le corps est loin de la Terre plus le sinus est petit et plus la parallaxe est faible.

4.3. La démonstration du critère en latitude

Nous allons établir le critère en latitude dans le cas d'une éclipse au nœud ascendant de l'orbite lunaire, la conjonction ayant lieu avant le passage au nœud. La démonstration est identique pour un passage au nœud descendant ou avec une conjonction située après le passage au nœud, la seule chose qui change dans ce dernier cas est la position du minimum de distance entre les deux corps.

Critère en latitude.



Soit M_0 et S_0 les positions de la Lune et du Soleil à l'instant de la conjonction (nouvelle Lune) avant le passage de la Lune au nœud ascendant de son orbite. Soit M et S les positions de la Lune et du Soleil à un instant t postérieur à la conjonction, γ l'angle S_0M_0S, β la différence des latitudes entre la Lune et le Soleil à l'instant de la conjonction et q le rapport du mouvement en longitude de la Lune sur celui du Soleil.

Le calcul du critère en latitude consiste à calculer le minimum de la distance SM (corrigé des parallaxes équatoriales lunaire et solaire) et de le comparer avec la somme des demi-diamètres apparents du Soleil et de la Lune. SM se calcule simplement en utilisant le théorème de Pythagore.

On a

$$q = \frac{S_0M'}{S_0S} = \frac{S_0S + SM'}{S_0S} = 1 + \frac{SM'}{S_0S}$$

donc $$SM' = (q-1)\cdot S_0S = (q-1)\cdot\beta\cdot\tan\gamma$$

alors $$SM'^2 = \beta^2\cdot(q-1)^2\cdot\tan^2\gamma.$$

De plus $\dfrac{M'M}{\beta} = \dfrac{OM'}{OS_0} = \dfrac{OS_0 - S_0M}{OS_0} = 1 - \dfrac{S_0M'}{OS_0}$

$$\frac{M'M}{\beta} = 1 - q\frac{1}{1+\dfrac{OS}{SS_0}} = 1 - q\frac{SS_0}{OS_0} = 1 - q\frac{\beta - \tan\gamma}{OS_0}$$

$$\frac{M'M}{\beta} = 1 - q\cdot\tan\gamma\cdot\tan i$$

d'où :

$$SM^2 = SM'^2 + M'M^2$$
$$= \beta^2\left[(q-1)^2\tan^2\gamma + (1 - q\cdot\tan\gamma\cdot\tan i)^2\right].$$

On introduit un angle auxiliaire i' tel que

$$(q-1)\cdot\tan i' = q\cdot\tan i.$$

En utilisant cet angle, SM^2 peut s'écrire :

$$f(\gamma) = (q-1)^2\cdot\tan^2\gamma + (1 - q\cdot\tan\gamma\cdot\tan i)^2$$
$$= (q-1)^2\cdot\tan^2\gamma + (1 - (q-1)\cdot\tan\gamma\cdot\tan i')^2.$$

SM est minimum lorsque la dérivée $f'(\gamma)$ de $f(\gamma)$ est nulle, or

$$f'(\gamma) = 0 \Leftrightarrow (q-1)\cdot\tan\gamma = \sin i'\cdot\cos i'.$$

Ce qui correspond à

$$SM = \beta\cos i'.$$

Cette distance correspond à une observation vue du centre de la Terre (coordonnées géocentriques). En réalité, l'observation a lieu depuis la surface de la Terre avec les deux corps à l'horizon, la différence des latitudes Lune Soleil doit être diminuée de la différence des parallaxes horizontales π_L et π_S de la Lune et du Soleil

$$SM = \beta\cos i' - (\pi_L - \pi_S).$$

Il y a éclipse lorsque SM est inférieur à la somme des demi-diamètres apparents S_L et S_S de la Lune et du Soleil

$$\beta\cos i' - (\pi_L - \pi_S) < S_L - S_S$$

$$\beta < \frac{(\pi_L - \pi_S + S_L + S_S)}{\cos i'}.$$

Il suffit alors de remplacer dans cette relation les paramètres par leurs valeurs extrêmes pour en déduire les critères de la latitude. Ainsi la valeur inférieure β_{Min} est obtenue avec π_L, S_L, S_S minimales et π_S maximale tandis que la valeur supérieure β_{Max} est déterminée avec π_L, S_L, S_S maximales et π_S minimale.

Le tableau 7.I donne les valeurs extrêmes des paramètres, l'étude des séries, donnant l'orbite de la Lune montre qu'au voisinage de la nouvelle Lune (et de la pleine Lune) la valeur de l'inclinaison est maximale. Il convient donc de prendre $i \sim 5° 17'$ dans les relations ci-dessous.

Valeurs extrêmes et moyennes des paramètres			
	maximum	minimum	moyenne
q	16,2	10,9	13,5
$1/\cos i'$	1,005 2	1,004 3	1,004 72
Parallaxe lunaire π_L	61′ 27″	53′ 53″	57′ 2,7″
Parallaxe solaire π_S	8,96″	8,65″	8,80″
Demi-diamètre Lune S_L	16′ 45″	14′ 41″	15′ 32,58″
Demi-diamètre Soleil S_S	16′ 18″	15′ 46″	15′ 59,63″

Tableau 7.I. Valeurs extrêmes des paramètres.

Le critère en latitude peut se résumer de la façon suivante :

si $\beta > \beta_{Min}$ => pas d'éclipse
si $\beta_{Min} < \beta < \beta_{Max}$ => éclipse possible
si $\beta < \beta_{Max}$ => éclipse certaine.

Si l'on utilise les paramètres du tableau 7.I, on trouve β_{Max} = 1° 34′ 45,69″ et β_{Min} = 1° 24′ 37,31″ et une valeur moyenne β_m = 1° 28′ 51″ soit environ 1,48°.

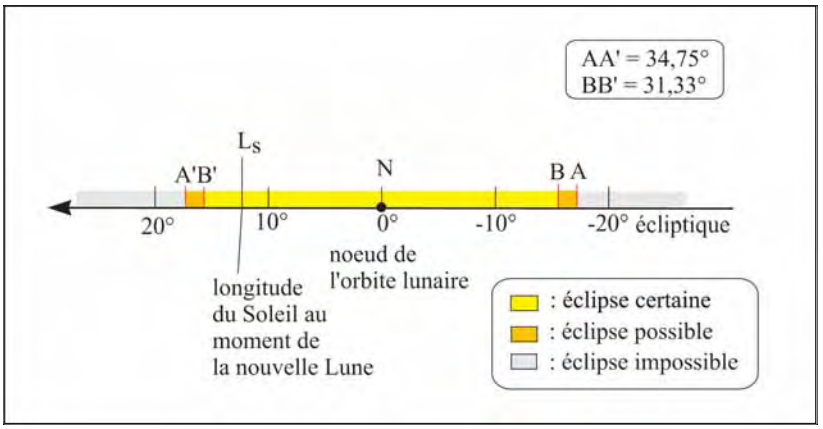
Le critère pour la centralité se calcule d'une manière analogue, il suffit de remplacer la somme des demi-diamètres apparents par la différence des demi-diamètres apparents dans la dernière équation. On obtient alors β_{Min} = 0° 52′ 55,47″ (soit environ 0,88°) et β_{Max} = 1° 3′ 14,98″ (soit environ 1,05°) et la valeur moyenne β_m = 0° 56′ 42,84″ (environ 0,95°). On remarquera que la valeur moyenne β_m n'est pas égale à la moyenne de β_{Min} et β_{Max} .

5. Critère en longitude

Le critère sur la latitude du centre de la Lune peut se traduire en un critère sur la longitude de la conjonction Lune-Soleil (donc la longitude) du Soleil par rapport au nœud de l'orbite lunaire. Ainsi, il y aura éclipse si au moment de la conjonction en longitude, la différence de longitude entre le nœud de l'orbite lunaire et la longitude du Soleil est inférieure à 15,665°, il n'y aura pas d'éclipse si cette différence est supérieure à 17,375°, et il y aura peut-être éclipse si elle est comprise entre ces deux

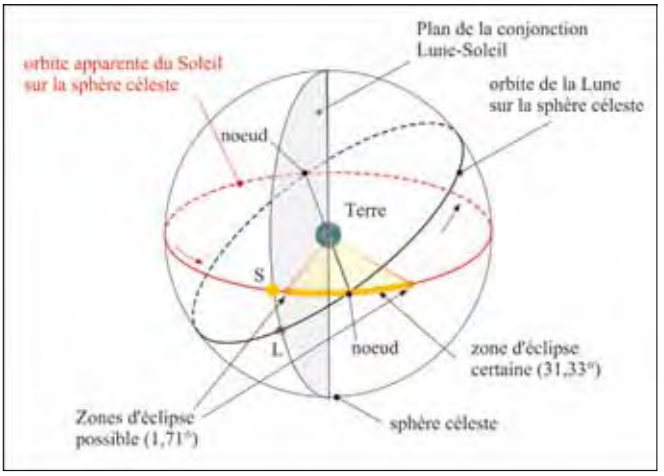
valeurs. Comme on le constate, le critère en longitude est beaucoup plus large en amplitude que le critère en latitude, cela s'explique par la faible valeur de l'inclinaison de l'orbite lunaire.

Critère en longitude pour les éclipses de Soleil (vu depuis le centre de la Terre).



La figure 7.4 représente le critère en longitude vu dans le repère géocentrique écliptique.

Figure 7.4. Critère en longitude pour les éclipses de Soleil (vu depuis l'espace).



6. Nombre d'éclipses à chaque saison d'éclipse

En étudiant la figure 7.5, on peut se poser la question suivante. Supposons que nous ayons une conjonction en longitude (1) juste avant

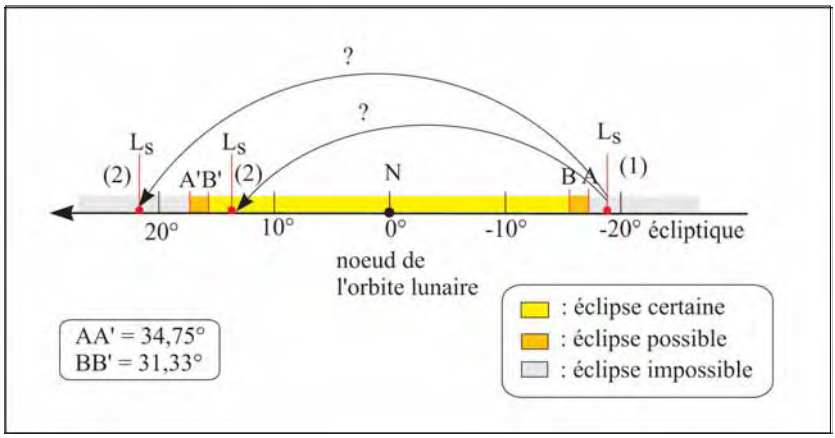


Figure 7.5. Critère en longitude pour les éclipses de Soleil (vu depuis le centre de la Terre).

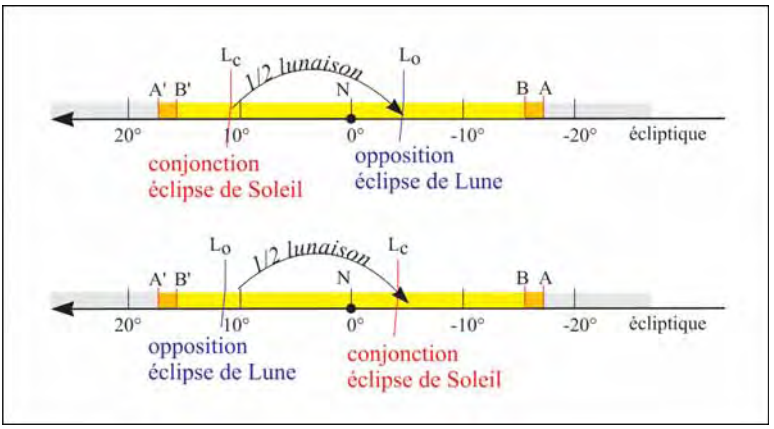
le point A, la conjonction suivante (2) va-t-elle être à l'intérieur ou à l'extérieur de l'arc BB' ? Pour répondre à cette question, on doit calculer de combien avance la longitude de la Terre (ou du soleil apparent) par rapport au nœud de l'orbite lunaire durant une révolution synodique de la Lune (une lunaison). On a vu que la Terre (ou le Soleil apparent) passe par le même nœud de l'orbite lunaire tous les 346,62 jours, donc la vitesse de la Terre par rapport à la ligne des nœuds est de 360°/346,64 jours = 1,038 6°/jour. Or la révolution synodique moyenne de la Lune est de 29,53 jours, donc entre deux conjonctions consécutives, la longitude de la Terre varie de 1,038 6 × 29,53 = 30,67°.
Or cette valeur est inférieure à la valeur de l'arc qui est égale à 31,33°. Donc à chaque passage de la Terre (ou du Soleil apparent) par un nœud de l'orbite lunaire, il y a obligatoirement une éclipse de Soleil au voisinage de la conjonction dont la longitude est la plus proche du nœud de l'orbite lunaire.

6.1. Au moins deux éclipses (Lune et Soleil)

Comme le critère en longitude est le même pour les éclipses de Lune, une demi-lunaison avant ou après la conjonction (nouvelle Lune), la Lune est en opposition (pleine Lune), et la Terre n'a parcouru que 15,335° en longitude par rapport au nœud. Ces 15,335° correspondent à l'écart angulaire entre une conjonction et une opposition. Donc si une conjonction se trouve dans l'arc BB', l'opposition suivante ou l'opposition précédente se trouve obligatoirement aussi sur cet arc et il y a une éclipse de Lune mais à l'autre nœud de l'orbite lunaire.

À chaque saison d'éclipse, il y obligatoirement deux éclipses, une éclipse de Soleil et une éclipse de Lune.

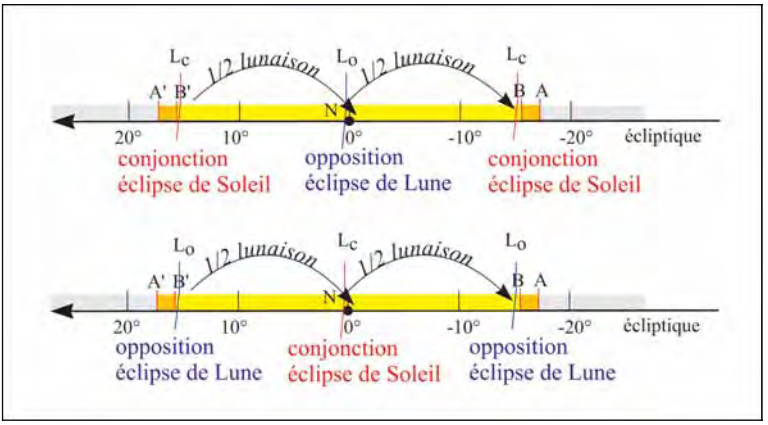
Conjonction et opposition au voisinage du nœud avec un doublet d'éclipses.



6.2. Au plus trois éclipses (Lune et Soleil)

La variation de longitude de la Terre par rapport à la ligne des nœuds durant une lunaison étant de 30,67° et l'arc BB' ayant une longueur de 31,33°, il est également possible d'avoir deux conjonctions contenues dans l'arc BB'. Dans ce cas, les conjonctions sont proches des extrémités de l'arc BB' et l'opposition comprise entre ces deux conjonctions est proche du nœud de l'orbite lunaire. De même, on peut avoir deux oppositions dans l'arc BB'. Dans ce cas, les oppositions sont proches des extrémités de l'arc BB' et la conjonction comprise entre ces deux oppositions se trouve proche du nœud de l'orbite lunaire. De plus, comme nous l'avons déjà signalé, les éclipses proches des extrémités de l'arc BB' donc loin du nœud sont des éclipses faibles, donc des éclipses partielles de Soleil ou des éclipses de Lune par la pénombre et les éclipses proches du nœud sont des éclipses fortes, donc des éclipses centrales de Soleil ou des éclipses totales de Lune.

Conjonction et opposition au voisinage du nœud avec un triplet d'éclipses.



On peut donc avoir une série de trois éclipses, au voisinage du passage de la Terre (ou du Soleil apparent) par un nœud de l'orbite lunaire. Dans ce cas on a soit une éclipse forte de Soleil (éclipse centrale) encadrée par deux éclipses faibles de Lune (éclipses par la pénombre) soit une éclipse forte de Lune (éclipse totale) encadrée par deux éclipses faibles de Soleil (éclipses partielles).

Nombre d'éclipses par an

Dans une année civile, on a au plus sept éclipses.

Une année civile du calendrier grégorien comporte 365 ou 366 jours. La lunaison moyenne est de 29,53 jours, une année lunaire de douze lunaisons a donc 354 jours, l'écart entre les deux années étant de 11 ou 12 jours. Durant ces jours, la demi-lunaison étant supérieure à 14 jours, il ne peut pas y avoir à la fois une conjonction et une opposition. Donc une année civile ne peut jamais avoir à la fois 13 conjonctions (nouvelles Lunes) et 13 oppositions (pleines Lunes). Une seule de ces deux conjonctures est possible et dans ce cas la première conjonction ou opposition a lieu dans les 11 (ou 12) premiers jours de janvier et la dernière conjonction ou opposition a lieu dans les 11 (ou 12) derniers jours de décembre. On a donc, au maximum, soit une année civile à 13 oppositions, soit une année civile à 13 conjonctions. La saison des éclipses est égale à 173,31 jours, donc tous les 173 jours, aux conjonctions et oppositions les plus proches de ces dates, il y a au moins deux éclipses (une de Soleil et une de Lune) et il y a au plus trois éclipses (deux de Lune et une de Soleil ou deux de Soleil et une de Lune).

Une année civile peut contenir au maximum deux saisons d'éclipses entières, soit trois passages de la Terre par un des nœuds de l'orbite lunaire, le premier étant en début d'année, le second en milieu d'année et le dernier en fin d'année. À chacun de ces passages, on peut associer un couple ou un triplet d'éclipses. Mais l'on n'a jamais un triplet d'éclipses complet en début et en fin d'année, et dans le cas ou l'on a deux triplets complets à deux passages consécutifs le troisième passage ne comporte qu'une éclipse dans l'année en cours, car s'il présentait deux éclipses dans l'année en cours, il y aurait 13 oppositions et 13 conjonctions dans l'année, chose impossible. Donc dans une année civile, on a au maximum sept éclipses. La figure 7.6 regroupe toutes les combinaisons possibles. On remarque sur la figure 7.6 que les triplets d'éclipses qui se suivent à six lunaisons d'intervalle ont la même composition. En effet, comme on l'a déjà signalé, dans chaque triplet, l'éclipse médiane se produit très près du nœud, or l'éclipse médiane du triplet suivant sera forcément une éclipse du même corps, la conjonction ou l'opposition n'ayant avancé que de 4° environ. De plus, lorsque l'on a sept éclipses par an, la première et la dernière éclipses

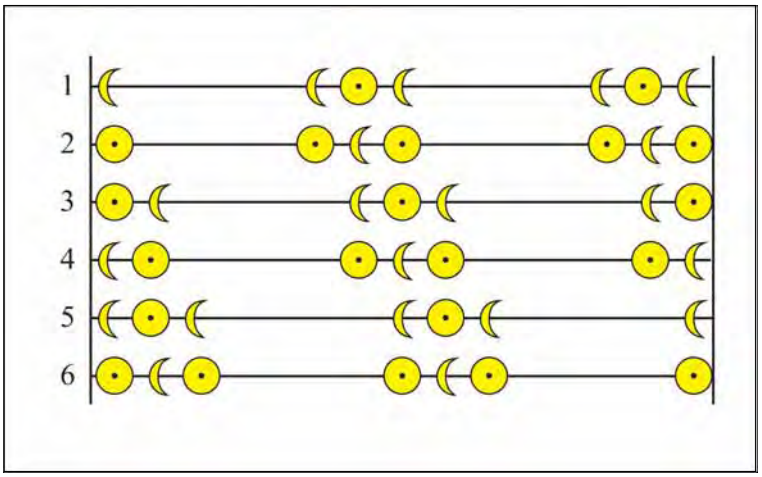


Figure 7.6. Liste des combinaisons possibles de 7 éclipses dans une année civile.

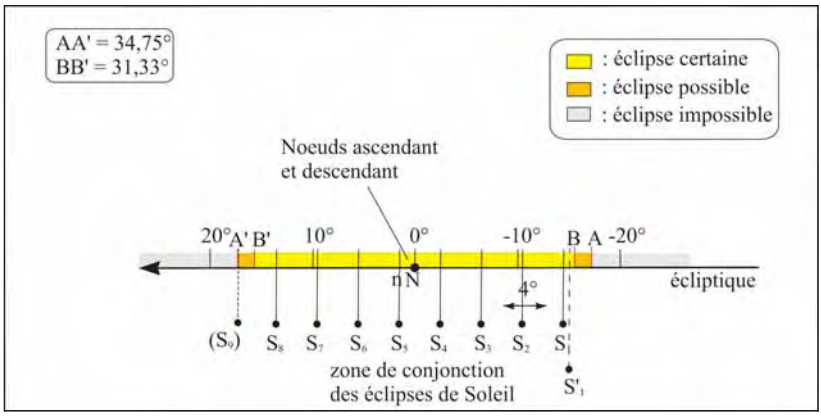
sont des éclipses du même corps, la première ayant toujours lieu dans les 11 (ou 12) premiers jours de janvier et la dernière ayant toujours lieu dans les 11 (ou 12) derniers jours de décembre.

En conclusion le nombre maximal d'éclipses dans une année civile est de sept éclipses, avec obligatoirement deux éclipses de Soleil et deux éclipses de Lune, pour les trois autres toutes les combinaisons sont possibles. Le nombre minimal d'éclipses dans une année est de quatre, avec obligatoirement deux éclipses de Lune et deux éclipses de Soleil.

7. Les séries courtes d'éclipses

Nous allons nous intéresser à l'évolution des éclipses au cours du temps. Supposons que nous ayons une éclipse de Soleil à une date donnée, comment sera l'éclipse suivante ?

Généralement les éclipses successives de Soleil sont séparées par six lunaisons (liées à une saison d'éclipses), donc il y a alternance de nœud lunaire (nœud ascendant et nœud descendant). Nous avons vu que durant une lunaison, la Terre (ou le Soleil apparent) progressait en moyenne de 30,67° en longitude par rapport à la ligne des nœuds de l'orbite lunaire. Au bout de six lunaisons, la Terre (ou le Soleil apparent) progresse donc de $6 \times 30{,}67° = 184{,}02°$. Si dl_1 est la différence de longitude entre la conjonction et le nœud de l'orbite lunaire pour la première éclipse, l'éclipse suivante a lieu au nœud suivant et la différence dl_2 entre la conjonction et ce nœud est égale à $dl_1 - (184{,}02° - 180°) = dl_1 - 4{,}02°$. Ainsi la conjonction se déplace par rapport aux



Série courte d'éclipse (vue depuis la Terre).

nœuds successifs d'environ 4° dans le sens direct d'une éclipse à la suivante.

Les éclipses de la suite courte S_1 à S_8 ont lieu à chaque saison d'éclipse, alternativement au nœud ascendant puis au nœud descendant. Il y a toujours au moins 8 éclipses dans la suite car l'arc BB' contient 7 arcs de 4°. Il peut éventuellement y avoir une neuvième éclipse S_9 (dans l'arc A'B'). Dans ce cas, cette éclipse est la dernière éclipse d'un triplet d'éclipses : Soleil-Lune-Soleil. La conjonction correspondant à la première éclipse du triplet a lieu une lunaison plus tôt et se trouve 30,67° en amont et cette éclipse est la première éclipse de la série courte suivante ; nous avons donc un décrochage dans la suite des séries, la série suivante commençant avant que la série en cours ne soit terminée. Ce phénomène peut également se produire lorsque la huitième éclipse de la série est très proche du point B'. On peut donc conclure que les éclipses des suites courtes sont séparées par six lunaisons et que la première éclipse d'une suite courte est séparée de la dernière éclipse de suite courte précédente par cinq lunaisons ou par une lunaison dans le cas d'un décrochage.

On remarque que les conjonctions liées aux éclipses d'une série courte parcourent l'arc BB' dans le sens direct avec un pas moyen de 4°, les premières et les dernières éclipses étant des éclipses faibles (éclipses partielles ou éclipses centrales de faible magnitude) et les éclipses du milieu de la série, proches des nœuds, des éclipses fortes (éclipses centrales). On rappelle que les types des éclipses centrales : annulaire, totale ou mixte ne dépendent pas de la distance entre la conjonction et le nœud mais des diamètres apparents de corps liés aux positions orbitales de la Lune et du Soleil.

Attention, il ne faut jamais oublier que ces calculs sont faits à l'aide des révolutions moyennes de la Lune, la réalité est toujours un peu

différente, l'avance de la conjonction n'est donc jamais exactement égale à 4° mais varie autour de cette valeur moyenne. On consultera les diagrammes et les remarques de l'annexe A pour avoir des exemples supplémentaires.

8. Répartition des éclipses sur une période de 22 ans

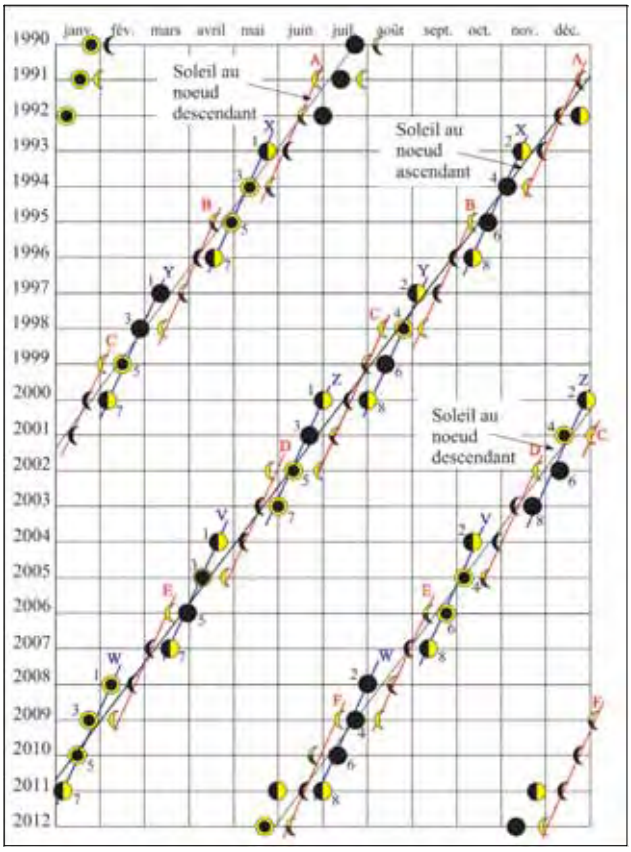


Figure 7.7. Éclipses de Lune et de Soleil entre 1990 et 2012.

Sur le diagramme de la figure 7.7, nous avons fait figurer l'ensemble des éclipses de Lune et de Soleil comprises entre l'an 1990 et l'an 2012. Les éclipses sur ce diagramme sont représentées de la manière suivante :

Éclipses de Soleil : = mixte; = totale; = annulaire; = partielle.

Éclipses de Lune : = totale; = partielle; = par la pénombre.

On remarque que les éclipses ont bien lieu aux voisinages des passages du Soleil dans la direction des nœuds ascendant et descendant de l'orbite lunaire. De même, on constate qu'à chaque saison d'éclipse on a un doublet d'éclipses Lune-Soleil ou un triplet d'éclipses Lune-Soleil-Lune (1991) ou Soleil-Lune-Soleil (2000) et que dans le cas des triplets les éclipses en première et dernière positions sont faibles et que l'éclipse médiane est forte. On observe que les éclipses de Soleil ou de Lune de début et de fin de séries courtes sont séparées par une ou cinq lunaisons. On vérifie également qu'il y a toujours au moins quatre éclipses par an. Sur la période de temps représentée, il n'y a pas d'années à 7 éclipses, mais une année à 6 éclipses (2000).

La démonstration de l'existence des séries courtes de Soleil est également valable pour des séries courtes d'éclipses de Lune. Il suffit de remplacer la conjonction par l'opposition. Sur notre diagramme, nous avons fait figurer les séries courtes de Soleil (en bleu) et les séries courtes de Lune (en rouge). On constate que les traits joignant les éclipses d'une même série pour chaque nœud sont parallèles et coupent les lignes des nœuds. Sur la période considérée, il n'y a pas de série courte à 9 éclipses. Pourtant, on peut observer plusieurs décrochages de séries courtes, par exemple la série courte de Soleil *Z* débute avant que la série Y ne soit terminée (triplet d'éclipses de l'an 2000).

8

Canons et grandeurs des éclipses de Soleil

1. Les canons d'éclipses de Soleil

Les listes d'éclipses de Lune et de Soleil sont publiées dans des livres appelés *canons d'éclipses*. Le plus connu est celui de Theodor Ritter von Oppolzer, sa première édition date de 1887 dans le volume 52 des *Mémoires de Mathématiques et de Sciences Naturelles de l'Académie Impériale de Vienne*. Ce canon, corrigé, est réédité régulièrement par *Dover Publications*. Dans ce canon, on trouve 8 000 éclipses de Soleil comprises entre –1207 et 2161 et 5 200 éclipses de Lune comprises entre –1206 et 2132. Il faut préciser que l'on n'y trouve pas les éclipses de Lune par la pénombre.

Il convient de citer également le canon des éclipses de Soleil de Jean Meeus et Hermann Mucke (1983, *Astronomisches Büro*, Vienne), contenant toutes les éclipses de Soleil comprises entre –2003 et +2526.

À l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémerides (IMCCE), nous avons construit un canon d'éclipses de Lune et de Soleil. Il porte sur une période de 6000 ans (de l'an –2999 à 3000), il a été construit avec les dernières théories planétaire et lunaire élaborées à l'IMCCE.

Ces trois canons ont été construits avec des théories différentes des corps célestes et avec des constantes légèrement différentes. Cela implique que certaines éclipses limites ne sont pas identiques (apparition de nouvelles éclipses limites, ou éclipses totales dans un canon qui deviennent mixtes dans l'autre).

2. Le canon d'éclipses de Soleil de l'IMCCE

2.1. Les théories utilisées

Pour construire notre canon, nous avons utilisé les théories suivantes :

- Théorie de la Lune : ELP2000 de Michèle Chapront-Touzé et J. Chapront.
- Théorie du barycentre Terre-Lune : VSOP82 de P. Bretagnon.
- Éphémérides sous forme de polynômes de Tchebycheff : SLP98 de G. Francou.
- TT-TU : valeurs de R. Stephenson (1984) modifiées et adaptées à la théorie de la Lune utilisée.
- Théorie de la précession de Lieske (1977).
- Théorie de la nutation de Wahr (1981).
- Temps sidéral d'Aoki (1982).

2.2. Les paramètres physiques

Les paramètres physiques utilisés sont les suivants :

- Le demi-diamètre solaire = 15' 59,63''.
- Le rapport du rayon lunaire sur le rayon équatorial terrestre : k = 0,272 507 6.
- Le rayon équatorial terrestre = 6 378 140 m.
- Le carré de l'ellipticité de l'ellipsoïde terrestre = 0,006 694 38 1/f = 1/298,257 : IERS (1992).

2.3. Les résultats

Nous avons trouvé sur cette période de 6000 ans, 14 155 éclipses de Soleil qui se répartissent de la manière suivante :

9 100 éclipses centrales comprenant :

- 4 651 éclipses annulaires ;
- 3 836 éclipses totales ;
- 613 éclipses mixtes.

4 944 éclipses partielles ;

111 éclipses non centrales comprenant :

- 83 éclipses non centrales annulaires ;
- 28 éclipses non centrales totales.

Comme on l'a prédit dans le chapitre 7, on constate qu'il y a bien plus d'éclipses annulaires que d'éclipses totales.

3. Les éclipses totales les plus longues

Une éclipse totale a une durée maximale lorsque

- l'ombre est la plus grande possible (c'est-à-dire lorsque la Terre est à l'aphélie pour avoir le plus petit diamètre apparent du Soleil),

- la Lune est au périgée pour avoir le plus gros diamètre apparent de la Lune,

- le maximum a lieu au zénith du lieu d'observation pour avoir une distance observateur–Lune minimale, donc un diamètre de l'ombre maximal.

La première condition fixe la date de l'éclipse (actuellement début juillet). La troisième condition fixe le lieu d'observation proche du tropique du Cancer (latitude 23°). Avec la Lune au périgée, la vitesse synodique de l'ombre par rapport à la Terre est de 3 733 km/h (1 037 m/s) et la vitesse de l'ombre sur la surface de la Terre est de 2 196 km/h (610 m/s), le diamètre de l'ombre est alors de 262 km et la durée de l'éclipse est de 7 min 10 s. En réalité, ces paramètres ne sont pas indépendants et l'on s'aperçoit, en faisant un calcul plus rigoureux, que si l'on descend en latitude vers +5° la durée de l'éclipse croît jusqu'à environ 7 min 30 s. En effet, le diamètre de l'ombre va décroître

(on n'est plus au zénith, l'ombre devient ovale) mais sa vitesse décroît encore plus rapidement ce qui en fin de compte augmente sensiblement la durée de l'éclipse. Le tableau 8.I porte sur l'ensemble des éclipses totales comprises entre l'an –2999 et +3000 issues du canon d'éclipses de Soleil de l'IMCCE.

Tableau 8.I. Les éclipses totales les plus longues.

Liste des éclipses totales d'une durée supérieure à 7 minutes et 10 secondes					
Date	Durée	Date	Durée	Date	Durée
29 mai –2584	7 min 17,00 s	10 juin –2566	7 min 23,76 s	20 juin –2548	7 min 19,94 s
25 avril –2266	7 min 10,49 s	05 avril –2248	7 min 23,37 s	16 avril –2230	7 min 27,25 s
27 mai –2212	7 min 21,11 s	08 juin –1106	7 min 10,61 s	24 mai –779	7 min 13,45 s
05 juin –761	7 min 28,61 s	15 juin –743	7 min 31,73 s	26 juin –725	7 min 23,45 s
11 mai –425	7 min 16,51 s	22/05/ –407	7 min 18,11 s	02 juin –389	7 min 10,01 s
22 mai 114	7 min 10,41 s	01 juin 132	7 min 19,50 s	12 juin 150	7 min 17,99 s
16 juin 345	7 min 21,13 s	27 juin 363	7 min 28,42 s	08 juillet 381	7 min 26,87 s
19 juillet 399	7 min 15,75 s	23 mai 681	7 min 14,32 s	03 juin 699	7 min 21,62 s
13 juin 717	7 min 20,47 s	29 mai 1044	7 min 16,79 s	09 juillet 1062	7 min 25,27 s
20 juin 1080	7 min 22,83 s	01 juillet 1098	7 min 10,21 s	20 juin 1955	7 min 12,62 s
25 juin 2150	7 min 18,77 s	05 juillet 2168	7 min 30,89 s	16 juillet 2186	7 min 34,14 s
27 juillet 2204	7 min 26,93 s	08 août 2222	7 min 10,39 s	14 juin 2504	7 min 15,03 s
25 juin 2522	7 min 17,54 s	23 juin 2867	7 min 14,67 s	03 juillet 2885	7 min 15,80 s

On constate que l'éclipse la plus longue sera celle du 16 juillet 2186 pour une durée de 7 min 34,14 s, valeur légèrement supérieure à celle calculée avec les valeurs moyennes.

4. Les éclipses annulaires les plus longues

Dans le cas d'éclipses annulaires, le raisonnement est similaire aux éclipses totales, mais inverse. Le diamètre apparent du Soleil doit être le plus grand possible donc la Terre doit être au périhélie et le diamètre apparent de la Lune doit être le plus petit possible donc la Lune doit être à l'apogée. Dans ce cas, la durée maximale de l'éclipse peut atteindre 12 min 30 s. Le tableau 8.II porte sur l'ensemble des éclipses annulaires comprises entre l'an –2999 et +3000 issues du canon d'éclipses de Soleil de l'IMCCE .

Tableau 8.II. Les éclipses annulaires les plus longues.

Liste des éclipses annulaires d'une durée supérieure à 11 minutes 50 secondes			
Date	Durée	Date	Durée
12 décembre –1655	11 min 53,93 s	10 décembre –195	11 min 57,93 s
22 décembre –177	12 min 01,43 s	25 novembre 132	12 min 08,01 s
06 décembre 150	12 min 15,91 s	17 décembre 168	12 min 07,25 s
25 décembre 1628	11 min 55,47 s	02 décembre 1937	11 min 53,63 s
14 décembre 1955	12 min 02,49 s	24 décembre 1973	11 min 55,75 s

5. Les éclipses partielles les plus petites

À l'aide du canon d'éclipses de Soleil de l'IMCCE, nous avons cherché quelles sont les éclipses partielles les plus petites sur la période –2999-3000. Nous avons trouvé les deux éclipses suivantes :

Les éclipses partielles les plus courtes.

Date	Magnitude	Instant du maximum	Durée générale
23 juillet 651	0,0008272	08 h 30 min 41,06 s UTC	9,3 min
17 août 1327	0,0004937	16 h 58 min 33,03 s UTC	6,2 min

5.1. L'éclipse de 651

Éphémérides de la Lune au voisinage de l'éclipse :

- Le 15/07/651 à 07 h 31 min 28 s UTC : dernier quartier.
- Le 22/07/651 à 01 h 25 min 11 s UTC : la Lune passe par le nœud descendant de son orbite.
- Le 22/07/651 à 14 h 50 min 11 s UTC : la Lune à l'apogée, d = 406 450 km, diamètre apparent = 29,5'.
- Le 23/07/651 à 08 h 30 min 41 s UTC : maximum de l'éclipse.
- Le 23/07/651 à 08 h 47 min 30 s UTC : nouvelle Lune.

On constate que cette éclipse a lieu après le passage au nœud descendant de l'orbite lunaire. Comme l'éclipse est très faible, le passage au nœud doit être loin de la conjonction et l'instant du maximum de l'éclipse loin de l'instant de la conjonction. C'est effectivement le cas, on a un écart de temps égal à 16 min 49 s entre la conjonction et le maximum de l'éclipse et on a également un écart de temps maximal égal à 31 h 22 min 19 s entre la conjonction et le passage au nœud. Ces valeurs sont presque des valeurs extrêmes car la Lune est voisine de son apogée et la Terre est proche de son aphélie, donc la Lune et le Soleil se déplacent lentement. On remarque que, comme nous l'avons expliqué précédemment, le maximum de l'éclipse (distance minimale entre le centre de la Lune et le centre du Soleil) a bien lieu entre le passage au nœud et la conjonction.

5.2. L'éclipse de 1327

Éphémérides de la Lune au voisinage de l'éclipse :

- Le 14/08/1327 à 15 h 01 min 55 s UTC : la Lune au périgée d = 365 783 km, diamètre apparent = 32,7'.
- Le 17/08/1327 à 16 h 43 min 04 s UTC : nouvelle Lune.
- Le 17/08/1327 à 16 h 58 min 33 s UTC : maximum de l'éclipse.
- Le 18/08/1327 à 21 h 34 min 46 s UTC : la Lune passe par le nœud ascendant de son orbite.
- Le 25/08/1327 à 06 h 20 min 50 s UTC : premier quartier.
- Le 26/08/1327 à 12 h 15 min 12 s UTC : la Lune à l'apogée d = 404 381 km, diamètre apparent = 29,6'.

Cette éclipse a lieu avant le passage au nœud ascendant, on a donc le scénario suivant : conjonction, maximum de l'éclipse et passage au nœud. L'écart de temps entre la conjonction et le maximum de l'éclipse est de 15 min 29 s et l'écart de temps entre la conjonction et le passage au nœud est de 28 h 36 min 13 s.

Pour ces deux éclipses, qui sont des cas extrêmes, on voit que le maximum de l'éclipse est relativement proche de la conjonction. En revanche la conjonction est très éloignée du passage au nœud (plus d'une journée).

Bibliographie

Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82, P. Bretagnon, *Astron. Astrophys*. **144**, 278-288, 1982.

Planetary Theories in Rectangular and Spherical Variables VSOP87 Solution, P. Bretagnon et G. Francou, *Astron. Astrophys.* **202**, 309-315, 1988.

The lunar ephemeris ELP2000, M. Chapront-Touzé et J. Chapront, *Astron. Astrophys.* **124**, 50, 1983.

ELP 2000-85 a semi-analytical lunar ephemeris adequate for historical times, *Astron. Astrophys.* **190**, 342, 1988.

Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants, J.H. Lieske & al., *Astron. Astrophys.* **73**, 282-284, 1977.

The Forced Nutations of an Elliptical, Rotating, Elastic, and Oceanless Earth, J.M. Wahr, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* **64**, 705-727, 1981.

The new definition of Universal Time, S. Aoki & al., *Astron. Astrophys.* **105**, 359, 1982.

Canon of Eclipses, T.R. von Oppolzer, Dover publication, 1962.

Canon of Solar Eclipses, J. Meeus, C.C. Grosjean et W. Vanderleen, Pergamon Press, 1966.

Canon of Solar Eclipses –2003 to +2526, J. Meeus and H. Mucke, Astronomisches Büro, Wien, 1983.

9

Les éclipses récentes et futures de Soleil

1. Les éclipses totales entre 1998 et 2020

La carte de la figure 9.1 donne les bandes de totalité des éclipses totales de Soleil entre l'an 1998 et l'an 2020. On remarquera la très grande dispersion des courbes à la surface terrestre. On notera la largeur des bandes de totalité des éclipses proches des pôles et l'étroitesse de la bande de totalité de l'éclipse mixte.

2. Les éclipse annulaires entre 1998 et 2020

La carte de la figure 9.2 donne les bandes de centralité des éclipses annulaires de Soleil entre l'an 1998 et l'an 2020. On remarquera la très grande dispersion des courbes à la surface terrestre.

3. Fréquence des éclipses centrales de Soleil en France

Vu la faible surface traversée par la bande de centralité, les éclipses visibles sur un territoire ayant la superficie de la France sont peu

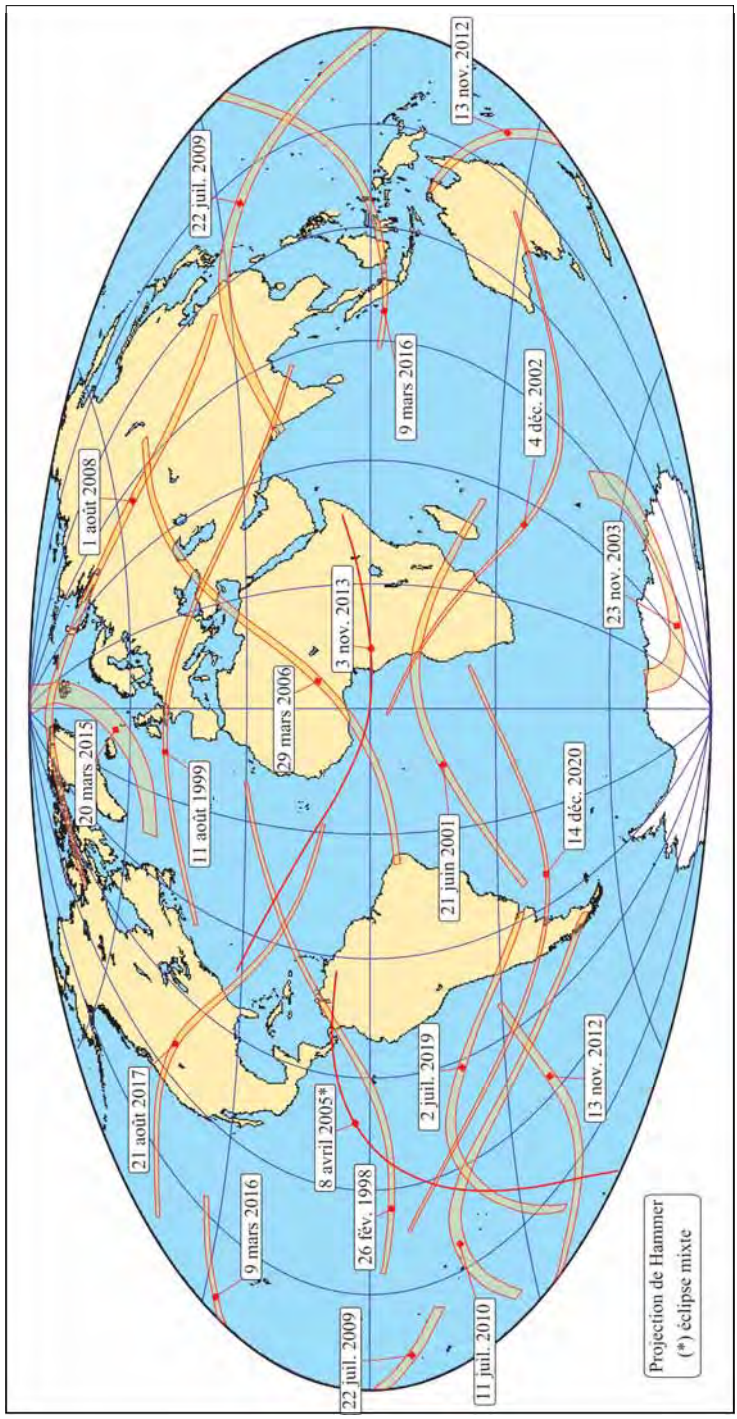


Figure 9.1. Lignes de centralité des éclipses totales de 1998 à 2020.

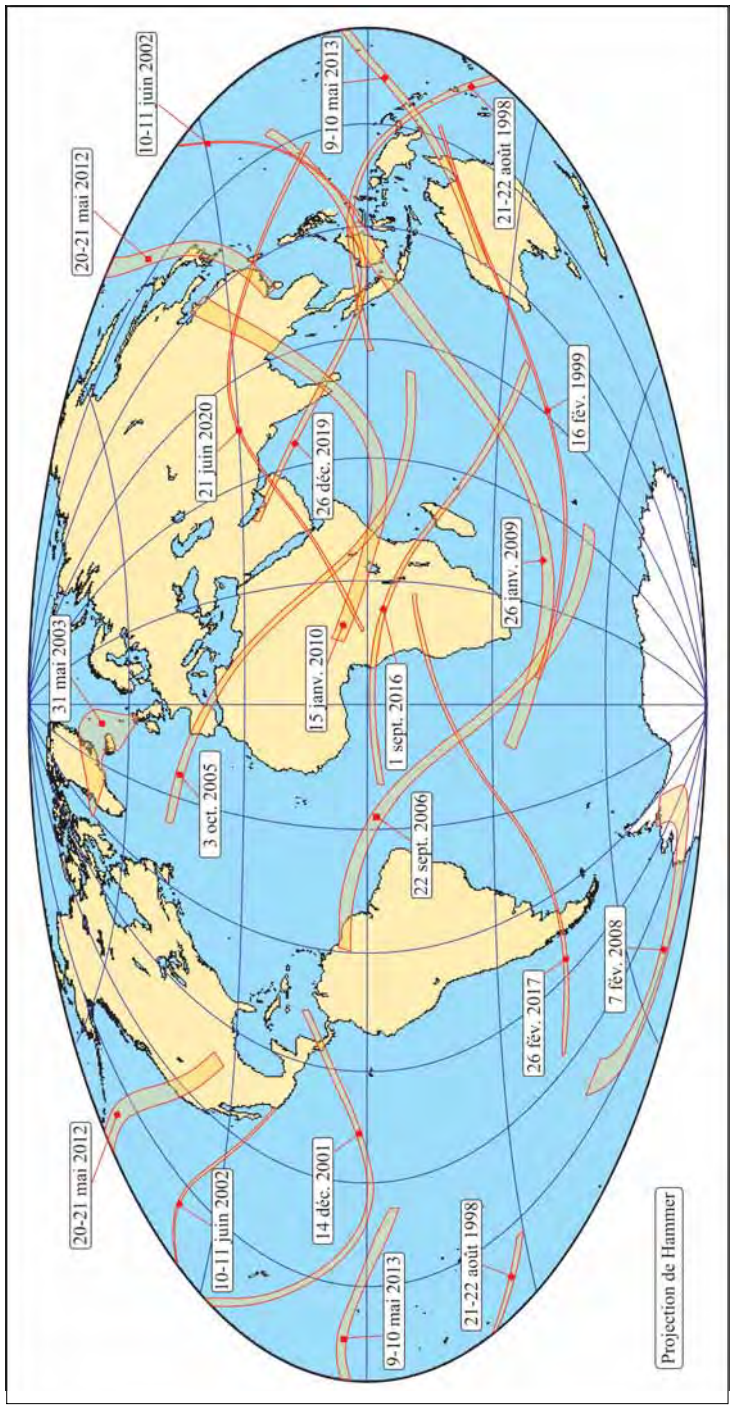


Figure 9.2. Lignes de centralité des éclipses annulaires de 1998 à 2020.

nombreuses et si on se limite à une ville où une région, elles deviennent exceptionnelles. Le tableau 9.I donne la liste des éclipses dont la bande de centralité traverse la France, il porte sur toutes les éclipses centrales allant du début du XVI^{e} siècle jusqu'à la fin du XXI^{e} siècle.

Tableau 9.I. Éclipses centrales visibles en France.

Date	Éclipses	Remarques
24 janvier 1544	totale*	visible dans le sud-est de la France
12 octobre 1605	totale	visible dans le sud-ouest de la France
10 juin 1630	totale*	fin de l'éclipse visible de l'ouest au sud-est de la France
27 janvier 1683	annulaire	fin de l'éclipse visible à l'ouest et au centre de la France
12 mai 1706	totale	visible dans le sud-est de la France
22 mai 1724	totale	visible du nord-ouest au nord-est de la France visible à Paris
1er avril 1764	annulaire	visible dans le nord de la France visible à Paris
7 septembre 1820	annulaire	visible dans le nord-est de la France invisible à Paris
8 juillet 1842	totale	visible dans le sud-est de la France
9 octobre 1847	annulaire	visible du nord-ouest au centre-est de la France
17 avril 1912	mixte	visible de l'ouest au nord-est de la France visible au nord de Paris (éclipse perlée)
15 février 1961	totale	visible dans le sud de la France
11 août 1999	totale	visible dans le nord de la France d'ouest en est
5 novembre 2059	annulaire	visible dans le sud-ouest de la France
13 juillet 2075	annulaire	visible en Corse et dans l'extrême sud-est de la France
3 septembre 2081	totale	visible dans le centre de la France
27 février 2082	annulaire	visible dans le sud de la France
23 septembre 2090	totale	fin de l'éclipse visible dans le nord-ouest de la France

(*) Ces deux éclipses sont données comme mixtes dans le canon de Meeus et comme totales dans le canon d'Oppolzer.

Remarque

Quelques auteurs citent, à tort, l'éclipse du 12 août 2026 comme visible en France. Camille Flammarion la donne visible à Paris (1880,

L'Astronomie Populaire). Paul Couderc la dit visible sur une ligne allant de Bordeaux à Toulouse (1971, *Les éclipses*). En réalité, la phase de totalité de cette éclipse ne sera pas visible en France mais au nord de l'Espagne.

4. Éclipses de Soleil du XVI^{e} au XXI^{e} siècle

4.1. Éclipses des XVI^{e}, XVII^{e} et XVIII^{e} siècles, visibles en France

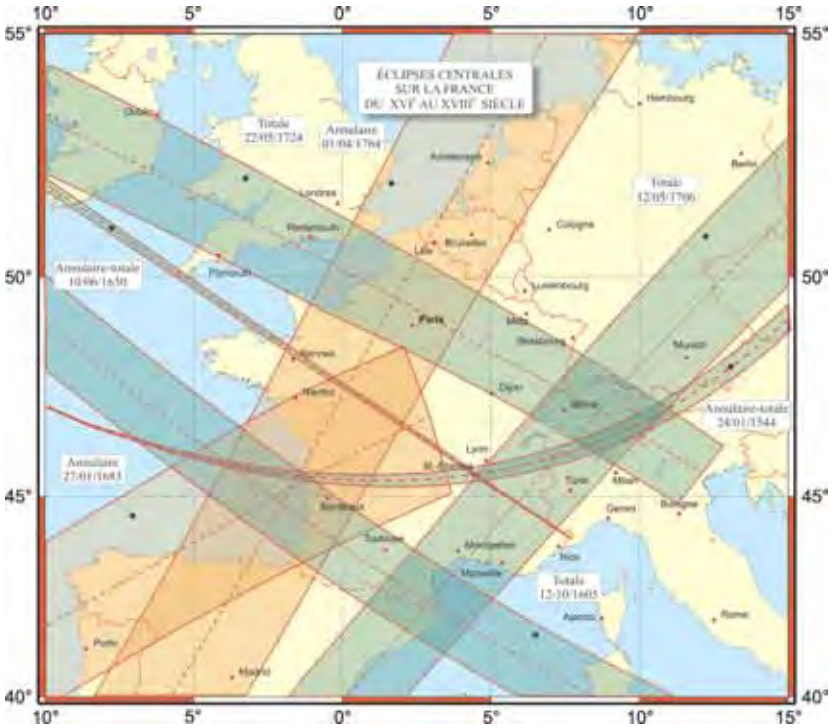


Figure 9.3. Éclipses centrales en France aux XVI, XVII et XVIII^{e} siècles.

La carte de la figure 9.3 donne les lignes de centralité des éclipses centrales (totales, annulaires ou mixtes) visibles sur la France. On notera la grande diversité de largeur des bandes de centralité.

Sur cette carte et sur les cartes suivantes, les bandes de centralité des éclipses totales et des éclipses mixtes sont en vert et les bandes de centralité des éclipses annulaires sont en orange.

4.2. Éclipses des XIX^{e} et XX^{e} siècles visibles en France

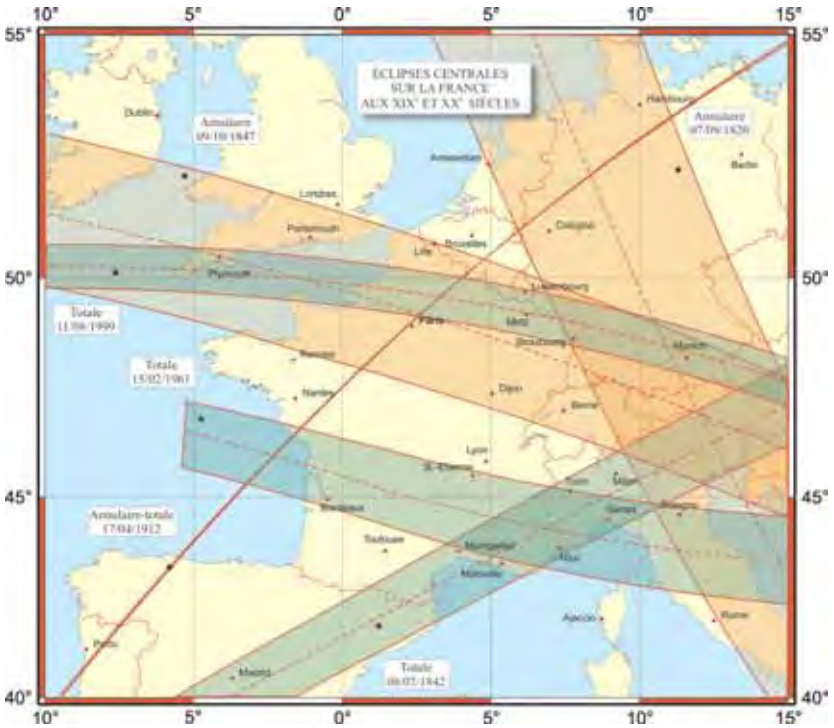


Figure 9.4. Éclipses centrales en France aux XIX et XX^{e} siècles.

La carte de la figure 9.4 donne les lignes de centralité des éclipses centrales (totales, annulaires ou mixtes) visibles sur la France. L'éclipse de 1912 est une éclipse mixte, elle a été observée au nord de Paris (Saint-Germain en Laye), on notera l'étroitesse de sa ligne de centralité. On remarquera également que les trajectoires des lignes de centralité présentent des orientations très variées par rapport aux méridiens et aux parallèles terrestres et qu'elles sont loin d'être parallèles à l'équateur terrestre.

4.3. Éclipses du XXI^{e} siècle visibles en France

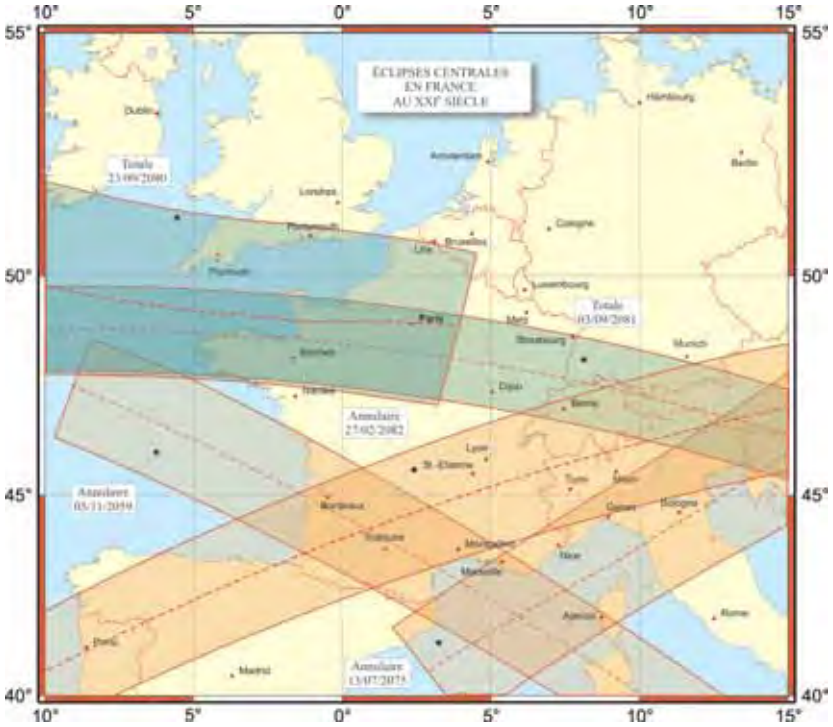
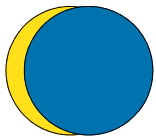


Figure 9.5. Éclipses centrales en France au XXI^{e} siècle.

La carte de la figure 9.5 donne les lignes de centralité des éclipses centrales (totales et annulaires) visibles sur la France.

10 

Les périodes de récurrence des éclipses

1. Les périodes de récurrence

Nous avons vu que les éclipses de Soleil et de Lune se produisent lorsque les syzygies (la conjonction et l'opposition de la Lune) ont lieu avec le Soleil apparent au voisinage de la direction de la ligne des nœuds de l'orbite lunaire. Le retour d'une même phase lunaire est lié à la révolution synodique « L » (29,530 588 853 2 jours) de la Lune. Le retour du Soleil dans la direction de la ligne des nœuds au moment des syzygies est équivalent au retour de la Lune près de ses nœuds, ce retour est lié à la révolution draconitique « G » (27,212 220 817 jours) de la Lune. Une période de récurrence des éclipses doit donc être un multiple commun à ces deux périodes.
On doit donc déterminer deux nombres x et y tel que $x.G = y.L$ ou encore tel que $x/y = L/G$.

Les valeurs possibles pour x et y se calculent en utilisant la méthode de décomposition des réels en fractions continues.

Le rapport L/G étant égal à 1,085 195 841, il s'écrit sous forme de réduite : (1;11,1,2,1,4,3,5,1), ce qui donne pour x et y les solutions suivantes :

x	1	12	13	38	51	242	777	4127
y	1	11	12	35	47	223	716	3803

Le cycle correspondant à la solution 242/223, soit 223 lunaisons, est connu à tort sous le nom de **saros**. 223 lunaisons sont égales à 6 585,321 314 jours et 242 révolutions draconitiques sont égales à 6 585,357 436 jours, la différence $242L - 223L$ est de 0,03612 jour, soit 52 minutes.

On exprime parfois cette période en années et en jours, mais cela n'est pas recommandé, car 6 585 jours donnent 18 ans, plus 10 ou 11 ou 12 jours, cela dépend du nombre d'années bissextiles comprises dans les 18 années (5,4 ou 3) et il est préférable de garder cette expression en jours.

1.1. Pourquoi le saros est-il une période de récurrence ?

La principale inégalité dans la longitude de la Lune, l'équation du centre, est fonction de sa distance angulaire au périgée de son orbite : cette distance angulaire porte le nom d'anomalie. L'intervalle de temps qui sépare en moyenne le passage de la Lune par la direction de son périgée s'appelle la révolution anomalistique. Sa valeur moyenne est A = 27,554 549 878 jours. Il est très important de constater que le saros est également un multiple de cette révolution anomalistique, ainsi après un saros, non seulement on retrouve la même configuration Soleil-Terre-Lune mais la plus grosse inégalité dans la longitude de la Lune a presque la même valeur, donc on retrouve pratiquement le même écart entre la Lune vraie et la Lune moyenne. C'est principalement pour cette raison que le saros est une période de récurrence des éclipses. En effet, le saros est construit à partir des révolutions synodique et draconitique moyennes de la Lune. Or l'écart entre la révolution synodique vraie et la révolution synodique moyenne de la Lune peut atteindre plus ou moins sept heures, et en sept heures la position de la Lune varie en moyenne de 3,5° en longitude (si l'on tient compte des perturbations, cet écart peut atteindre 7,5°). Comme les diamètres apparents de la Lune et du Soleil sont de l'ordre du demi-degré, il est totalement impossible de prédire une éclipse du Soleil uniquement avec la connaissance de la révolution synodique moyenne, seule la connaissance de la lunaison vraie permet cette prédiction. Donc si une période de récurrence utilise les

révolutions synodique et draconitique moyennes, il faut également que cette période ramène la Lune vraie au même endroit par rapport à la Lune moyenne, donc que la période de récurrence soit aussi un multiple de la période de la plus grosse inégalité dans la longitude de la Lune.
On a 239 A = 6 585,537 419 jours et 1 saros = 239 A – 0,007 9 A. Au bout d'un saros, la Lune se retrouve donc à 2,8° en amont sur sa position orbitale.

Le saros ramène également le Soleil près des nœuds, il doit donc être aussi un multiple de l'année des éclipses E (346,62 jours) et l'on a bien 19 E = 6 585,78 jours, l'écart avec le saros n'étant que de 0,46 jour. Cette condition, moins stricte que le retour de la Lune à son nœud, entraîne une légère évolution des éclipses d'un saros à l'autre.

Les inégalités dans le mouvement du Soleil apparent sont également fonction de sa position angulaire par rapport à son périgée (périhélie de la Terre), cet angle porte le nom d'anomalie. La période de révolution qui ramène le Soleil apparent à son périgée (ou la Terre à son périhélie), s'appelle révolution anomalistique ou année anomalistique et elle est égale à a = 365,259 6 jours.

On a 18 a = 6 574,67 jours et l'écart avec le saros est de 10,65 jours, donc au bout d'un saros le Soleil apparent ne s'est déplacé que de 10° sur son orbite par rapport à sa position un saros plus tôt, ce qui correspond à un décalage de 10° vers l'est parmi les constellations zodiacales.

2. La décomposition d'un réel en fractions continues

La décomposition d'un réel en fractions continues a été créée par P.S. Laplace en 1768, son but était d'obtenir une approximation d'un réel positif r sous la forme d'un quotient de deux entiers. La méthode consiste à décomposer le réel en partie entière et en partie décimale :

$$r = a_0 + u_1,$$

u_1 étant inférieur à 1, on prend son inverse et on continue comme précédemment en itérant avec les restes successifs :

$$\frac{1}{u_1} = a_1 + u_2$$

$$\frac{1}{u_n} = a_n + u_{n+1}.$$

En remplaçant les u_i par leurs expressions, le réel se présente sous la forme de fractions emboîtées qui forme la fraction continue :

$$r = a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{a_3 + \cfrac{1}{a_4 + \cfrac{1}{a_5 + \cdots}}}}}.$$

On obtient des a_0 approximations successives de r au moyen de rapports d'entiers en tronquant le développement de la fraction à des ordres plus ou moins élevés que l'on appelle les réduites d'ordre n.

Il existe une formule de récurrence d'ordre deux qui permet de calculer les approximations successives p_i/q_i du réel r sous la forme de fraction entière.

$$p_0 = a_0$$
$$q_0 = 1$$
$$p_1 = a_0 a_1 + 1$$
$$q_1 = a_1$$
$$\frac{p_{i+1}}{q_{i+1}} = \frac{a_{i+1} p_i + p_{i-1}}{a_{i+1} q_i + q_{i-1}}.$$

Ces formules de récurrence permettant ce calcul furent découvertes par le mathématicien Indien Bhascara II au début du XIII^{e} siècle, soit cinq siècles avant que le mathématicien anglais J. Wallis ne les redécouvre en Europe.

Exemple : représentation du nombre π

On a $\pi = 3{,}141\,592\,654$.
Sa forme réduite d'ordre quatre s'écrit : (3;7,15,1,293).
Les approximations successives sont : 3, 22/7, 333/106, 355/113, 104 348/33 215.

3. Autres périodes de récurrence

Comme nous venons de le voir, pour qu'une période soit une période de récurrence des éclipses, il faut non seulement qu'elle soit un multiple des révolutions synodique (L) et draconitique (G) de la Lune, mais il faut également qu'elle soit un multiple de la révolution anomalistique (A)

de la Lune. On doit donc trouver trois nombres x, y et z tels que $x.L \sim y.G \sim z.A$. Le tableau 10.I donne une série de solutions. Les solutions sont sur deux lignes, la première ligne donne les valeurs respectives de x, y, z et la durée de la période en années. La seconde ligne donne pour chaque solution les valeurs des produits $x.L$, $y.G$ et $z.A$ sous la forme n jours + p jour. Ainsi la seconde ligne de la première solution donne : $x.L$ = 6585 jours + 0,321 jour…

jours	x	y	z	Durée
	223	242	239	18,03 ans
6 585 j +	0,321 j	0,357 j	0,537 j	
	2148	2331	2302	173,7 ans
63 430 j +	1,705 j	1,684 j	0,574 j	
	2371	2573	2541	191,7 ans
70 016 j +	1,026 j	1,042 j	0,112 j	

Tableau 10.I. Les autres périodes de récurrences.

La première solution correspond au saros, les deux solutions suivantes ramènent bien la lunaison et la Lune près de son nœud, mais décalent beaucoup plus la Lune par rapport à son périgée (14,8° pour la seconde et 11,9° pour la troisième). Elles sont donc moins stables que le saros.

On peut également chercher des solutions sous la forme $x.L \sim 2.y.G/2 \sim z.A$. Ces solutions font intervenir la demi-révolution draconitique, cela correspond donc à des récurrences avec alternance de nœud. Le tableau 10.II donne une série de solutions.

jours	x	y	z	Durée
	135	146,5	145	10,92 ans
3 986 j +	0,629 j	0,590 j	9,41 j	
	1074	1165,5	1151	86,83 ans
31 715 j +	0,852 j	0,842 j	0,287 j	
	1297	1407,5	1390	104,86 ans
38 300 j +	1,174 j	1,199 j	0,824 j	

Tableau 10.II. Les récurrences avec changement de nœuds.

La première solution que l'on appelle « saros chinois » car elle était connue des chinois, n'est pas très stable à cause de l'écart en anomalie. La seconde et la dernière solution sont meilleures car les écarts en anomalie sont beaucoup plus faibles.

Ainsi pour la seconde solution : 1074.L – 1165,5.G = 0,009 j = 13 min et 1074.L – 1151.A = 0,56 j. Au bout d'un cycle, la Lune se retrouve à 7,4° en aval sur sa position orbitale.

Et pour la dernière solution : $1297.L - 1407{,}5.G = -0{,}027$ j = –39 min et $1297.L - 1390.A = 0{,}35$ j. Au bout d'un cycle, la Lune se retrouve à 4,5° en aval sur sa position orbitale.

4. Nombre d'éclipses dans un saros

Le saros comporte 38 saisons d'éclipses, revenant en moyenne toutes les 5 ou 6 lunaisons. À chaque saison d'éclipses, il y a au moins deux et parfois trois éclipses. En moyenne, un saros comprend 84 éclipses, réparties en 42 éclipses de Soleil et 42 éclipses de Lune.

Les 42 éclipses de Lune se répartissent de la manière suivante : 14 éclipses par la pénombre, 28 éclipses par l'ombre dont 14 éclipses partielles et 14 éclipses totales.

Les 42 éclipses de Soleil se répartissent de la manière suivante : 14 éclipses partielles et 28 éclipses centrales.

Ce nombre d'éclipses par saros est une valeur moyenne, en réalité il existe des saros riches pouvant atteindre jusqu'à 94 éclipses (47 de chaque) et des saros pauvres comportant 78 éclipses.

Les canons d'éclipses construits à l'IMCCE comportent 28 512 éclipses sur une période de 5999 ans, soit en moyenne 4,75 éclipses par an et 85,7 éclipses par saros (valeur que l'on peut arrondir à 86). Cette valeur est légèrement plus forte que la valeur moyenne (84). On retrouve le saros moyen du canon d'Oppolzer, construit sur une période plus courte, qui est de 86 éclipses.

Bibliographie

Exact Sciences in Antiquity, 2e édition, O. Neugebauer, New York, Dover, 1957 (trad. Fr. par P. Souffrin, Les Sciences exactes dans l'Antiquité, Arles, Actes Sud, 1990).

11

Les suites longues d'éclipses de Soleil

1. Éclipses homologues et suites longues

Nous avons vu qu'il existe une période de récurrence des éclipses, le saros, qui ramène sensiblement la même éclipse après une période de 6 585,32 jours. En réalité, elles ne sont pas parfaitement identiques, mais elles évoluent légèrement d'un saros à l'autre et elles forment des suites qui portent sur de grandes périodes de temps d'où leur nom de *suites longues*.

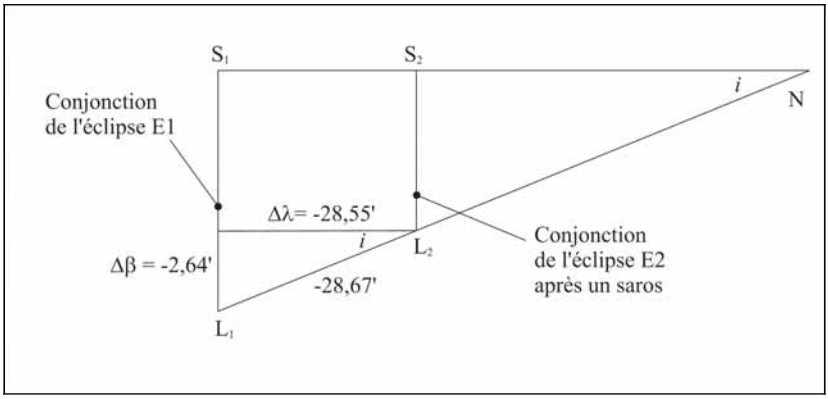
Ces éclipses séparées par un saros sont appelées *éclipses homologues*.

1.1. Évolution de la longitude de la conjonction après un saros

Nous allons regarder comment évolue la longitude de la conjonction après une période d'un saros. L'écart entre le saros de 223 lunaisons « *L* » et les 242 révolutions draconitiques « *G* » est de moins 52 minutes de temps (– 0,036 12 jour).

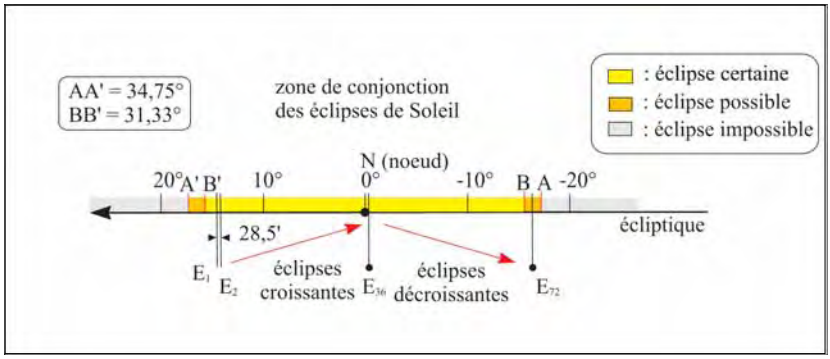
Durant ces 52 minutes, la Lune, sur son orbite, se déplace en moyenne par rapport à son nœud de $-0{,}036\,12 \times 360°/G = -28{,}67'$. La Lune en conjonction se trouve donc déplacée sur son orbite de 28,67′ dans le sens rétrograde par rapport au nœud. Compte tenu de

Évolution par rapport au nœud.



l'inclinaison de l'orbite lunaire, ce décalage se traduit par un décalage de la longitude céleste $\Delta\lambda = -28{,}55'$ et par une variation de la latitude céleste de la Lune de $\Delta\beta = -2{,}64'$.

Nombre d'éclipses dans une suite longue.



Les conjonctions des éclipses homologues vont donc parcourir l'arc BB' dans le sens rétrograde avec un pas moyen de 28,55'. Si l'on divise l'arc BB' par 28,55', on constate qu'il peut contenir 66 éclipses et si l'on divise l'arc AA' par 28,55' on voit qu'il peut contenir 74 éclipses. Ces séries d'éclipses sont appelées suites longues. L'étude des canons d'éclipses montre qu'en moyenne ces suites comportent 72 éclipses, ce qui correspond à une période de temps d'environ 1 300 ans.

1.2. Aspect des éclipses d'une suite longue

Les premières éclipses d'une suite longue sont faibles, car elles sont proches de l'arc A'B', donc loin du nœud. Ensuite, leur grandeur va

croître jusqu'à ce qu'elles se produisent au voisinage du nœud, puis décroître pour finir de nouveau faible au voisinage de l'arc BA. Pour une suite longue de 72 éclipses, si l'on respecte les pourcentages des éclipses partielles et des éclipses centrales (1/3 et 2/3), on aura donc successivement 12 éclipses partielles de grandeur croissante (sur 200 ans), puis 24 éclipses centrales de grandeur croissante (sur 450 ans), puis 24 éclipses centrales de grandeur décroissante (sur 240 ans) et enfin 12 éclipses partielles de grandeur décroissante (sur 200 ans). Dans la pratique, les deux ou trois éclipses du milieu de la suite longue sont maximum, elles servent de transition entre la période de croissance et de décroissance des éclipses. Si la suite longue a lieu au nœud descendant, les latitudes célestes successives de la Lune croissent des latitudes négatives aux latitudes positives, l'ombre et la pénombre vont donc se déplacer sur la Terre du sud au nord. Inversement pour une suite longue au nœud ascendant, les latitudes célestes successives de la Lune décroissent des latitudes positives aux latitudes négatives, l'ombre et la pénombre vont donc se déplacer sur la Terre du nord au sud.

Toutes les éclipses d'une suite ont lieu au même nœud.

2. Évolutions des éclipses homologues

2.1. Évolution en longitude terrestre

Nous avons vu que la période du saros n'est pas un nombre entier de jours, sa valeur est de 6 585,32 jours. Donc entre deux éclipses homologues, la Terre n'a pas tourné d'un nombre entier de jour, les zones concernées par les éclipses ne sont donc pas les mêmes. En 0,32 jour, la Terre tourne d'environ 120°, les zones concernées par l'éclipse se déplacent donc d'environ 120° vers l'ouest. Ce décalage est bien visible sur la carte de la figure 11.1, où nous avons tracé les lignes de centralité des éclipses homologues à l'éclipse du 11 août 1999.

2.2. Évolution en latitude terrestre

Nous avons vu que les suites longues au nœud ascendant parcourent la Terre du nord au sud et que les suites longues au nœud descendant parcourent la Terre du sud au nord. Le décalage en latitude terrestre provient du décalage en latitude céleste de la Lune d'une éclipse homologue à l'autre. Un décalage en latitude céleste $\Delta\beta$ de la Lune, même si le sens du décalage est conservé, ne se traduit pas directement



Figure 11.1. Sept éclipses homologues de la suite longue contenant l'éclipse du 11 août 1999.

par un même décalage de l'ombre en latitude terrestre. En effet, les latitudes célestes sont comptées à partir de l'écliptique et les latitudes terrestres sont comptées à partir de l'équateur terrestre, on doit donc tenir compte de l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur terrestre, ainsi les variations de latitude céleste seront inclinées d'environ 23° par rapport au méridien terrestre. De plus la variation de latitude doit être projetée sur une sphère et la projection sur la sphère terrestre produit un décalage plus important près des pôles. Sur la figure 11.2, $\Delta\beta$ représente la variation de latitude céleste de la Lune. À cette variation correspond une variation Δr sur l'axe normal à l'écliptique (pôle de l'écliptique) et une variation Δl sur la sphère terrestre. Cette dernière variation a deux composantes, une composante $\Delta\lambda$ en longitude terrestre, qui produit le léger décalage en longitude vers l'est, et une composante en latitude terrestre $\Delta\phi$.

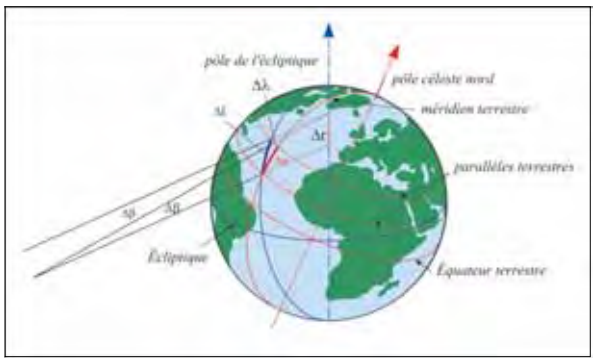


Figure 11.2. Variation de la latitude terrestre.

Cela explique qu'après une période de trois saros (ou Exeligmos) les lignes de centralité ne sont pas alignées en longitude, comme on pourrait s'y attendre après trois décalages de 120° en longitude, mais sont décalées légèrement vers l'est comme on le constate sur la carte des éclipses homologues à l'éclipse du 11 août 1999 (Fig. 11.1).

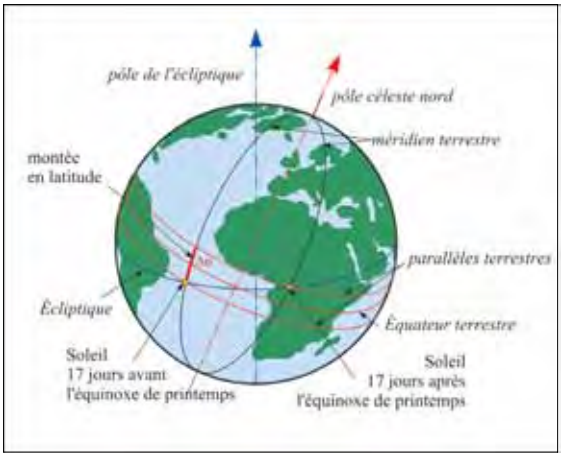
3. Évolution réelle des lignes de centralité des éclipses homologues

Nous allons essayer de quantifier un peu mieux les décalages en latitude. En moyenne, au bout de trois saros les lignes de centralité des éclipses se décalent d'environ 900 km dans le plan passant par la Terre et normal à l'axe des cônes (plan de Bessel), elles parcourent donc la Terre en environ 45 saros. On retrouve approximativement le nombre d'éclipses centrales dans une suite longue (48).

Cependant, il convient de noter que la variation en latitude des séries homologues ne se fait pas toujours de façon uniforme d'un pôle à l'autre. Elle peut être momentanément inversée ou accélérée. Prenons le cas d'une suite longue au nœud ascendant, les lignes de centralité parcourent la sphère terrestre du nord au sud. Après trois saros, la ligne de centralité descend d'environ 900 km ce qui correspond à une variation de la latitude de la Lune de 7,92′ (3 × 2,64′). Or, dans ce mouvement, nous n'avons considéré que le déplacement en latitude de la Lune, le Soleil étant toujours dans l'écliptique. En réalité comme l'écliptique est incliné de 23° par rapport à l'équateur terrestre, nous devons également tenir compte des variations des hauteurs du Soleil par rapport à l'équateur terrestre, donc des variations de déclinaison du Soleil, mais ces variations peuvent être très grandes par rapport aux variations en latitude de la Lune. Ainsi trois saros font environ 54 ans et 34 jours, donc au bout de trois saros le Soleil se retrouve décalé d'environ 34° sur l'écliptique. Cette variation de 34° sur l'écliptique, si elle est répartie de part et d'autre d'un équinoxe peut se traduire par des variations en déclinaison de plus au moins 13°, ce qui correspond à une variation de hauteur de 13° du Soleil dans le méridien, à midi, c'est-à-dire une descente (si on est de part et d'autre de l'équinoxe de d'automne) ou une remontée (si on est de part et d'autre de l'équinoxe printemps) de 1 440 km environ. Une descente du Soleil en déclinaison fait remonter l'ombre donc la ligne de centralité et une montée du Soleil fait redescendre l'ombre donc la ligne de centralité. Ainsi dans une série longue, lorsque les dates des séries homologues séparées par trois saros se trouvent distribuées autour des équinoxes, les latitudes de la bande de centralité peuvent être accentuées de 2 340 km (1 440 + 900 = 2 340 km)

ou diminuées de 540 km (900 – 1440 = –540 km). Ce phénomène est localisé dans le temps et disparaît lorsqu'on s'éloigne des dates des équinoxes.

Variation de la hauteur du Soleil au méridien de part et d'autre des équinoxes.



4. Évolutions des éclipses homologues

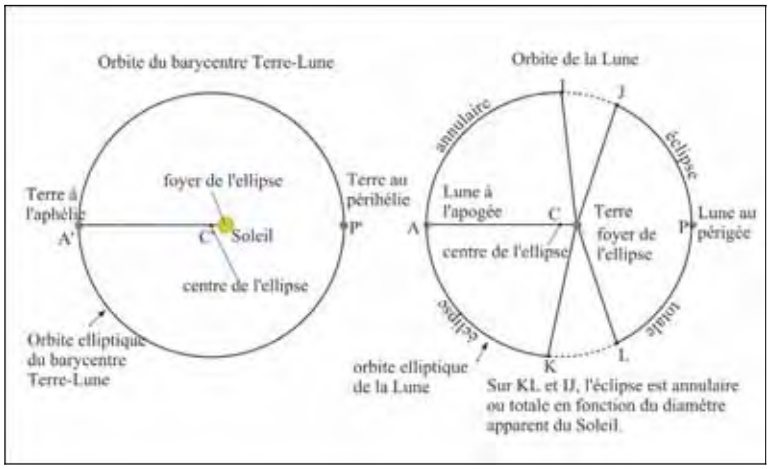
4.1. Variation sur le fond d'étoiles et dans l'année

Les éclipses parcourent les quatre saisons et cela deux fois.

Nous rappelons que d'un saros à l'autre, le Soleil, donc l'éclipse, se décale d'environ 10,5° par rapport aux constellations zodiacales. Au cours d'une suite longue le Soleil apparent effectue plus de deux tours complets d'orbite et l'on rencontre toutes les configurations liées au Soleil apparent.

4.2. Variation des types d'éclipses

Nous avons vu également que suite à l'écart entre un saros et 239 révolutions anomalistiques, la distance de la Lune à son périgée varie de 2,8° d'un saros à l'autre. Au cours d'une suite longue de 72 saros, les conjonctions lunaires liées aux éclipses homologues (donc la Lune) ne vont parcourir que 202° de l'orbite lunaire, soit un peu plus que la moitié. De plus durant les 48 éclipses centrales du saros, cet arc se réduit à 134° et il convient de comparer cette valeur avec les portions de l'orbite lunaire où les éclipses sont totales ou annulaires.



Orbites de la Terre et de la Lune.

Ainsi si le périgée est proche du milieu de cet arc de 134°, la suite longue est très riche en éclipses totales, si au contraire, cet arc avoisine l'apogée, la suite longue est très riche en éclipses annulaires.

4.3. Remarques supplémentaires

Il ne faut jamais perdre de vue que toutes les variations dans les suites longues sont calculées avec des valeurs moyennes et ne sont jamais tout à fait conformes à la réalité. Ainsi le décalage de la conjonction par rapport au nœud de 28,55′ est une valeur moyenne. En réalité, le Soleil avance plus vite en janvier (il est proche du périgée) qu'en juillet (proche de l'apogée). Le calcul montre que la variation de la longitude de la conjonction par rapport au nœud est de l'ordre de 6′ en janvier (au lieu de 28,55′) et qu'elle atteint 48′ en juillet. Les éclipses homologues d'hiver sont donc plus semblables que les éclipses homologues d'été qui évoluent sensiblement plus vite.

Il est facile de connaître la position d'une éclipse dans une suite longue d'éclipses. Les éclipses croissantes ont toujours lieu après le passage au nœud et les éclipses décroissantes ont toujours lieu avant le passage au nœud. La connaissance des instants des conjonctions et du passage au nœud permet donc de positionner l'éclipse dans sa suite longue. Inversement, la connaissance de la position d'une éclipse dans sa suite longue permet, sauf pour l'éclipse maximale, de savoir sa position par rapport aux nœuds. De plus dans le cas d'un doublet d'éclipses (Lune-Soleil ou Soleil-Lune), la première éclipse, qui a lieu avant le passage au nœud, appartient à la partie

décroissante de sa suite longue et la seconde éclipse appartient à la partie croissante de sa suite longue. Dans le cas d'un triplet d'éclipses, la première appartient à la fin de la partie décroissante de la suite longue qui la contient, la dernière appartient au début de la partie croissante de la suite longue qui la contient et l'éclipse médiane se trouve au voisinage du maximum de sa suite longue.

5. Exemple de suite longue

Le tableau 11.I donne la liste des éclipses de la suite longue contenant l'éclipse du 31 mai 2003. On donne successivement le numéro de l'éclipse dans la suite longue, le type d'éclipse, la date de l'éclipse, sa magnitude et la durée maximale de la phase centrale lorsque cette phase existe.

Tableau 11.I. Série de saros de l'éclipse annulaire du 31 mai 2003.

N° type	Date	Magnitude	Durée de la phase centrale
1 P	12/10/1624	0,008 596 8	
2 P	23/10/1642	0,054 867 9	
3 P	03/11/1660	0,089 618 2	
4 P	14/11/1678	0,114 615 3	
5 P	24/11/1696	0,131 662 4	
6 P	07/12/1714	0,141 909 2	
7 P	17/12/1732	0,146 951 3	
8 P	28/12/1750	0,150 586 0	
9 P	08/01/1769	0,153 088 4	
10 P	19/01/1787	0,159 157 7	
11 P	30/01/1805	0,167 594 1	
12 P	11/02/1823	0,185 774 6	
13 P	21/02/1841	0,209 710 0	
14 P	04/03/1859	0,246 269 0	
15 P	15/03/1877	0,291 963 6	
16 P	26/03/1895	0,353 346 7	
17 P	06/04/1913	0,424 666 2	
18 P	17/04/1931-18/04/1931	0,511 028 3	
19 P	28/04/1949	0,609 570 8	
20 P	09/05/1967	0,720 529 2	
21 P	19/05/1985	0,841 127 7	

N° type	Date	Magnitude	Durée de la phase centrale
22 A	31/05/2003	0,969 600 1	3 min 34,08 s
23 A	10/06/2021	0,972 131 6	3 min 47,99 s
24 A	21/06/2039	0,973 091 5	4 min 01,45 s
25 A	01/07/2057-02/07/2057	0,973 573 8	4 min 18,67 s
26 A	13/07/2075	0,973 720 6	4 min 40,41 s
27 A	23/07/2093	0,973 553 8	5 min 06,77 s
28 A	04/08/2111	0,973 138 4	5 min 36,78 s
29 A	14/08/2129-15/08/2129	0,972 485 7	6 min 09,32 s
30 A	26/08/2147	0,971 647 0	6 min 42,98 s
31 A	05/09/2165	0,970 658 8	7 min 15,78 s
32 A	16/09/2183-17/09/2183	0,969 559 6	7 min 46,87 s
33 A	28/09/2201	0,968 430 9	8 min 14,61 s
34 A	09/10/2219	0,967 251 7	8 min 39,72 s
35 A	19/10/2237	0,966 154 7	9 min 00,30 s
36 A	30/10/2255-31/10/2255	0,965 106 5	9 min 17,21 s
37 A	10/11/2273	0,964 254 1	9 min 28,20 s
38 A	21/11/2291	0,963 528 7	9 min 34,68 s
39 A	02/12/2309-03/12/2309	0,963 080 3	9 min 34,31 s
40 A	14/12/2327	0,962 859 9	9 min 28,43 s
41 A	24/12/2345	0,962 960 6	9 min 15,58 s
42 A	04/01/2364-05/01/2364	0,963 342 1	8 min 57,77 s
43 A	15/01/2382	0,964 068 3	8 min 34,41 s
44 A	26/01/2400	0,965 108 2	8 min 07,46 s
45 A	05/02/2418-06/02/2418	0,966 462 1	7 min 37,67 s
46 A	17/02/2436	0,968 107 3	7 min 06,45 s
47 A	27/02/2454	0,970 029 7	6 min 34,42 s
48 A	09/03/2472-10/03/2472	0,972 171 8	6 min 02,57 s
49 A	21/03/2490	0,974 509 3	5 min 31,07 s
50 A	01/04/2508	0,976 965 4	5 min 00,43 s
51 A	12/04/2526-13/04/2526	0,979 550 5	4 min 29,66 s
52 A	23/04/2544	0,982 125 8	3 min 59,66 s
53 A	04/05/2562	0,984 715 4	3 min 29,01 s
54 A	14/05/2580-15/05/2580	0,987 167 9	2 min 58,81 s
55 A	26/05/2598	0,989 523 4	2 min 27,78 s

N° type	Date	Magnitude	Durée de la phase centrale
56 A	06/06/2616	0,991 621 1	1 min 58,16 s
57 A	17/06/2634	0,993 504 2	1 min 29,84 s
58 A	27/06/2652-28/06/2652	0,995 035 4	1 min 05,79 s
59 A	09/07/2670	0,996 168 7	0 min 47,26 s
60 A	19/07/2688	0,996 739 9	0 min 36,25 s
61 A	31/07/2706-01/08/2706	0,996 035 2	0 min 36,88 s
62 P	11/08/2724	0,882 257 6	
63 P	22/08/2742	0,756 064 5	
64 P	01/09/2760	0,639 925 0	
65 P	13/09/2778	0,531 815 1	
66 P	23/09/2796	0,433 870 6	
67 P	04/10/2814	0,346 949 9	
68 P	15/10/2832	0,272 539 3	
69 P	26/10/2850	0,209 850 5	
70 P	05/11/2868	0,158 782 9	
71 P	17/11/2886	0,119 480 1	
72 P	28/11/2904	0,090 781 8	
73 P	09/12/2922	0,069 694 6	
74 P	20/12/2940	0,057 048 9	
75 P	31/12/2958	0,048 771 3	
76 P	10/01/2977	0,045 227 6	
77 P	22/01/2995	0,040 316 9	

On remarque que cette suite n'est pas complète. En effet, le canon d'éclipse de l'IMCCE s'arrête en 2999, il y a probablement des éclipses de la suite qui sont postérieures à cette date. Malgré cela, on dépasse la valeur moyenne de 72 éclipses et l'on est assez loin des valeurs moyennes. Ainsi le nombre d'éclipses partielles de la partie croissante est de 21, la moyenne donnant 12 ! On constate également que toutes les éclipses centrales sont des éclipses annulaires, donc l'arc parcouru par les conjonctions lunaires est au voisinage de l'apogée. L'éclipse du 31 mai 2003 est la première éclipse centrale de la partie croissante de la suite, on peut donc en déduire qu'elle a lieu après le passage au nœud et relativement longtemps après ce passage. De plus elle est proche d'un des pôles terrestres. On ne peut pas savoir si la suite est au nœud ascendant ou descendant de l'orbite lunaire. Pour cela il faudrait connaître la latitude de la Lune à la conjonction pour une seule éclipse

de la suite. Cette latitude est positive pour l'éclipse du 31 mai donc cette suite longue est au nœud ascendant. De plus, l'éclipse du 31 mai 2003 est proche du pôle nord terrestre, les éclipses de la suite vont donc parcourir le globe terrestre du nord au sud.

Les éphémérides de la Lune nous donnent les informations suivantes :

- Le 28/05/2003 à 13 h 04 min 44 s UTC : la Lune à l'apogée (distance maximale à la Terre) d = 406 168 km, diamètre apparent = 29,5'.
- Le 30/05/2003 à 08 h 32 min 17 s UTC : la Lune passe par le nœud ascendant de son orbite, longueur moyenne = +59° 30,9'.
- Le 31/05/2003 à 04 h 08 min 18 s UTC : maximum de l'éclipse annulaire de Soleil.
- Le 31/05/2003 à 04 h 19 min 51 s UTC : nouvelle Lune.

On constate que le maximum de l'éclipse a bien lieu entre le passage et la conjonction, qu'il est proche de la conjonction (11 min 33 s) mais éloigné du passage au nœud (19 h 36 min 1 s). L'éclipse est proche du passage de la Lune à l'apogée, elle est donc annulaire.

12

Observation d'une éclipse de Soleil

1. Précautions à prendre pour observer une éclipse de soleil

Si on décompose la lumière solaire à l'aide d'un prisme, on aperçoit une série de couleurs allant du violet au rouge. Ces couleurs forment le spectre visible de la lumière solaire. Leurs longueurs d'onde varient de 400 nm (1 nanomètre = 1 millionième de millimètre) pour le violet à 750 nm pour le rouge. Le spectre de la lumière solaire ne se limite pas aux couleurs visibles, mais s'étend dans les basses longueurs d'onde avec les ultraviolets et les rayons X, et vers les grandes longueurs d'onde avec l'infrarouge et les ondes radio. Les rayonnements ultraviolets ont une longueur d'onde comprise entre 15 nm (rayons X) et 400 nm (lumière visible violette).

On classe le rayonnement ultraviolet en plusieurs catégories :

- les UV **C**, entre 200 nm et 280 nm, très dangereux, mais ils sont filtrés par l'atmosphère terrestre ;
- les UV **B**, entre 280 nm et 315 nm, qui peuvent engendrer des lésions très graves ;
- les UV **A**, entre 315 nm et 380 nm, qui sont à l'origine du bronzage de la peau et de la photosynthèse de la vitamine D.

Ces rayonnements sont tous nocifs pour la vue, d'où l'usage de lunettes de soleil de bonne qualité pour les journées ensoleillées.

Les rayonnements infrarouges ont une longueur d'onde comprise entre 800 nm (lumière visible rouge) et 1 mm (ondes radio). Ces rayonnements sont détectés par la chaleur à laquelle ils sont associés. La concentration du rayonnement solaire permet d'atteindre des températures très élevées. Ainsi, il est très facile d'enflammer une feuille de papier à l'aide d'une loupe et d'un rayon de Soleil.

Iriez-vous mettre votre œil à la place de ce petit bout de papier ? Non ! Alors ne mettez jamais votre œil derrière un instrument d'optique (lunette, jumelles, appareil photo) qui focalise la lumière solaire et qui n'est pas équipé d'un filtre spécialement conçu pour l'observation solaire.

De même, il est fortement déconseillé de regarder le Soleil à l'œil nu, même avec des lunettes de soleil. En effet ces lunettes, si elles sont de bonne qualité, protègent du rayonnement ultraviolet mais ne sont nullement conçues pour regarder le Soleil de face car elles n'arrêtent pas le rayonnement infrarouge. On estime, que même lorsque le disque solaire est éclipsé à 99 %, le rayonnement solaire peut causer des dommages irréversibles et au moment où vous êtes ébloui il est déjà trop tard.

Le seul moment, très court, où l'on peut regarder sans danger directement le Soleil durant une éclipse est la phase de totalité. Mais attention la douleur que l'on ressent en regardant le Soleil en face provient de la pupille qui veut se fermer plus qu'elle ne le peut, c'est cette douleur qui nous fait détourner le regard. Mais un mauvais filtre peut supprimer cette douleur, et laisser passer le rayonnement infrarouge qui va brûler la rétine d'une manière indolore, le fond de l'œil n'étant pas sensible à la douleur et toute brûlure étant irréversible.

Il convient donc de prendre énormément de précautions pour observer une éclipse de Soleil.

Une méthode classique consiste à observer le phénomène par projection. Pour cela munissez-vous de deux feuilles de papier cartonné. La première, percée d'un minuscule trou, est positionnée perpendiculairement à la direction du soleil, la deuxième est placée parallèlement à la première ; lorsque cette seconde feuille est suffisamment éloignée de la première (environ un demi-mètre), on peut y observer l'image du soleil. On peut également observer l'éclipse par projection avec un instrument d'optique, par exemple une petite lunette. Pour cela, il suffit d'orienter la lunette vers le Soleil, sans utiliser

le chercheur de l'instrument, mais en orientant la lunette de manière à minimiser la dimension de son ombre. La première méthode est absolument sans danger, la deuxième présente le risque de voir une personne distraite ou non informée (souvent des enfants), mettre son oeil derrière l'instrument.

2. L'utilisation de filtres pour l'observation des éclipses

2.1. Les filtres solaires

Il existe de nombreux types de filtres solaires, utilisés par les astronomes professionnels et amateurs pour l'observation du Soleil. Ces filtres ont deux objectifs, réduire l'intensité lumineuse et filtrer les rayonnements ultraviolets et infrarouges. Ces filtres possèdent une fine couche d'aluminium, de chrome ou d'argent sur leur surface. C'est cette couche métallique qui filtre le rayonnement infrarouge. Ces filtres, pour être efficaces, doivent être montés devant les systèmes optiques (devant la lunette ou le télescope), ce qui explique à la fois leur grand diamètre et leur prix souvent élevé. On trouve parfois, vendus avec des lunettes astronomiques du commerce, des filtres solaires qui se placent sur l'oculaire ; **ces filtres sont dangereux**. En effet, la lumière solaire traverse alors tout le système optique, ce qui concentre le rayonnement et peut briser le filtre par échauffement. On peut utiliser un filtre solaire vissé sur l'oculaire, uniquement s'il est associé avec un hélioscope d'Herschel. **Si vous possédez un instrument d'observation consultez votre revendeur qui pourra vous conseiller pour l'achat d'un filtre solaire adapté à votre instrument.**

Si vous ne voulez pas investir trop d'argent dans l'achat d'un filtre solaire, vous pouvez confectionner **un filtre en polyester aluminisé (type Mylar®)**. Le Mylar se présente sous la forme d'une mince feuille métallique aluminée. Son pouvoir filtrant est très performant, il filtre parfaitement les rayonnements infrarouge et UV et diminue l'intensité lumineuse d'un facteur 1 000 000. Son seul défaut est sa fragilité, due à sa faible épaisseur. Il faut également se méfier d'un éventuel défaut de surface. Utilisez toujours des feuilles parfaitement planes (n'ayant subi aucun pli). Ces feuilles sont faciles à découper et peuvent donc être utilisées pour la création du filtre de votre choix. Vous pouvez en équiper une paire de lunettes. De nombreuses lunettes spéciales « éclipses » sont distribuées dans différents pays pour l'observation.

® marques déposées de du Pont de Nemours.

Ces lunettes doivent suivre des normes de sécurité : vérifiez toujours que ces normes figurent sur les lunettes. De telles lunettes permettent d'observer les éclipses à « l'œil nu », mais, elles ne doivent pas être utilisées pour regarder à travers un instrument. De plus, elles ne doivent pas être utilisées après leur date limite d'utilisation.

Le filtre, quel qu'il soit, doit toujours être placé devant l'instrument et non entre l'instrument et l'observateur.

Liste des filtres pouvant être utilisés pour observer une éclipse de Soleil

- Filtres solaires spéciaux.
- Filtres en Mylar®.
- Plaques de verre d'indice maximal pour les masques de soudeur.
- Plusieurs épaisseurs de négatifs **noir et blanc** totalement opaques, complètement développés et contenant une émulsion argentine (attention les films négatifs couleurs et certains films négatifs noir et blanc n'en contiennent pas).

Nous vous conseillons vivement les deux premiers, les autres, tenant plus du bricolage, ne sont pas sans risques.

En cas de doute n'hésitez pas à consulter une personne compétente, c'est-à-dire un ophtalmologiste, ou observez l'éclipse par projection.

Liste non exhaustive des filtres À NE PAS utiliser

- Les morceaux de verre noirci à la flamme d'une bougie.
- Les filtres photographiques en gélatine.
- Les filtres polarisants, croisés ou non.
- Les plaques rayons X exposées.
- Les négatifs couleurs ou les négatifs noir et blanc ne contenant pas d'émulsion argentine.
- Une ou plusieurs paires de lunettes.

3. Les traumatismes causés par le Soleil

Si vous regardez sans précaution une éclipse de Soleil, vous risquez une brûlure grave du fond de l'œil. Au moment de la brûlure, ce traumatisme est le plus souvent indolore (d'où son danger). Il peut

entraîner des cécités définitives ou partielles. Lors de la dernière éclipse visible aux États-Unis, on a dénombré plus de 1000 cas de cécité définitive et plus de 10 000 cas de cécité temporaire. Même dans les cas de cécité temporaire, le traumatisme est très long à se résorber (cela peut prendre de 6 mois à un an) et il reste toujours des séquelles. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le fait de porter des lunettes de Soleil augmente l'intensité de la brûlure. En effet l'intensité lumineuse étant filtrée par les lunettes, la pupille de l'œil se dilate et la quantité de lumière infrarouge qui pénètre dans l'œil est plus importante, d'où une brûlure encore plus intense.

13

L'observation de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999

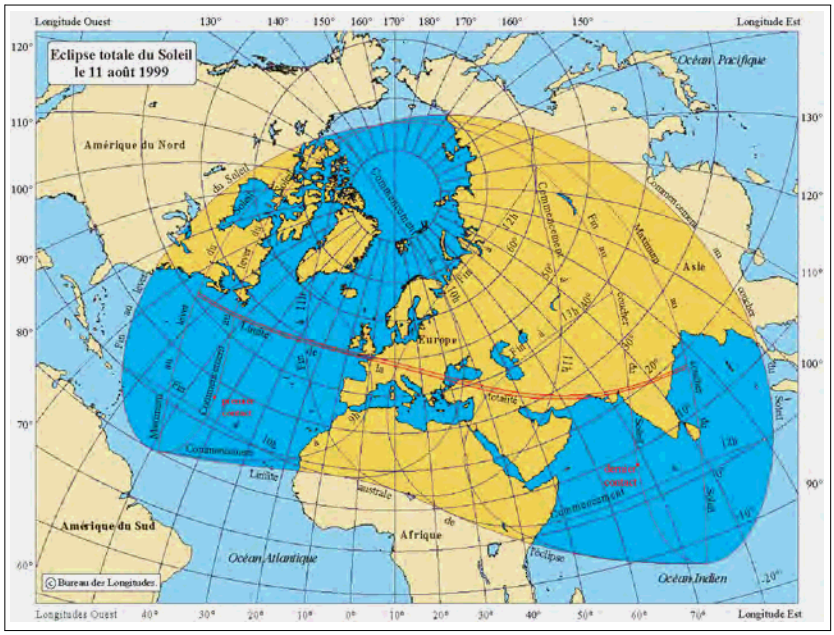
Jamais phénomène astronomique n'aura autant marqué les esprits. En Europe, malgré une météo peu clémente, ce sont près de cent millions de personnes qui furent témoin de cet événement spectaculaire.

Auparavant, si l'on excepte l'éclipse du 22 juillet 1990 visible, « façon de parler », au ras de l'horizon avec de mauvaises conditions météorologiques dans des contrées peu accessibles de Finlande, il fallait remonter au 15 février 1961 pour trouver une éclipse totale de Soleil visible sur le continent européen (Voir Fig. 9.4). Cette dernière était d'ailleurs observable en France selon une ligne Saintes-Barcelonnette et a été largement relatée à l'époque dans les journaux. À défaut d'événement plus récent, cette éclipse est celle qui, en France, au petit matin du mercredi 11 août 1999, restait généralement imprégnée dans la mémoire collective.

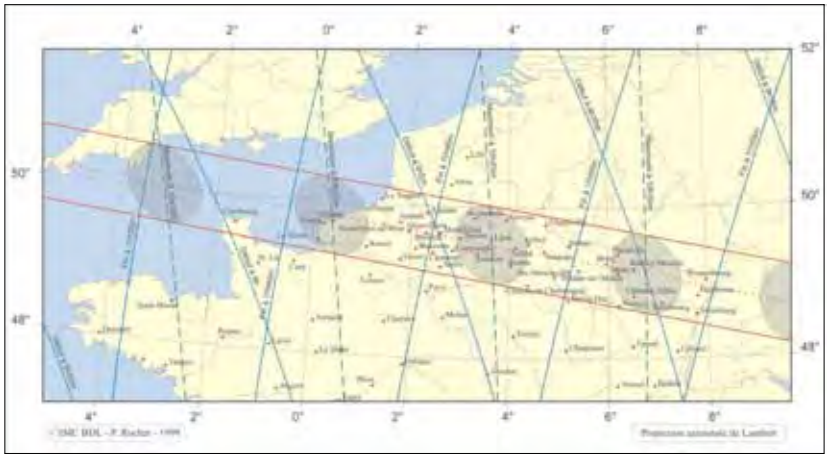
1. La météo

En France, un dispositif sans précédent avait été mis en place par Météo France et relayé par la chaîne du câble et du satellite La Chaîne Météo.

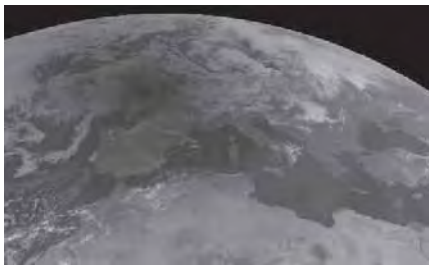
Carte générale de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999.



Carte locale pour la France de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999.



Pour la première fois, une prévision à dix jours était proposée aux abonnés. Cette prévision dès l'origine très pessimiste s'est malheureusement révélée jour après jour désespérément exacte. À de trop rares exceptions près, Pays de Bray, Ardennes, etc., partout en France le ciel resta couvert durant les phases de l'éclipse. Plus à l'est en Europe, la situation n'était guère plus enviable, et il fallait se rendre en Roumanie, Bulgarie ou Turquie pour bénéficier de conditions favorables.



Empreinte du cône d'ombre sur le globe terrestre au moment où il atteint les côtes françaises à 10 h 20 min UTC. Image du satellite METEOSAT. © 1999 EUMETSAT.

2. Les médias

Une couverture médiatique d'envergure avait été mise en place. Très tôt, des reportages abordant le thème de la protection oculaire ont été diffusés. On estime que, grâce à cet effort, le risque a pu être considérablement réduit puisque seulement seize cas d'atteinte rétinienne irréversible ont pu être dénombrés parmi la population française.

2.1. La presse

On ne compte plus les mensuels, hebdomadaires, quotidiens qui ont traité du sujet. Magique ! Divin ! Inoubliable ! Autant d'exclamations qui ne peuvent rendre compte du spectacle féerique offert par les deux acteurs célestes. Les nuages qui se sont invités ici et là ont le plus souvent parachevé la dramaturgie. L'émotion était au rendez-vous, c'est sûr !



La Une de quelques quotidiens régionaux et nationaux datés des 11 et 12 août 1999.

2.2. Les radios

Les radios ne se sont pas fait prier pour couvrir l'événement. Le jour J et les jours suivants, de nombreux directs et témoignages ont occupé un temps d'antenne considérable.

2.3. Les télévisions

Le 11 août 1999, un plateau de TF1 avait été monté à Reims pour suivre l'événement en direct. Une caméra de France 2 avait été embarquée à bord du Mystère 20 de l'INSU/IGN, une autre de Canal+ à bord de Concorde. D'une manière ou d'une autre, toutes les chaînes nationales et, ne l'oublions pas, régionales ont contribué à faire de cet événement astronomique somme toute local un événement médiatique à l'échelle de l'humanité.

3. Le rôle des associations nationales

Si les pouvoirs publics ont été cruellement absents de la scène politico-médiatique de l'éclipse jusqu'au début de l'hiver 1999, la communication et la prévention autour du phénomène ont été essentiellement assurées par les grandes associations nationales que sont l'Association française d'astronomie (AFA), la Société astronomique de France (SAF), et à moindre titre l'Association nationale sciences et techniques jeunesse (ANSTJ[1]). Pour en avoir été le témoin, le rédacteur de ces lignes peut affirmer que le siège social de chacune des associations a été transformé plusieurs mois durant en véritable ruche. Pour faire face à l'ampleur de l'événement, la SAF s'était attachée deux ans durant les services d'un chef de projet, un « Monsieur éclipse », en la personne de Joël Minois.

3.1. Les lunettes spéciales éclipse

L'AFA avait fait le pari d'une distribution massive et gratuite de lunettes spéciales en polyester aluminé (dites en Mylar®) au plus grand nombre. Faute de subvention des pouvoirs publics et de sponsors, les circonstances en ont décidé autrement. La SAF prônait quant à elle le verre de soudeur de grade 13 ou 14 qui semblait à ses yeux le seul moyen de cumuler la protection oculaire et la qualité de la vision. Là encore, il est vite devenu évident que la solution n'était pas réaliste pour de simples problèmes de production industrielle. Suite à l'arrivée

1. Désormais association Planète Sciences.

sur le marché de polymère noir de nouvelle génération, la SAF s'est naturellement orientée vers des protections à base de ce produit dont le prix de revient était significativement plus élevé que celui des protections en polyester aluminé. Suite à des réunions des deux parties organisées en partenariat avec le secrétariat d'État à la Santé, un protocole d'accord dit « protocole du 12 avril » a finalement été conclu au printemps 1999 stipulant que le prix de vente à l'unité ne pourrait excéder 5 francs TTC (soit 0,76 euro TTC). Ce protocole n'apportait par ailleurs aucune exigence technique particulière en plus de celles nécessaires à l'obtention du label CE.

On a pu lire ou entendre parler ici ou là au sujet de la fameuse « guerre des lunettes ». De fait, les deux associations étaient bien trop sur les charbons ardents pour perdre du temps à s'entredéchirer. Il est question de 11 millions de lunettes en film polyester aluminé[2] d'un côté (AFA) et de 6,4 millions de lunettes presque exclusivement en polymère noir[3] de l'autre (SAF), sans parler des lunettes massivement achetées dans l'urgence par les ministères auprès d'un intermédiaire colombien, soit semble-t-il 3 millions d'unités pour le ministère de la Jeunesse et des Sports et 1 million d'unités pour le secrétariat d'État à la Santé, et des productions des lunetiers indépendants. Ce seraient donc au bas mot 22 millions de lunettes, voire même selon certaines sources dignes de foi 35 millions d'unité, distribuées uniquement sur la France. Il faut bien se rendre compte de ce que représente cette quantité astronomique. Si l'on prend comme hypothèse que l'épaisseur d'un film de polyester ou de polymère est de 300 µm, 1 million de lunettes représente en épaisseur cumulée une colonne de 300 mètres de haut, soit la hauteur de la tour Eiffel !

3.2. Les timbres et billets de banque

À l'initiative de la SAF, un timbre-poste émis par La Poste a été spécialement édité en France à cette occasion. Sa mise en vente anticipée « Premier Jour » a été faite dans le cadre du Salon PhilexFrance 99 le 8 juillet 1999. Le Royaume-Uni n'est pas en reste car une planche de sept timbres illustrant les différentes phases du phénomène observé depuis l'île Anglo-Normande d'Aurigny a également été émise par le *Guernsey Post Office*.

La Roumanie, qui s'enorgueillissait de receler le lieu situé près de Bucarest pour lequel la durée de la totalité était maximale, a émis un

2. Le terme exact est aluminisé (recouvert d'une couche d'aluminium).
3. Dont 500 000 modèles Zeiss en polyester aluminé, le stock mondial de polymère noir étant épuisé !

magnifique billet de banque de 2000 lei représentant au verso la trajectoire de l'ombre sur ce pays.

Cette liste de produits fiduciaires n'est évidemment pas exhaustive.



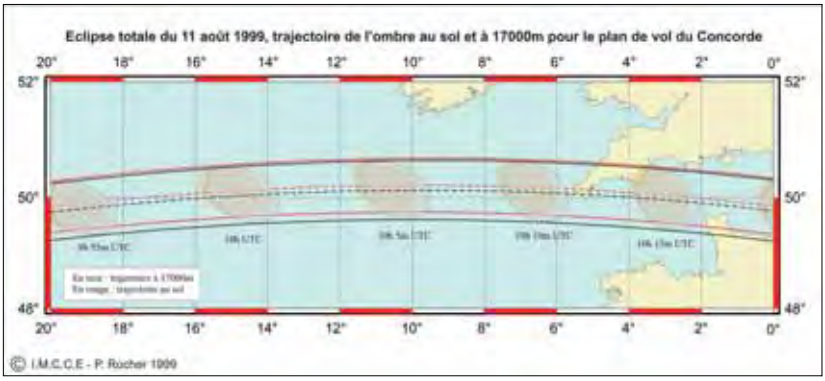
Extrait de la notice philatélique Premier Jour.© La Poste.

3.3. Le Train de l'éclipse

La SAF avait mandaté la société RJK-Resulcom S.A. pour monter une stratégie de communication autour de l'événement. Dans ce cadre, cette société a affrété le Train Forum SNCF, dit « Train de l'éclipse ». Ce train a sillonné la France du 16 juin au 2 juillet 1999 en passant par 13 villes étapes. Une exposition pédagogique réalisée sous la houlette de la SAF, par ailleurs largement diffusée à 200 exemplaires auprès des mairies, bibliothèques, maisons de la culture, clubs d'astronomie, etc., accompagnait ce train.

3.4. Le Concorde

L'occasion était trop belle ! Rééditer pour le grand public fortuné l'expérience menée pour le compte d'un groupe de scientifiques lors de l'éclipse totale de Soleil mémorable du 30 juin 1973 à bord du prototype 001 de Concorde. Pour la circonstance, exceptionnelle il faut bien l'avouer, pas moins de trois supersoniques avaient été affrétés, l'un par l'AFA aux couleurs d'Air France, deux autres aux armoiries de British Airways. Mettant à profit la vitesse de croisière inégalée du supersonique volant à 17 000 mètres d'altitude, les passagers allaient pouvoir bénéficier d'un spectacle dont la durée serait portée à 8 minutes au lieu des 2 minutes pour un observateur immobile au sol, et avec l'assurance d'un ciel sans nuage.



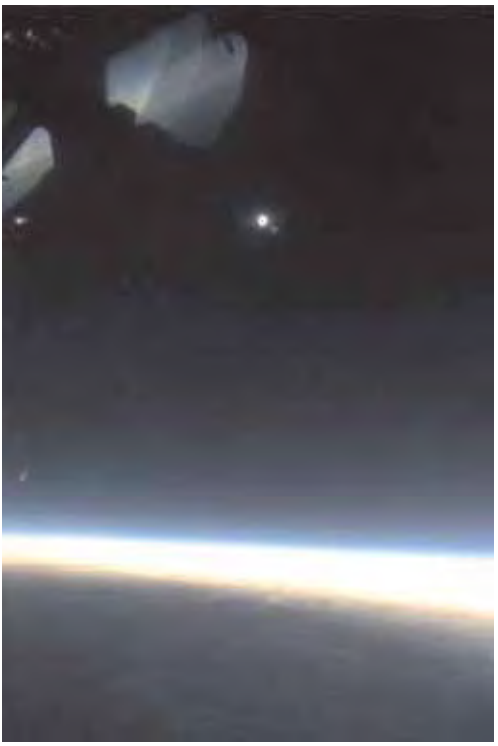
Trajectoire de l'ombre de la Lune à 17 000 m d'altitude et au sol.

Malgré ses 2200 km/h, le Concorde allait cependant vite être dépassé par l'ombre qui se déplaçait quant à elle à 3500 km/h et ne pourrait l'accompagner indéfiniment. Aux commandes de l'appareil français, Jean Prunin, après avoir amorcé un virage serré sur la droite, allait présenter son appareil de telle sorte qu'il pénètre dans le cône d'ombre par le sud-est et qu'il en ressorte par le nord-ouest, l'ayant traversé selon son grand axe. La trajectoire devait être d'une précision extrême ; la rencontre avec le cône d'ombre se jouait au kilomètre près, à la seconde près.

Un jeu de chaises musicales savamment orchestré par Alain Superbie (AFA) permettait à chacun des passagers d'un même rang d'occuper successivement le siège latéral droit pour y contempler la couronne solaire et le siège latéral gauche pour y observer l'ombre de la Lune se dessinant sur la couche nuageuse. Compte tenu de l'étroitesse et de l'épaisseur des hublots, de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, il avait été décidé, afin d'améliorer le confort de l'observation, d'incliner durant toute la durée de la phase totale l'appareil de 10° pour décrire à Mach 2,04 une large courbe sur la gauche. Au dire des participants, le spectacle fut grandiose. Les passagers des vols britanniques ont eu beaucoup moins de chance : navigant plus à l'ouest que le vol précédent, le Soleil y était vu plus bas sur l'horizon mais aussi plus à l'est, de fait trop dans l'axe, et du coup seul le personnel présent dans le cockpit a pu l'observer.

4. Le rôle des clubs d'astronomie

À peine moins important que celui des associations nationales, le rôle des clubs d'astronomie s'est matérialisé sur le terrain par l'implantation



L'éclipse du 11 août 1999 vue à bord du Concorde. Le Soleil éclipsé et son reflet dans la vitre du cockpit (juste au-dessous à droite) montrent la couronne externe et interne, comme prises avec deux temps de pose différents. Plus bas dans le ciel se trouve la planète Vénus. À l'horizon, la ligne bleue intense de la tropopause. Au sol, l'ombre de la Lune sur la couche nuageuse. Photo Vincent Coudé du Foresto. © Jean Prunin.

de sites d'observation ouverts au public, souvent relayés par le biais des points EclipseInfo99 pilotés par l'AFA et parfois renforcés par l'aide des correspondants régionaux de la SAF et/ou des animateurs ANSTJ. C'est surtout à eux que l'on doit l'accueil du public, la distribution de lunettes, etc. Une nouvelle activité a été inventée – en France – à cette occasion : celui de montreur d'éclipse.

5. Les observations professionnelles



Éclipse du 11 août 1999 observée à Mers-les-Bains (Somme). Chapelet obtenu par montage de clichés personnels. © Guillaume Prévot – observatoire de Paris.

5.1. Observation à partir du sol (observatoire de Paris)

Pour la circonstance, l'observatoire de Paris avait déployé un dispositif assez conséquent en partenariat avec des établissements publics situés dans la bande de totalité, à savoir l'Université de Technologie de Compiègne, d'une part, et l'Université de Reims, d'autre part. Situés au-delà de sa limite australe, les campus parisien et meudonnais qui allaient connaître une forte éclipse partielle accueillaient le public auquel il était proposé une distribution de lunettes spéciales afin de permettre l'observation du phénomène sans le moindre risque et la retransmission en temps réel sur écran géant des observations effectuées sur les sites ci-dessus mentionnés ainsi que les observations radio de Nançay situé plus au sud.

Sur le site de Compiègne, la mission de l'observatoire de Paris était équipée d'une caméra CCD de grand format 1536 × 1024 pixels^2 sur 12 bits permettant d'étudier la couronne jusqu'à 4 ou 5 rayons solaires en lumière blanche, et d'une caméra vidéo numérique observant dans la raie verte du fer ionisé 13 fois, c'est-à-dire ayant perdu 13 électrons (Fe XIV à 530,3 nm). Sur le site de Reims, la mission de l'observatoire de Paris était équipée d'une caméra vidéo analogique observant en lumière blanche, avec numérisation du signal en temps réel au format 720 × 512 pixels^2 sur 8 bits, et d'une chambre photographique grand format. Ces deux missions étaient placées sous la conduite de Jean-Marie Malherbe (LESIA).

Meudon

Sur le site de Meudon, le maximum de l'éclipse avait lieu à 10 h 22 min 38 s UT avec une grandeur maximale très appréciable de 0,990. La météo très capricieuse a cependant eu l'indulgence d'autoriser quelques clichés en lumière blanche ainsi que dans les raies Hα de l'hydrogène neutre (H I) et K 1, K 3 du calcium ionisé (Ca II), émises à différents niveaux de la chromosphère, radiations dans lesquelles cette dernière peut par conséquent être analysée au sol.



Image Hα obtenue au spectrohéliographe de l'Observatoire de Paris-Meudon à 10 h 03 min UT, soit une vingtaine de minutes avant le maximum de l'éclipse du 11 août 1999. L'observation a été longtemps compromise par un ciel assez nuageux. © LESIA – observatoire de Paris.

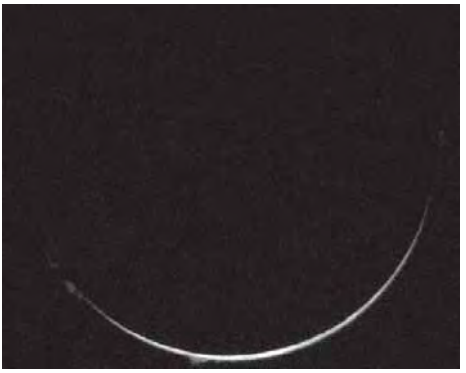


Image Hα obtenue à l'héliographe à filtre de Lyot de l'Observatoire de Paris-Meudon, vers le maximum de l'éclipse du 11 août 1999. À Meudon, l'éclipse était visible comme partielle avec une grandeur maximale de 0,990. © LESIA – observatoire de Paris.

Compiègne

L'Université de Technologie de Compiègne (UTC), située dans la bande de totalité de l'éclipse, était promise à une éclipse totale d'une durée de 2 min 05 s dont le maximum avait lieu à 10 h 23 min 39 s UTC avec une grandeur maximale de 1,009. Mais c'était sans compter avec les nuages ! Pas la moindre éclaircie au cours des 48 heures précédant l'événement n'aura permis la mise en station des instruments. Des murmures au cours de la phase partielle initiale de l'éclipse… Et c'est à peine si le public aura entrevu un croissant solaire. Le jour tombe tout d'abord progressivement… Puis tout s'accélère. Ça y est, le couvercle est mis ! « *Début de la totalité, vous pouvez enlever vos lunettes* ! » Une annonce sonore durant la totalité : horizon ouest… Et le public de tourner la tête comme un seul homme pour apercevoir un horizon mordoré en limite du cône d'ombre. Qui a rallumé la lumière ? « *Fin de la totalité, remettez vos lunettes* ! » Tir terminé… (voir la variation de luminosité sur les photos page suivante.)

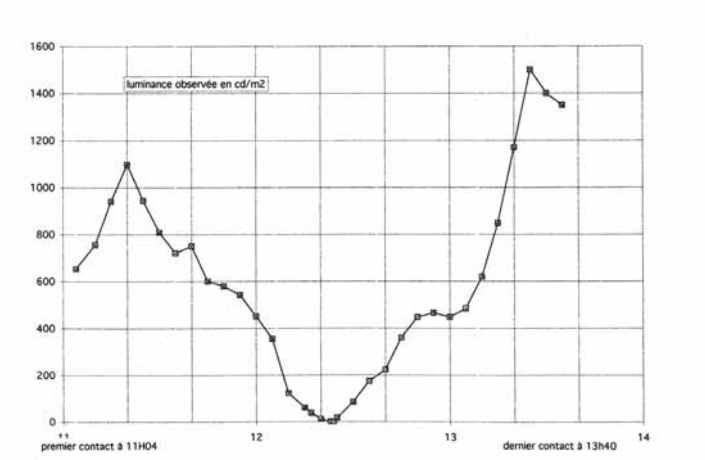
Peut-on conclure pour autant à un échec cuisant de la mission ? Certainement pas. Si les scientifiques en ont été quittes pour recueillir des résultats scientifiques, le public n'a pas boudé son plaisir d'avoir vécu un temps fort riche d'enseignements.

Reims

L'Université de Reims, également située dans la bande de totalité de l'éclipse, allait connaître une éclipse totale d'une durée de 2 min 04 s dont le maximum avait lieu à 10 h 25 min 38 s UTC avec une grandeur maximale de 1,008. Malgré la menace omniprésente des nuages, cette fois l'observation a pu avoir lieu, et quelle observation ! Qu'une déchirure se crée dans la couche nuageuse, et c'est l'extase. On a beau s'y attendre, ça vous « prend aux tripes ». C'est alors que le plus dur reste à faire : mettre l'image dans la « boîte ». Si l'acquisition est cruciale,



(a)



(b)

(a) Variation de luminosité observée sur le site de l'Université de Technologie de Compiègne. Ces clichés sont extraits d'une séquence vidéo tournée au moyen d'un caméscope Hi8 dont les automatismes ont été débrayés assurant ainsi une exposition constante en mode manuel. C'est au voisinage des contacts que la variation de luminosité est la plus vertigineuse. Durant la totalité, seule la lueur de l'écran informatique reste perceptible.
T_0 étant l'instant du maximum de l'éclipse, les images sont prises à : T_0 – 20 min, T_0 – 15 min, T_0 – 10 min, T_0 – 5 min, T_0 – 3 min, T_0 – 2 min, T_0 – 1 min (2^e contact), T_0 (maximum), T_0 + 1 min (3^e contact), T_0 + 2 min, T_0 + 3 min, T_0 + 5 min, T_0 + 10 min, T_0 + 15 min, T_0 + 20 min.
© Daniel Crussaire – observatoire de Paris.
(b) Relevé de luminance effectué par les étudiants de l'UTC sous un ciel plombé.

l'instant est fugitif. Les secondes s'égrainent et il s'agit de ne pas céder à la panique. D'aucuns ont vu les observateurs les plus aguerris perdre tous leurs moyens. Loi de Murphy oblige, une opération maintes fois répétée échouera précisément à cet instant-là. Cette fois, tout c'est bien passé, ouf !

Nançay

La station de radioastronomie de Nançay en Sologne a également participé à la campagne d'observation de l'observatoire de Paris. L'éclipse s'y présentait visible comme partielle avec une grandeur maximale de 0,949 et s'est déroulée sous un ciel dégagé. Mais le domaine radio, contrairement au domaine optique, n'a que faire des conditions météorologiques. En effet, les nuages ne sont pas opaques aux ondes radio, et



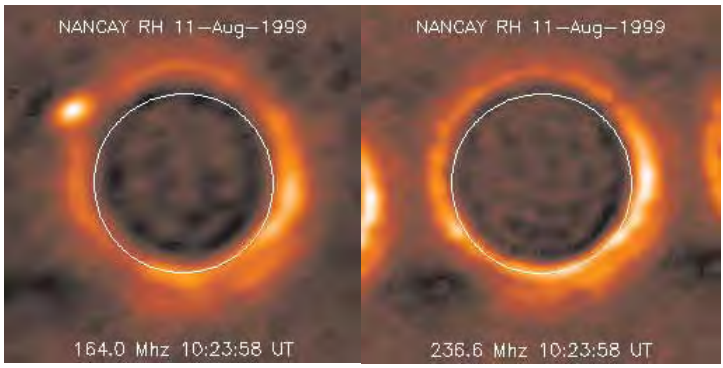
Groupe d'observateurs à l'université de Reims. © Frédéric Dauny – observatoire de Paris.



Éclipse observée en lumière blanche à Reims (image recadrée non traitée). Chambre 13 × 18, F = 360 mm, pose 1 s à F / D = 8 sur plan film Kodak Vericolor II à 10 h 25 min 26 s UT. © Philippe Déchy – observatoire de Paris.

l'observation à ces longueurs d'onde reste possible dans certaines limites même par temps couvert ou pluvieux, ce qui fut le cas ce 11 août 1999. En témoignent ces deux images extraites de séquences

temporelles obtenues au radiohéliographe de Nançay, aux fréquences 164,0 MHz et 236,6 MHz. La couronne qui est seule observable en ondes radio déborde largement au-delà du disque obscur de la Lune, légèrement excentré par rapport au cercle blanc représentant le diamètre apparent du Soleil (en lumière visible).



Éclipse partielle observée en ondes radio au radiohéliographe de Nançay. Les « oreilles » qui apparaissent sur l'image de droite sont dues à des artefacts. L'anneau brillant est dû à l'émission radio de la couronne solaire. À gauche : 164,0 MHz à 10 h 24 min UT ; à droite : 236,6 MHz à 10 h 24 min UT. © LESIA – observatoire de Paris.

Iran

Une mission scientifique (IAP-CNRS / IAS / LAS / SAF : INSU) placée sous la conduite de Serge Koutchmy de l'Institut d'astrophysique de Paris a pu se rendre à Chadegan en Iran, où les conditions météorologiques étaient les plus propices, dans le cadre d'une collaboration scientifique avec l'université de Tabriz.



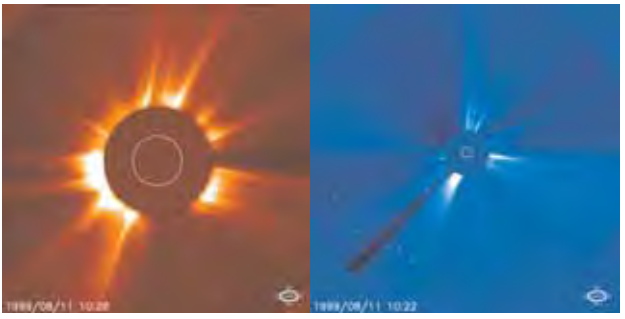
Grains de Baily, chromosphère et protubérances le 11 août 1999, observés en Iran. Demi-vue gauche : 2e contact ; demi-vue droite : 3e contact. © Institut d'astrophysique de Paris – CNRS.



Couronne à grand champ. © Institut d'astrophysique de Paris – CNRS.

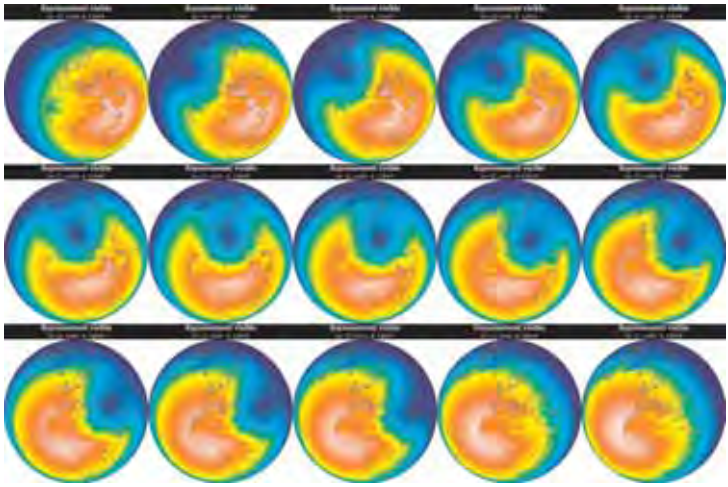
5.2. Observations à partir de l'espace

Placé au point de Lagrange L1, à 1,5 million de kilomètres de la Terre en direction du Soleil, le satellite solaire SoHO n'a pas connu d'éclipse, mais il a néanmoins permis d'analyser, grâce à ses coronographes LASCO C2 et C3, l'interaction pouvant exister entre les couches internes et externes de la couronne solaire. En effet, le fond de ciel empêche au sol l'observation de la couronne externe au-delà d'une certaine distance au Soleil tandis que les disques occulteurs de LASCO interdisent l'observation de la couronne interne en deçà d'un certain seuil.

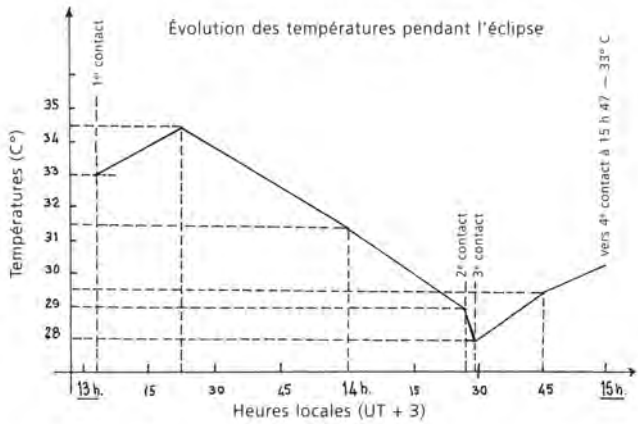


Couronne observée par l'instrument LASCO embarqué à bord de l'observatoire spatial SoHO. Une éclipse artificielle est créée au moyen d'un disque occulteur qui masque la photosphère afin de pouvoir enregistrer la couronne. Le diamètre apparent du disque solaire est indiqué par le cercle blanc. À gauche : coronographe C2 à 10 h 28 min UT ; à droite : coronographe C3 à 10 h 22 min UT. © ESA / NASA.

Le satellite Météosat placé en orbite géostationnaire a transmis des mesures de rayonnement visible. Le phénomène ne passe pas inaperçu ! Corrélativement, au sol, les températures ont accusé une baisse de 6 à 8 °C (6,5 °C mesuré à Amasya en Turquie).



Représentation en fausses couleurs du rayonnement visible émis par le globe terrestre, le 11 août 1999 de 11 h 30 min à 15 h 00 min heure locale à 15 minutes d'intervalle. En bleu : valeurs minimales ; en blanc : valeurs maximales. La tache bleue trahit la progression de l'ombre à la surface du globe. © Météo France.



Relevé de température effectué au moyen d'un thermomètre à mercure, par un membre de la mission SAF à Amasya (Turquie). © Jean-Pierre Cariat.

6. Les observations amateur

Nous nous contenterons de présenter quelques très belles réalisations de nos collègues de l'Observatoire de Paris et d'amateurs chevronnés férus de photographie astronomique.

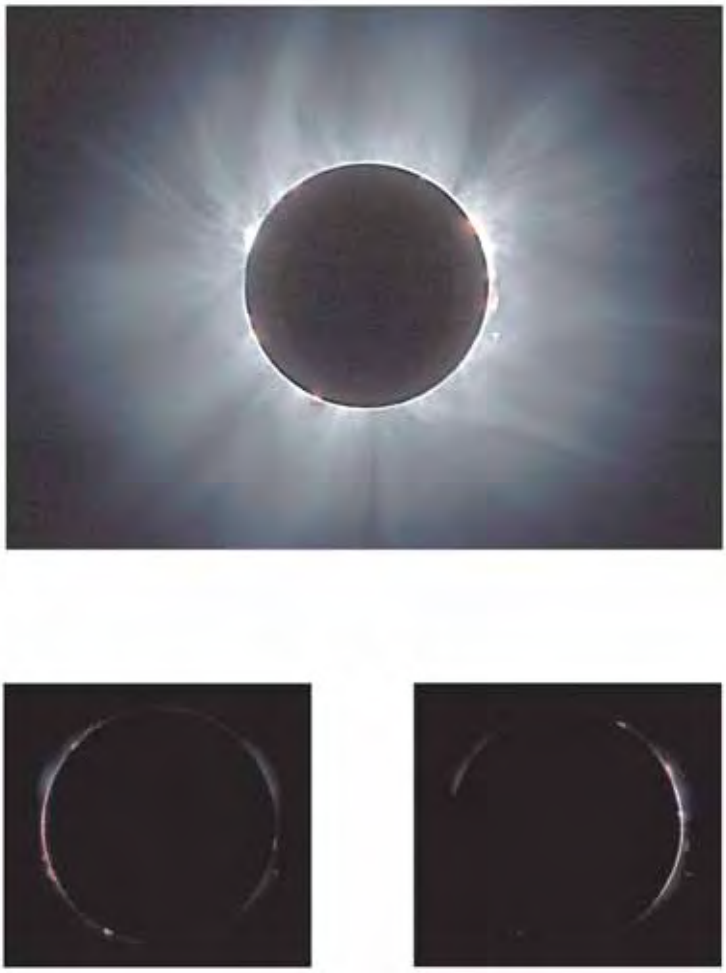


Nuages et Vénus dans le ciel d'éclipse du 11 août 1999. Photo réalisée à la Neuville-en-Hez (Oise). © Pierre, Nicole et Jean-François Mein.



Couronne du 11 août 1999 observée à Mers-les-Bains (Somme). Photo réalisée au moyen d'un téléobjectif de 300 mm et d'un doubleur de focale à F / D = 11 sur film négatif 24 × 36 mm Kodak Gold 200 ISO. Le pôle Nord céleste est vers le haut sur la gauche. © Guillaume Prévot.

Un concours photo avait été organisé par la SAF à l'occasion de la Rencontre internationale « Éclipses et couronne solaire » réunissant professionnels et amateurs qui s'est tenue à l'Institut d'astrophysique de Paris les 14 et 15 avril 2000. On peut juger de la qualité des travaux présentés à la valeur de l'une des photographies soumises au concours reproduite ci-après.



Éclipse du 11 août 1999 observée à Bourcq (Ardennes). Photos réalisées au moyen d'un objectif MTO de 1000 mm à F / D = 10 sur film inversible 24 × 36 mm Kodak Kodachrome 64 ISO. En haut : la couronne au voisinage du maximum obtenue par compositage, après traitement suivant la méthode de G. Pellet, de trois images numérisées à partir de deux poses de 1 s et d'une pose de 1/30^{e} s. En bas : la chromosphère au 2^{e} contact (à gauche) et au 3^{e} contact (à droite).
© Denis Fiel (SAF).

14

Les éclipses anciennes de Soleil

1. Le ralentissement de la Terre

Aussitôt que les astronomes eurent à leur disposition des théories de la Lune et du Soleil suffisamment précises, ils essayèrent de calculer et de tracer les zones de visibilité des éclipses anciennes décrites dans les textes antiques. Ils trouvèrent bien les éclipses de Soleil aux bonnes dates, mais ils s'aperçurent que les zones de visibilité qu'ils calculaient ne correspondaient pas aux zones d'observation des éclipses. E. Halley en 1693, puis R. Dunthorne en 1749, avancèrent l'idée que la Lune n'était pas à sa bonne position. Pour rendre cohérents les calculs d'éclipses et les observations, on introduisit une accélération séculaire dans la théorie de la longitude de la Lune. Par la suite les mécaniciens célestes essayèrent de trouver une explication théorique à ce phénomène mais ils trouvèrent des explications théoriques qui n'expliquaient qu'en partie la valeur de cette accélération. En 1866, W. Ferrel et Ch.-E. Delaunay vont émettre l'hypothèse d'un ralentissement de la rotation terrestre sous l'effet des marées océaniques ; ce ralentissement contrebalancerait l'accélération qui apparaît dans l'observation du mouvement de la Lune. Ce ralentissement fut mis en évidence par Spencer Jones en 1926 et 1939, mais il faudra attendre la deuxième moitié du XX^{e} siècle pour que l'on considère le phénomène réciproque, à savoir, l'influence des marées océaniques sur l'orbite lunaire et que l'on définisse complètement

le problème. En réalité, l'accélération séculaire observée dans le mouvement de la Lune est la combinaison de trois termes : une accélération séculaire gravitationnelle due aux perturbations planétaires, une accélération séculaire due aux marées océaniques et une accélération séculaire fictive due au ralentissement de la rotation terrestre. Cette dernière accélération disparaît lorsqu'on utilise une échelle de temps uniforme (non liée à la rotation de la Terre). L'accélération séculaire gravitationnelle se calcule à partir des perturbations planétaires, l'accélération séculaire due aux marées océaniques est déterminée à partir des mesures lasers des distances Terre-Lune. Le ralentissement de la rotation terrestre se calcule grâce aux éclipses anciennes.

1.1. Les échelles de temps

La rotation de la Terre autour de son axe a été longtemps considérée comme uniforme et a fourni une échelle de temps unique, le Temps universel (UT ou TU). La mise en évidence du ralentissement de la rotation terrestre par Spencer Jones a rendu nécessaire l'introduction à partir de 1960 d'une nouvelle échelle de temps, le Temps des éphémérides (TE). Cette échelle de temps est fonction de la révolution de la Terre autour du Soleil, cette révolution est très stable et elle fournit une meilleure réalisation d'un temps uniforme. Depuis 1967, cette échelle de temps a été remplacée par une échelle encore plus stable le Temps atomique international (TAI). Le temps civil actuel est encore basé sur la rotation de la Terre, il porte le nom de Temps universel coordonné (UTC) et n'est donc pas un temps uniforme. On ajoute assez régulièrement une seconde de temps pour compenser le ralentissement terrestre.

1.2. L'usage des éclipses anciennes

Les théories des corps du système solaire utilisent comme argument du temps, une échelle de temps uniforme liée au Temps atomique international appelée temps terrestre (TT). Pour connaître la portion du globe terrestre concerné par une éclipse, il faut connaître l'écart entre cette échelle de temps (TT) et l'échelle de temps non uniforme liée à la rotation de la Terre, le Temps universel (TU). Inversement pour une éclipse ancienne, l'écart entre la zone de visibilité calculée avec le Temps terrestre uniforme et les lieux d'observations effectifs de l'éclipse nous donne une approximation de l'écart (TT-TU) entre les deux échelles de temps. Un travail très important, portant sur de très nombreuses éclipses de Lune et de Soleil allant de l'an 763 avant J.-C.

jusqu'à nos jours a été réalisé par F.R. Stephenson et a permis de modéliser, pour le passé, les écarts entre le temps terrestre et le Temps universel.

2. Les sources anciennes

Les éclipses anciennes, de Lune et de Soleil, proviennent de quatre sources principales : les Babyloniens de 700 avant J.-C. à 50 avant J.-C., les Chinois de 700 avant J.-C. à 1500 après J.-C., les Européens de 500 avant J.-C. à 1600 après J.-C. et les Arabes de 800 après J.-C. à 1300 après J.-C. Certaines sources bien que remontant très loin dans le temps n'ont été connues que très récemment, c'est le cas notamment des sources babyloniennes et assyriennes que l'on ne sait déchiffrer que depuis le milieu du XIX^{e} siècle.

Un des premiers astronomes à répertorier les éclipses anciennes fut Claude Ptolémée (milieu du II^{e} siècle). À cette occasion il créa une chronologie, l'ère de Nabonassar (le vrai nom est Nabu-nasir) qui débuta en l'an 747 avant J.-C. et qui utilise l'année vague égyptienne de 365 jours. Ptolémée cite dans l'*Almageste* 10 éclipses de Lune observées par les Babyloniens et aucune éclipse de Soleil, les plus vieilles éclipses de Lune datant de 721 et 720 avant J.-C. Toutes les autres éclipses de Soleil et de Lune observées par les Babyloniens ou les Assyriens proviennent de tablettes écrites en caractères cunéiformes.

La datation exacte de ces éclipses anciennes n'était pas une chose facile à réaliser avant que l'on ne connaisse le ralentissement de la rotation terrestre. En effet pour les dates indiquées, les éclipses calculées ne passaient pas par les lieux d'observations. Par exemple dans le cas de l'éclipse dite de Thalès, éclipse qui selon la légende rapportée par Hérodote dans l'*Enquête*, aurait été prédite aux Ioniens par Thalès, les astronomes et les historiens ont longtemps hésité entre plusieurs dates. Ainsi Eusèbe et Cicéron la plaçait en –584 (585 av. J.-C.), Scaliger en –582 (583 av. J.-C.) et Arago en –609 (610 av. J.-C.). Les astronomes anglais Airy et Fotheringham hésitèrent entre l'éclipse du 17 mai –602 (603 avant J.-C.) et celle du 28 mai –584 (585 avant J.-C.) avec une préférence pour la deuxième date. De nos jours, la bonne connaissance de l'écart entre le TT et le TU et la grande précision des théories planétaires et lunaire permettent de confirmer la deuxième date, l'éclipse de –602 passant sur l'Asie Mineure.

La figure 14.1 nous montre les tracés des bandes de centralité des éclipses du 28 mai –584 et du 17 mai –602, et ceux des bandes de totalité des éclipses situées trois et six saros avant l'éclipse de –584. Certains historiens avaient émis, à tort, l'hypothèse que la prédiction de Thalès

était possible car il aurait eu connaissance de l'éclipse homologue ayant eu lieu trois saros plus tôt. Comme on le constate, cette éclipse passe bien plus au nord, suite au décalage en latitudes des éclipses homologues des suites longues d'éclipses.

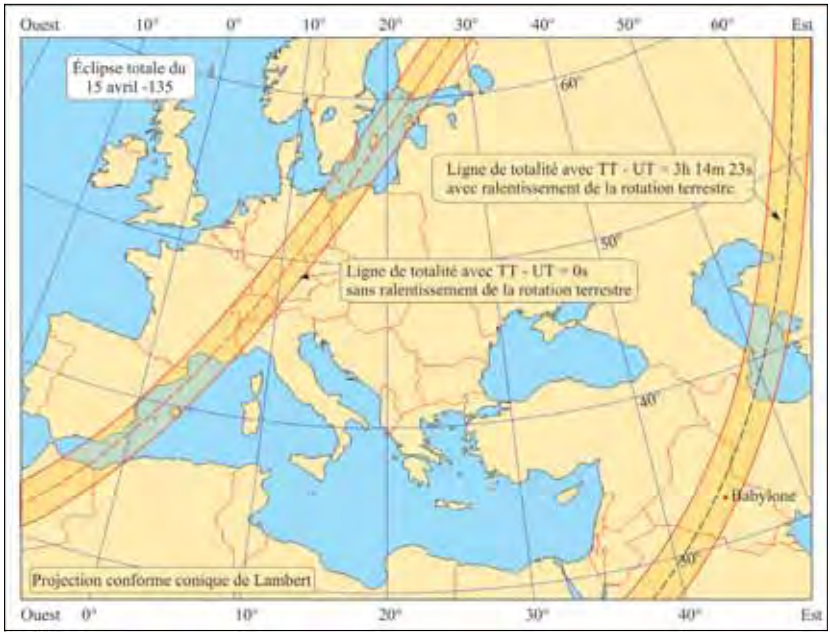


Figure 14.1. L'éclipse de Thalès et les éclipses homologues.

3. Exemple de la détermination du ralentissement de la rotation terrestre

3.1. L'éclipse de –135 à Babylone

L'éclipse du Soleil du 15 avril –135 (136 avant J.-C.) est décrite dans deux textes cunéiformes écrits sur des tablettes d'argile se trouvant au British Museum. Outre la mention de l'éclipse, un des textes atteste la visibilité des planètes Mercure, Vénus et Jupiter au moment de l'éclipse. Si l'on ne tient pas compte du ralentissement de la Terre, la bande de centralité passe sur le sud de la France et l'Afrique du Nord. Pour faire passer l'éclipse, donc la bande de centralité sur Babylone, nous avons pris une valeur de la différence Temps terrestre moins Temps universel égale à 3 h 14 min 23 s.



L'éclipse de Babylone.

4. La prédiction des éclipses

Une simple observation d'éclipses permet de constater que les éclipses de Lune ont lieu uniquement à la pleine Lune et que les éclipses de Soleil ont lieu uniquement à la nouvelle Lune. La probabilité d'observer une éclipse de Lune en un lieu donné est beaucoup plus forte que la probabilité d'observer une éclipse de Soleil. On pense que les Babyloniens surent très tôt que les éclipses de Lune étaient séparées par cinq ou six lunaisons. Une des plus vieilles prédictions que l'on ait retrouvée date de 731 avant J.-C. et concerne l'éclipse de Lune du 9 avril 731 avant J.-C., le texte précise même que l'éclipse ne sera pas observable car la Lune ne sera pas levée. Des tablettes babyloniennes datant de 475 avant J.-C., contenant des éphémérides de la Lune, donnent dans une colonne un paramètre, qui correspond à la distance entre le centre de la Lune et le centre du cône d'ombre de la Terre, et qui permet de calculer la possibilité des éclipses de Lune. Sur d'autres tablettes figurent également des prédictions d'éclipses de Lune sur une période de 126 ans répartie en périodes de 223 lunaisons correspondant à la période de récurrence des éclipses. Dans chaque saros, 38 éclipses de Lune sont réparties en cinq suites courtes de 8, 8, 7, 8 et 7 éclipses, les éclipses étant espacées entres elles dans les suites par six lunaisons et les suites courtes étant espacées entres elles par cinq lunaisons.

En Chine, on a trouvé les règles du saros chinois pour déterminer les éclipses de Lune dans des textes datant de l'époque de la période des Hans. On ne sait pas si la prédiction des éclipses de Soleil à l'aide du saros date des mêmes époques. La vérification par l'observation de la pertinence du saros pour les éclipses de Soleil étant quasi impossible en raison de la très faible probabilité d'observer une éclipse de Soleil.
Il ne faut surtout pas perdre de vu les faits suivants : le saros permet uniquement de déterminer la date d'une éclipse de Soleil, il ne permet pas de savoir où l'éclipse est observable. La détermination de la visibilité d'une éclipse de Soleil, en un lieu donné, nécessite la connaissance de la parallaxe lunaire et de la position de la Lune au demi-degré près, choses impossibles avant Ptolémée donc avant le milieu du II^{e} siècle.

5. Intérêts scientifiques des éclipses de Soleil

La liste suivante contient une série de découvertes scientifiques liées aux éclipses de Soleil depuis le XIX^{e} siècle.

- En 1836 : F. Baily[1] donne une première description des points brillants qui apparaissent en début et en fin de la totalité.
- En 1842 : F. Baily introduit le nom de couronne solaire et attribue la couronne au Soleil, et non pas à la Lune.
- En 1851 (28/07) : première photographie d'une éclipse de Soleil (daguerréotype).
- En 1860 (18/07) : première photographie montrant des protubérances solaires, les protubérances appartiennent bien au Soleil. Durant cette éclipse on mit également en évidence la polarisation radiale de la lumière coronale.
- En 1868 (18/08) : début de l'analyse spectrale de la couronne et découverte de l'hélium (Janssen, Rayet et Pogson), l'hélium ne sera découvert sur Terre par Ramsay qu'en 1895.
- En 1869 : découverte d'une raie d'émission verte, le nouveau corps est appelé le coronium. Ce nouveau corps n'existe pas, et en fait, on avait observé le spectre d'éléments lourds fortement ionisés.
- En 1870 : découverte du spectre-éclair par T. Young, au moment de la totalité. Le spectre ordinaire du Soleil, avec ses raies sombres, disparaît et est remplacé par une multitude de raies brillantes.

1. Ne pas confondre Francis Baily (1774–1844) avec Jean-Sylvain Bailly (1736–1793).

- En 1872 : première observation des plumes, houppe des rayons polaires de la couronne, qui évoquent l'idée des lignes d'un champ magnétique.
- En 1878 : observations de rayons coronaux jusqu'à 6° du Soleil et connexion de la couronne interne (dite couronne K) avec la lumière zodiacale.
- 1901-1905-1908 : pour expliquer l'avance du périhélie de Mercure, recherche infructueuse durant les éclipses d'une nouvelle planète proche du Soleil.
- 1919 (19/05) : tentative de vérification de la relativité générale (courbure de l'espace) au voisinage du Soleil, les résultats de cette expérience, tout comme ceux de celle de 1922, ne sont pas probants.
- 1930 : l'invention du coronographe par B. Lyot permet d'observer la couronne solaire et les protubérances en dehors des éclipses totales.
- 1995 : lancement du satellite SoHO (Solar and Heliocentric Observatory) vers le point de Lagrange Terre-Soleil avec plusieurs coronographes équipés de caméra CCD pour l'imagerie permettant l'observation continue du Soleil et de sa couronne.

Malgré la très forte évolution technologique qui permet de nos jours de suivre l'état du Soleil en temps réel, les éclipses totales de Soleil sont encore indispensables à l'étude de la basse couronne. En effet, pour des raisons thermiques, les coronographes qu'ils soient embarqués dans des sondes spatiales ou qu'ils soient à Terre, ont un diamètre trop important pour permettre la visualisation de la basse couronne solaire.

Bibliographie

Les éclipses, P. Couderc, Que sais-je, PUF, 1961.

Historical Eclipses and Earth's Rotation, R. Stephenson, Cambridge, CUP, 1997.

15

La géométrie des éclipses de Lune

1. Le cône d'ombre et le cône de pénombre

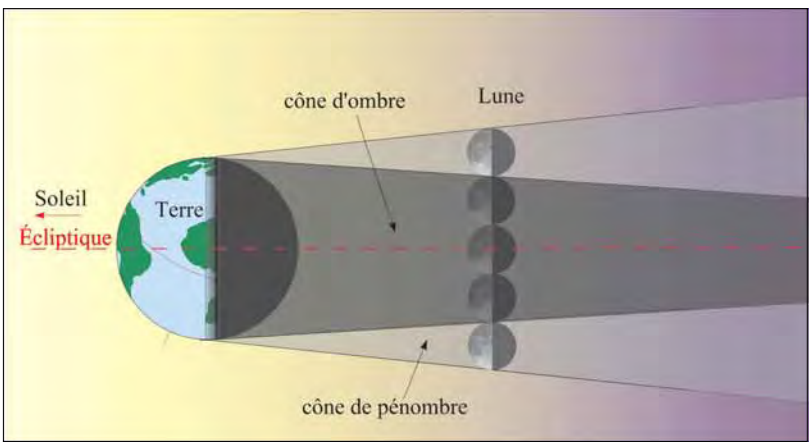


Figure 15.1. Cônes d'ombre et de pénombre de la Terre.

La Terre, éclairée par le Soleil, donne naissance, dans la direction opposée au Soleil à deux cônes, un cône d'ombre et un cône de pénombre. La droite joignant le centre du Soleil et le centre de la Terre

constitue l'axe de ces cônes. Le sommet Sp du cône de pénombre est situé sur cet axe entre le Soleil et la Terre, et le sommet So du cône d'ombre est également situé sur cet axe mais de l'autre côté par rapport à la Terre. Le cône d'ombre est construit à l'aide des tangentes extérieures aux sphères solaire et terrestre, le cône de pénombre est construit à partir des tangentes intérieures aux sphères solaire et terrestre.

La Terre étant environ quatre fois plus large que la Lune, son ombre est également quatre fois plus longue.

La distance entre le sommet du cône d'ombre et le centre de la Terre varie en fonction de la distance Terre-Soleil. Elle est maximale, environ 231 rayons terrestres, lorsque la Terre est à son aphélie (actuellement vers le 4 juillet). Elle est minimale, environ 221 rayons terrestres, lorsque la Terre est à son périhélie (actuellement vers le 4 janvier). En cas d'éclipse de Lune, la Lune traverse le cône d'ombre terrestre au quart de sa longueur depuis la Terre, car la longueur Terre-Lune est égale à la longueur du cône d'ombre de la Lune. En cet endroit la largeur de la section du cône d'ombre de la Terre est de l'ordre des trois quarts de sa base, donc des trois quarts du diamètre terrestre, soit environ trois disques lunaires comme indiqué sur la figure 15.1.

De même la taille de la largeur de la couronne de pénombre de la Terre, à l'endroit où elle est traversée par la Lune, est simple à évaluer. En effet, comme on le voit sur la figure 15.2 c'est la largeur de la Lune elle-même, l'angle π des tangentes sud est égal au diamètre apparent du Soleil, qui est lui-même presque égal au diamètre apparent de la Lune. Donc une éclipse de Lune par la pénombre peut être totale.

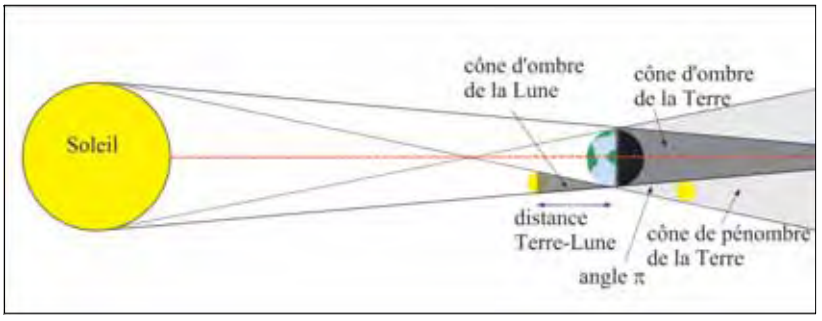
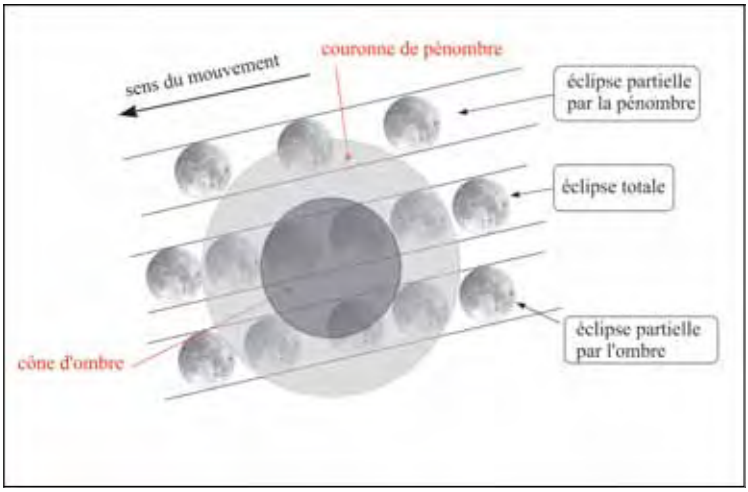


Figure 15.2. Cônes d'ombre et de pénombre de la Terre, détails. Les proportions ne sont pas respectées, le Soleil devrait être 400 fois plus gros que la Lune et 400 fois plus loin.

2. Les différents types d'éclipses de Lune

Comme nous l'avons vu précédemment, la section du cône d'ombre au niveau de l'orbite de la Lune est largement supérieure au diamètre



Les différents types d'éclipses de Lune.

apparent de la Lune (environ trois diamètres lunaires), la Lune peut donc être totalement éclipsée par l'ombre de la Terre et dans ce cas l'éclipse de Lune est dite totale.

Lorsqu'une partie seulement de la Lune passe dans le cône d'ombre de la Terre, la Lune n'est que partiellement éclipsée, l'éclipse est dite partielle par l'ombre.

Nous avons vu également que la taille de la couronne de pénombre était de la taille du diamètre apparent du Soleil et pouvait être supérieure au diamètre apparent de la Lune (Terre au périhélie et Lune à l'apogée). Dans ce cas, la Lune peut passer entièrement dans la couronne de pénombre, et l'éclipse de Lune est dite totale par la pénombre. Lorsque la Lune passe partiellement dans la couronne de pénombre il y a éclipse partielle de la Lune par la pénombre.

3. Caractéristiques des cônes d'ombre et de pénombre

Comme nous l'avons déjà constaté, la distance entre le centre de la Terre et le sommet du cône d'ombre dépend de la position de la Terre et donc sa longueur varie en fonction de la distance Terre-Soleil. Elle vaut environ 231 rayons terrestres lorsque la Terre est à l'aphélie et elle vaut 221 rayons terrestres lorsque la Terre est à son périhélie.

De même la distance entre le sommet du cône de pénombre et le centre de la Terre dépend de la distance Terre-Soleil, elle est maximale,

environ 216 rayons terrestres lorsque la Terre est à son aphélie et elle est minimale, environ 209 rayons terrestres, lorsque la Terre est à son périhélie.

4. Demi-diamètres apparents géocentriques de l'ombre et de la pénombre

Sur la figure 15.3, le demi-diamètre apparent géocentrique de la section de l'ombre de la Terre par le plan normal à l'orbite lunaire est égal à l'angle ρ. L'ombre est déterminée par le cône de révolution d'axe ST et de génératrice BO, tangente extérieure au Soleil et à la Terre. Dans le triangle TOB la somme des angles intérieurs π_s et π_L est égale à la somme des angles extérieurs s et r. Or par définition π_s est la parallaxe horizontale du Soleil, π_L la parallaxe horizontale de la Lune et s_S est le demi-diamètre apparent du Soleil. Donc ρ est égale à $\pi_s + \pi_L - s_S$.
Ce demi-diamètre ρ est donc maximal lorsque la parallaxe lunaire π_L est maximale et le demi-diamètre apparent s_S minimal (la parallaxe π_s du Soleil étant pratiquement constante), c'est-à-dire lorsque la Lune est à son périgée et lorsque la Terre est à son aphélie. De même ce demi-diamètre ρ est minimal lorsque la parallaxe lunaire est minimale et le demi-diamètre apparent du Soleil maximal, c'est-à-dire lorsque la Lune est à son apogée et la Terre à son périhélie.

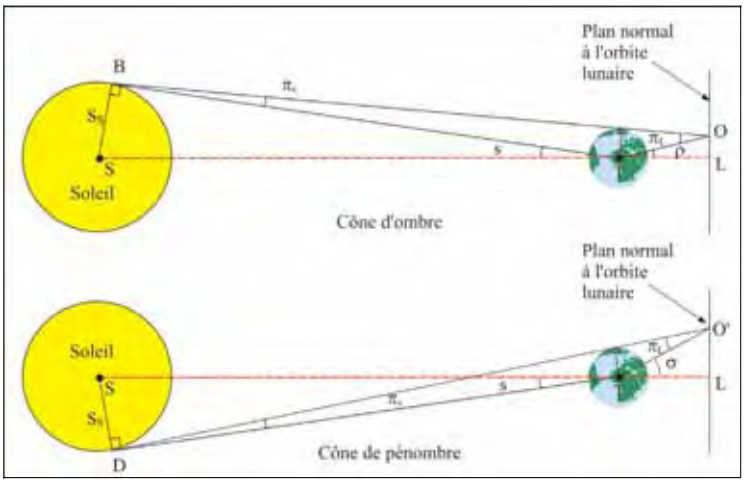


Figure 15.3. Demi-diamètres apparents géocentriques de l'ombre et de la pénombre.

On peut faire un raisonnement analogue pour le calcul du demi-diamètre apparent géocentrique du cône de pénombre σ. On trouve que

σ est égal à $\pi_s + \pi_L + s_S$. Ce demi-diamètre σ est donc maximal lorsque π_L et s_S sont maximales, donc lorsque la Lune est à son périgée et la Terre à son périhélie et il est minimal lorsque π_L et s_S sont minimales, donc lorsque la Lune est à son apogée et la Terre à son aphélie.
On remarquera que la largeur de la couronne de pénombre $\sigma - \rho$ est bien égale au diamètre apparent du Soleil ($2s_S$).

Le tableau 15.I donne les valeurs extrêmes et moyennes du demi-diamètre s_S apparent du Soleil, de la parallaxe lunaire π_L et du demi-diamètre apparent s_L de la Lune.

	Terre périhélie	Moyenne	Terre aphélie
s_S	16′ 18″	15′ 59,63″	15′ 46″
π_s	8,96″	8,80″	8,65″
	Lune périgée	Moyenne	Lune apogée
π_L	61′ 27″	57′ 02,7″	53′ 53″
s_L	16′ 45″	15′ 32,58″	14′ 41″

Tableau 15.I. Valeurs extrêmes et moyennes des parallaxes et des demi-diamètres apparents.

Le tableau 15.II donne les valeurs extrêmes et moyennes des demi-diamètres apparents géocentriques du cône d'ombre et du cône de pénombre.

	Minimal	Moyen	Maximal
ρ	2263,96″ = 37′ 43,96″ = 2,57 s_L	2471,87″ = 41′ 11,87″ = 2,65 s_L	2749,66″ = 45′ 49,66″ = 2,74 s_L
σ	4187,65″ = 1° 09′ 47,65″ = 4,75 s_L	4391,13″ = 1° 13′ 11,13″ = 4,71 s_L	4673,96″ = 1° 17′ 53,96″ = 4,65 s_L

Tableau 15.II. Valeurs extrêmes des demi-diamètres des cônes d'ombre et de pénombre.

On va voir que ces quantités doivent être augmentées de 1/73 en valeur relative pour ρ et de 1/128 en valeur relative pour σ afin de tenir compte de l'atmosphère terrestre.

5. Les effets géométriques de l'atmosphère terrestre

Contrairement aux éclipses de Soleil où l'ombre et la pénombre sont générées par un astre sans atmosphère, dans le cas des éclipses de Lune nous devons tenir compte des effets de l'atmosphère terrestre dans les calculs des limites de l'ombre et de la pénombre de la Terre.

Le trajet géométrique des rayons lumineux est soumis à la réfraction atmosphérique. L'atmosphère terrestre n'a pas de limite déterminée, on adopte une limite supérieure pour laquelle la réfraction atmosphérique n'a plus d'effets sensibles. Notre connaissance actuelle des répartitions des densités dans l'atmosphère suivant la verticale, ainsi que des mesures effectives de l'ombre de la Terre durant des éclipses de Lune, nous conduisent à prendre 75 km pour valeur limite. Cela se traduit dans les calculs par une augmentation du rayon terrestre de 1/85 en valeur relative. D'autre part la parallaxe de la Lune doit être une valeur moyenne et non pas la parallaxe horizontale, on prend donc la parallaxe lunaire à 45° de latitude ce qui se traduit dans les calculs par une diminution de la parallaxe lunaire de 1/594 en valeur relative. Si l'on tient compte de ces deux corrections, la valeur de la parallaxe horizontale doit être systématiquement augmentée de 1 %. Cela entraîne une augmentation du demi-diamètre géocentrique apparent ρ de l'ombre de 1/73 et une augmentation du demi-diamètre géocentrique σ apparent de la pénombre de 1/128.

Connaissant la valeur de la réfraction à l'horizon (environ 35'), on peut calculer la distance du sommet cône d'ombre minimal, dans lequel on est sûr qu'il n'y aura aucune lumière solaire réfractée. On trouve une distance géocentrique du sommet de ce cône égale à environ 40 rayons terrestres. La distance Terre-Lune variant entre 56 et 63,8 rayons terrestres, on est certain que la Lune recevra toujours des rayons solaires réfractés par l'atmosphère.

6. Les effets lumineux de l'atmosphère terrestre

6.1. L'atténuation atmosphérique

Comme nous venons de le voir, en raison de la réfraction et des distances Terre-Lune, la Lune éclipsée reçoit toujours des rayons lumineux réfractés par l'atmosphère terrestre.

La réfraction est également la cause d'un phénomène d'atténuation. Sur la figure 15.4, considérons un rayon lumineux élémentaire, d'angle $d\tau$, issu du point M du disque solaire considéré plan (1). Ce rayon, suite à la réfraction atmosphérique, va illuminer la surface dS' située dans le plan de la Lune (2). En absence de réfraction, il illuminerait la surface dS. Dans les deux cas, le flux de lumière qui illumine ces deux surfaces est le même. Les surfaces n'étant pas égales, la surface dS' supérieure à dS est moins éclairée.

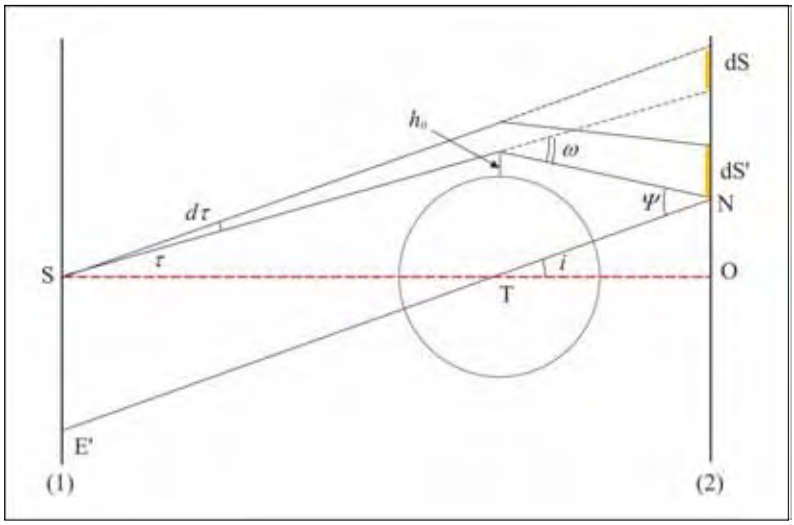


Figure 15.4. Atténuation due à la réfraction.

L'atténuation est donnée par le rapport des surfaces $dS/dS' = \Phi^{-1}$.

Le terme Φ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Phi = \frac{i}{\Psi}\left(1 - \frac{d\omega}{dh_0}\frac{1}{\pi_S + \pi_L}\right).$$

Cette formule comporte deux facteurs qui agissent en sens inverse, le premier diminue la surface éclairée (ds) et le deuxième élargit la surface éclairée (dS'), la combinaison des deux crée l'atténuation par réfraction. Pour imager notre propos, considérons la figure 15.5 dans laquelle un rayon cylindrique de largeur dS est réfracté suivant une surface (ds) plus petite si on considère que la réfraction ne varie pas avec l'altitude (premier terme de la formule) et qui est réfracté suivant dS' si on considère que la réfraction décroît avec l'altitude (deuxième terme de la formule). Le premier terme fait donc bien croître l'illumination et le second la fait décroître.

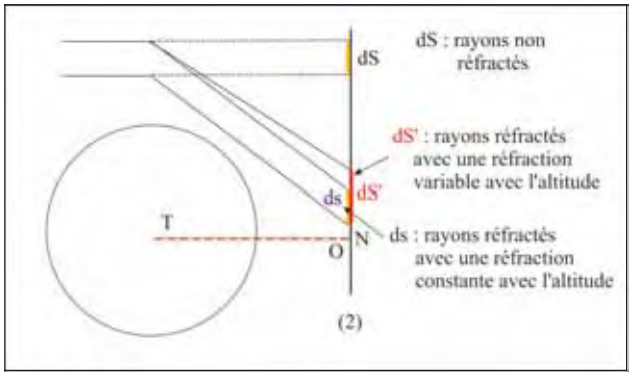


Figure 15.5. Variation de la réfraction avec l'altitude.

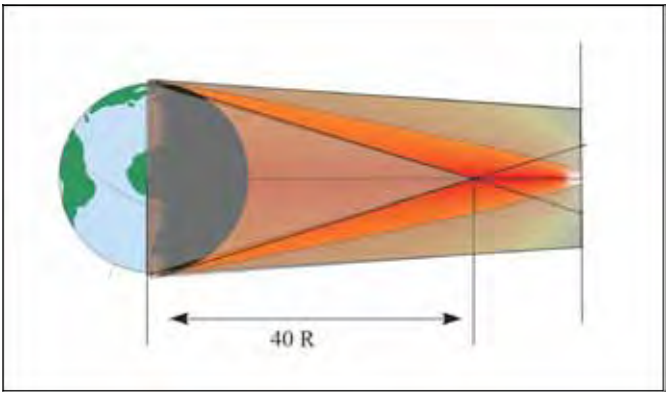
Si l'on exprime les variations de Φ en fonction de l'altitude h dans l'atmosphère, on s'aperçoit que c'est dans la haute atmosphère (troposphère) que l'atténuation est la plus appréciable malgré la faible valeur de la réfraction. Elle décroît ensuite jusqu'à la valeur 1, pour une altitude h d'environ 2 km, puis le phénomène s'amplifie et pour la valeur $i = 0$ il y a focalisation. De plus, on peut dire que l'atténuation par la réfraction est pratiquement neutre et que l'ombre est approximativement grise.

6.2. L'absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique est produite par la diffusion de la lumière par les molécules et les aérosols de l'air. L'absorption atmosphérique est très sensible à la longueur d'onde (c'est une loi en $1/\lambda^4$). La lumière bleue est donc plus absorbée que la lumière rouge, cette absorption croît avec la largeur de la couche atmosphérique traversée, ce qui explique le rougeoiement du ciel au coucher du Soleil. Dans le cas des éclipses de Lune, ce sont les rayons passant à faible altitude qui traversent la plus grande largeur d'atmosphère, ce sont donc ces rayons qui ont un maximum de lumière bleue absorbée et qui sont donc les plus rouges. Comme ce sont aussi ces rayons qui sont les plus réfractés, le centre de l'ombre aura un aspect rougeâtre.

Le degré d'absorption dépend également des conditions météorologiques, donc la luminosité de la partie centrale de l'ombre est très sensible aux conditions météorologiques régnant dans les couches atmosphériques traversées.

L'intensité lumineuse au centre du cône dépend également de la distance à laquelle se trouve la Lune, et les éclipses totales proches du périgée sont toujours plus sombres que les éclipses totales proches de l'apogée.



Limite des rayons réfractés (les couleurs ne sont pas réelles).



Éclipse totale du 9 janvier 2001. Phase totale, 12 min avant le maximum de l'éclipse. Pose 60 s de 20 h 08 min 06 s UTC à 20 h 09 min 06 s UTC. © Daniel Crussaire. LESIA - observatoire de Paris.

7. Grandeur ou magnitude d'une éclipse de Lune

La grandeur est un paramètre important des éclipses de Lune. Dans le cas des éclipses totales et partielles par l'ombre, elle est égale au rapport de la distance du bord de la Lune (A) le plus proche du centre du cône d'ombre au bord du cône d'ombre le plus près du centre de la Lune (B) sur le diamètre de la Lune (AC) et cela à l'instant du maximum de l'éclipse, c'est-à-dire à l'instant où la distance entre le centre de la Lune et le centre de l'ombre est minimale. Pour une éclipse par la pénombre, la définition de la grandeur est identique, il suffit de remplacer le cône d'ombre par le cône de pénombre.

Dans le cas d'une éclipse par l'ombre on a

$$g_o = (\rho - d + s_L)/2s_L$$

et dans le cas d'une éclipse par la pénombre on a

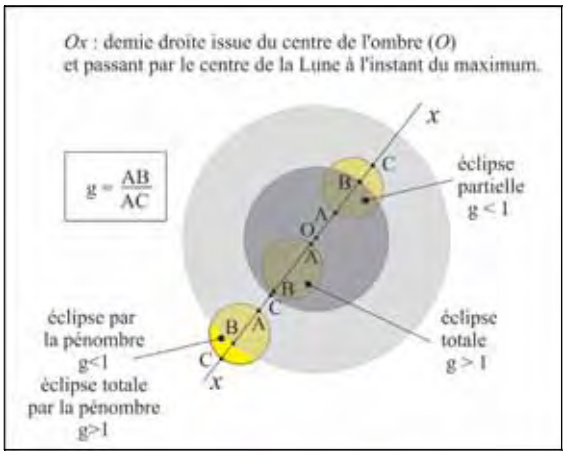
$$g_p = (\sigma - d + s_L)/2s_L$$

où d est la distance entre le centre de la Lune et le centre de l'ombre, s_L le demi-diamètre lunaire, ρ et σ étant respectivement les demi-diamètres apparents de l'ombre et de la pénombre.

Compte tenu de cette définition, plus la grandeur d'une éclipse est importante plus la Lune passe près du centre du cône d'ombre.

Les éclipses totales par l'ombre ou par la pénombre ont une grandeur supérieure à 1 et les éclipses partielles ont une grandeur inférieure à 1. La grandeur d'une éclipse totale centrale est égale à $g_o = (\rho + s_L)/2s_L$.

Figure 15.6. Grandeur des éclipses de Lune.



Sur le dessin de la figure 15.6, pour les éclipses par la pénombre, B est l'intersection de *Ox* avec le bord de la pénombre. Pour les éclipses partielles et les éclipses totales, B est l'intersection de *Ox* avec le bord de l'ombre. AC est le diamètre lunaire ($2s_L$).

8. Les données fournies pour une éclipse de Lune

Pour chaque éclipse de Lune, on donne les instants des débuts et des fins des différentes phases. Ces instants, exprimés en Temps universel coordonné, sont les mêmes quel que soit le lieu d'observation, la visibilité des différentes phases étant uniquement liée au fait que la Lune soit levée ou non aux instants considérés. On donne également la valeur de la grandeur de l'éclipse, parfois appelée magnitude.

Les différentes phases des éclipses de Lune sont les suivantes :

- L'entrée de la Lune dans la pénombre : c'est l'instant où le disque lunaire est tangent extérieur au cône de pénombre.
- L'entrée de la Lune dans l'ombre, uniquement pour les éclipses par l'ombre : c'est l'instant où le disque lunaire est tangent extérieur au cône d'ombre.

- Le commencement de la totalité, uniquement pour les éclipses totales par l'ombre : c'est l'instant où le disque lunaire est tangent intérieur au cône d'ombre.
- Le maximum de l'éclipse : c'est l'instant où la distance entre le centre du disque lunaire et le centre du cône d'ombre est minimale.
- La fin de la totalité, uniquement pour les éclipses totales par l'ombre : c'est l'instant où le disque lunaire est de nouveau tangent intérieur au cône d'ombre.
- La sortie de l'ombre, uniquement pour les éclipses par l'ombre : c'est l'instant où le disque lunaire est de nouveau tangent extérieur avec le cône d'ombre.
- La sortie de la pénombre : c'est l'instant où le disque lunaire est de nouveau tangent extérieur avec le cône de pénombre.

Pour chaque début et fin de phase, on donne également l'angle au pôle des points de contacts, les points de contacts étant les points de tangences entre le disque lunaire et les cônes d'ombre et de pénombre. L'angle au pôle est l'angle formé par la direction du pôle nord céleste et la demi-droite issue du centre lunaire et passant par le point de tangence ; cet angle est compté positivement vers l'ouest (donc dans le sens direct).

On fournit également avec ces valeurs les durées des différentes phases de l'éclipse.

- La durée totale de l'éclipse : intervalle de temps entre l'entrée et la sortie de la pénombre.
- La durée de la phase partielle : intervalle de temps entre l'entrée et la sortie de l'ombre.
- La durée de la totalité : intervalle de temps entre le début et la fin de la totalité.

On donne également les positions apparentes géocentriques du centre de l'ombre et du centre de la Lune pour l'instant du maximum de l'éclipse, ainsi que les valeurs de certains paramètres géométriques de l'éclipse.

- L'ascension droite géocentrique apparente du centre de l'ombre.
- La déclinaison géocentrique apparente du centre de l'ombre.
- Le diamètre apparent du cône d'ombre.
- Le diamètre apparent du cône de pénombre.
- La parallaxe équatoriale du Soleil.

- L'ascension droite géocentrique apparente du centre de la Lune.
- La déclinaison géocentrique apparente du centre de la Lune.
- Le diamètre apparent de la Lune.
- La parallaxe équatoriale de la Lune.

8.1. Exemple de données pour l'éclipse totale de Lune du 4 mai 2004

Éléments à l'instant du maximum de l'éclipse

- Maximum de l'éclipse le 4 mai 2004 à 20 h 30 min 7,031 s UTC.
- Ascension droite du centre de l'ombre : 14 h 48 min 55,84 s.
- Déclinaison du centre de l'ombre : –16° 14′ 51,48′′.
- Diamètre du cône d'ombre : 91,16′.
- Diamètre du cône de pénombre : 154,59′.
- Parallaxe équatoriale du Soleil : 8,72′′.
- Ascension droite du centre de la Lune : 14 h 48 min 25,15 s.
- Déclinaison du centre de la Lune : –16° 32′ 22,88′′.
- Diamètre apparent de la Lune : 33,07′.
- Parallaxe équatoriale de la Lune : + 1° 0′ 40,81′′.

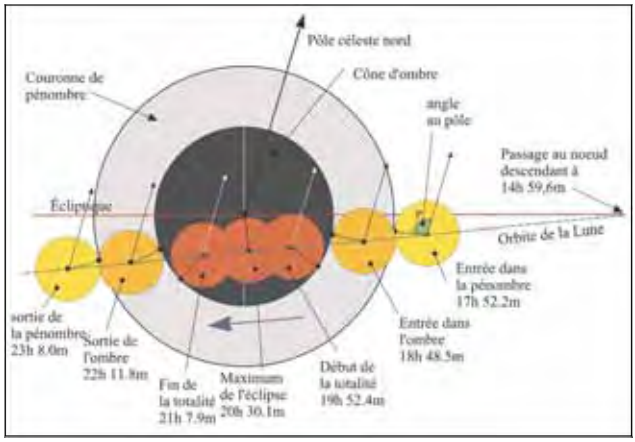
Circonstances de l'éclipse totale du 4 mai 2004.

Circonstance de l'éclipse				
Phases	Instant en UTC	Longitude*	Latitude*	Angle au pôle
Entrée dans la pénombre	17 h 52,2 min	– 89° 32,4′	–15° 54,5′	101,1°
Entrée dans l'ombre	18 h 48,5 min	– 75° 58,7′	–16° 8,1′	95,0°
Début de la totalité	19 h 52,4 min	– 60° 36,1′	–16° 23,4′	251,9°
Maximum de l'éclipse	20 h 30,1 min	– 51° 31,1′	– 16° 32,4′	202,8°
Fin de la totalité	21 h 7,9 min	– 42° 25,9′	–16° 41,3′	153,6°
Sortie de l'ombre	22 h 11,8 min	– 27° 3,5′	–16° 56,4′	310,6°
Sortie de la pénombre	23 h 8,0 min	– 13° 31,3′	–17° 9,5′	304,4°

(*) Les longitudes et latitudes sont les coordonnées des lieux ayant la Lune au zénith à chaque phase. Les longitudes sont comptées positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.

On donne également la durée des différentes phases :

- Durée de l'éclipse : 5 h 15 min 50,50 s.
- Durée de la phase partielle : 3 h 23 min 15,05 s.
- Durée de la phase totale : 1 h 15 min 29,43 s.



Phases de l'éclipse totale de Lune du 4 mai 2004.

Les éphémérides de la Lune donnent les renseignements supplémentaires suivants :

- le 04/05/2004 à 09 h 19 min 04 s UTC : la Lune entre dans la constellation de la Balance.
- le 04/05/2004 à 14 h 59 min 39 s UTC : la Lune passe par le nœud descendant de son orbite, longitude moyenne = +221° 15,7′.
- le 04/05/2004 à 20 h 33 min 24 s UTC : pleine Lune.
- le 06/05/2004 à 04 h 31 min 56 s UTC : la Lune au périgée (distance minimale à la Terre) d = 359 811 km, diamètre apparent = 33,3′.

On constate que la Lune est passée par le nœud descendant de son orbite avant le début de l'éclipse, c'est donc une éclipse au nœud descendant, et logiquement le maximum de l'éclipse, correspondant à la distance minimale du centre du disque lunaire au centre de l'ombre doit avoir lieu avant l'opposition (pleine Lune). Ce qui est bien le cas puisque le maximum a lieu à 20 h 30,1 min et la pleine Lune à 20 h 33,6 min. De plus on constate que la Lune est proche de son périgée, donc sa vitesse angulaire est forte et son diamètre apparent est proche de son maximum. Donc la durée de l'éclipse est relativement courte (proche de 5 h).

9. Zones de visibilité d'une éclipse de Lune

Comme nous l'avons déjà dit, pour qu'une éclipse de Lune soit visible en un lieu donné, il suffit que la Lune soit levée en ce lieu durant l'éclipse. La durée totale d'une éclipse pouvant atteindre plusieurs heures il y a obligatoirement des parties du globe terrestre qui ne verront qu'une partie de l'éclipse. Pour connaître les différents endroits du globe où une éclipse de Lune est visible, il suffit de tracer sur une carte les lieux où la Lune est à l'horizon à l'instant des débuts et des fins des différentes phases de l'éclipse. Sur ces courbes, une première moitié des lieux correspond à un lever de Lune et une seconde moitié des lieux correspond à un coucher de Lune. Tous les points du globe situés à l'est de la première moitié et à l'ouest de la seconde voient la Lune et donc la phase de l'éclipse correspondante.

Au maximum, il y a trois débuts et trois fins de phase pour une éclipse, on trace donc au plus six courbes de visibilité par éclipse et l'on utilise les notations suivantes :

- **P_1** : la limite de la région où l'on observe l'entrée dans la pénombre (pointillés larges).
- **O_1** : la limite de la région où l'on observe l'entrée dans l'ombre (pointillés normaux).
- **T_1** : la limite de la région où l'on observe l'entrée dans la totalité (petits pointillés).
- **T_2** : la limite de la région où l'on observe la fin de la totalité (petits pointillés).
- **O_2** : la limite de la région où l'on observe la sortie de l'ombre (pointillés normaux).
- **P_2** : la limite de la région où l'on observe la sortie de la pénombre (pointillés larges).
- **V** : la région de visibilité.
- **I** : la région d'invisibilité.

La lettre V indique la portion du globe terrestre où l'éclipse est visible (en totalité ou en partie) et la lettre I indique la portion du globe où l'éclipse n'est pas visible.

On utilise généralement une projection de Mercator et on s'arrange pour centrer la carte sur la zone de visibilité V de l'éclipse. Par exemple

tous les lieux situés à l'intérieur de la courbe P_1 contenant le symbole V voient l'entrée de la Lune dans la pénombre.

9.1. Remarque

Chaque courbe est le terminateur du lieu où la Lune est au zénith pour chaque début ou fin de phase, c'est pourquoi on fournit avec chaque instant correspondant aux débuts et aux fins de phase les coordonnées géographiques du lieu ayant la Lune au zénith, ces coordonnées permettant de tracer sur les cartes les terminateurs en question, c'est-à-dire les grands cercles de la sphère terrestre ayant pour pôles ces lieux.

10. Carte de visibilité de l'éclipse totale du 4 mai 2004

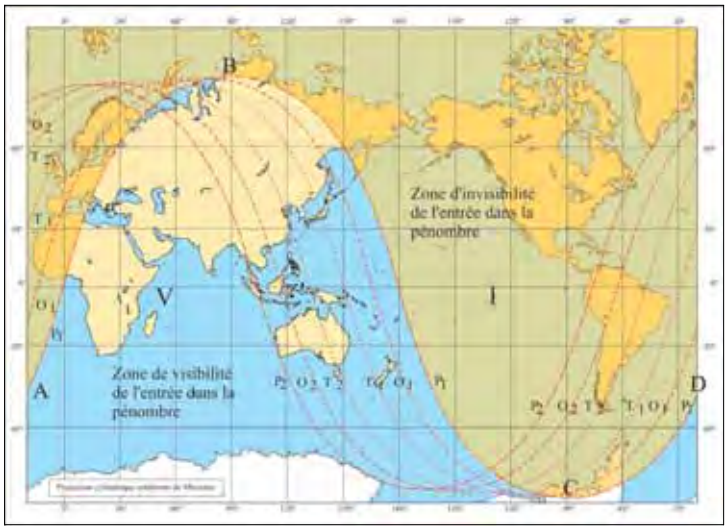


Figure 15.7. Carte de visibilité de l'éclipse totale de Lune du 4 mai 2004.

Sur la carte de la figure 15.7, P_1 indique les lieux où la Lune est à l'horizon au début de l'éclipse (entrée dans le cône de pénombre), les parties gauche AB et extrême droite CD de la courbe correspondent au lever de la Lune et la partie centrale BC de la courbe correspond au coucher de la Lune. Les lieux situés dans la zone de visibilité verront le début de l'éclipse contrairement aux lieux de la partie ombrée sur la carte 15.7. On peut faire un raisonnement identique pour chacune des cinq autres courbes.

10.1. Explication de la visibilité de l'éclipse à Paris

Pour connaître la visibilité d'une éclipse de Lune en un lieu quelconque, il suffit de comparer les instants des différentes phases de l'éclipse avec les heures de nuit en ce lieu. Toutes les phases ayant lieu de nuit sont visibles.

Paris est à l'ouest des parties des courbes P_1 et O_1 correspondant au lever de la Lune aux instants des entrées dans la pénombre et dans l'ombre, on ne verra donc pas ces deux débuts de phase à Paris car la Lune n'y sera pas levée. En revanche Paris est à l'est de toutes les autres courbes, donc on verra toutes les autres phases de l'éclipse : ainsi la Lune se lèvera partiellement éclipsée par l'ombre de la Terre, puis on verra le début de la totalité, puis toute la phase totale puis la fin de la totalité et enfin les sorties de l'ombre et de la pénombre. On peut vérifier très simplement cette prédiction en comparant les instants des différentes phases de l'éclipse avec les heures du lever du Soleil à Paris ce jour. En effet, comme nous sommes proches de la pleine Lune, la Lune se lève sensiblement lorsque le Soleil se couche vers 19 h 9 min UTC. Or les deux premières phases qui débutent respectivement à 17 h 52,2 min UTC et à 18 h 48,5 min UTC ne seront effectivement pas visibles, mais l'entrée dans l'ombre ayant lieu à 19 h 52,4 min UTC sera visible car la Lune sera levée. Les phases suivantes, jusqu'à la dernière phase (sortie de la pénombre) qui aura lieu à 23 h 8 min UTC donc en pleine nuit, seront visibles.

Bibliographie

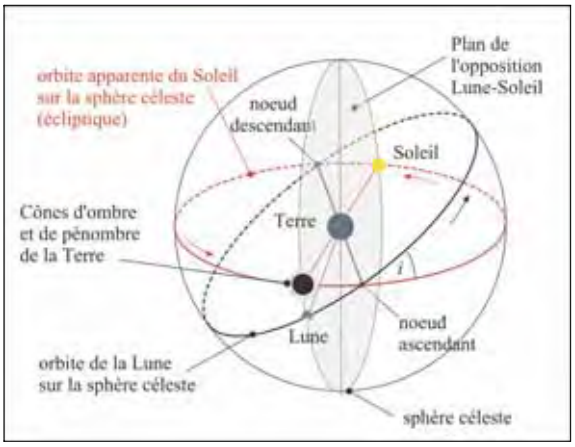
Eclipse Phenomena in Astronomy, F. Link, New York, Springer-Verlag, 1969.

Astronomie générale, A. Danjon, édition Sennac, 1953, rééditée en 1980, édition Blanchard.

16

Quand ont lieu les éclipses de Lune ?

1. Le mouvement moyen de la ligne des nœuds



Opposition de la Lune et du Soleil : pleine Lune.

Il y a éclipse de Lune lorsque la Lune passe dans le cône d'ombre ou dans le cône de pénombre de la Terre. Le Soleil, la Terre et la Lune sont alors presque alignés, et on est au voisinage de la pleine Lune

(opposition). Si le plan de l'orbite de la Lune était le même que le plan de l'orbite de la Terre (écliptique), il y aurait une éclipse de Lune à chaque pleine Lune. Or on sait que le plan de l'orbite de la Lune est incliné d'environ 5° 17′ sur le plan de l'orbite terrestre à la pleine Lune et que l'intersection de ces deux plans définit la ligne des nœuds et que les intersections de cette droite avec l'orbite de la Lune sont les nœuds de l'orbite lunaire.

On a déjà vu que cette ligne des nœuds n'est pas fixe, elle est animée, dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre), d'un mouvement de précession d'une période de 18,6 ans, soit un déplacement de 19,3548° par an.

Pour qu'il y ait une éclipse de Lune il faut donc, dans le repère écliptique géocentrique, que la direction Soleil-Terre soit près de la ligne des nœuds lunaires au moment de la pleine Lune. Compte tenu du mouvement de précession des nœuds, le Soleil apparent passe par l'un des deux nœuds tous les 173,31 jours (saison des éclipses) et il passe par le même nœud tous les 346,32 jours (année des éclipses).

2. Critère en latitude

On démontre qu'une éclipse de Lune se produira si, au moment de la pleine Lune (instant où la différence des longitudes géocentriques de la Lune et du Soleil est égale à 180°, c'est-à-dire au moment de l'opposition), la valeur absolue de la différence b des latitudes géocentriques apparentes du centre de la Lune et du centre du cône d'ombre est inférieure à 1,41° (1° 25′ 23′′). Elle se produira peut-être si elle est comprise entre 1,41° (1° 25′ 23′′) et 1,59° (1° 35′ 40′′) mais ne se produira pas si elle est supérieure à 1,59° (1° 35′ 40′′).

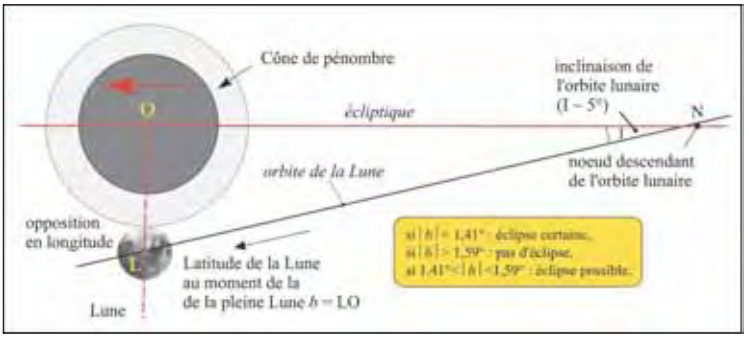


Figure 16.1. Critères en latitude pour les éclipses de Lune (vue depuis la Terre).

Sur la figure 16.1, la distance minimale correspond à l'instant où, pour le centre de la Terre, le centre de la Lune est le plus près possible du centre du cône d'ombre, cela correspond si l'éclipse a lieu, au maximum de l'éclipse. Durant une éclipse de Lune on a toujours un des deux scénarios suivants :

- si l'éclipse a lieu avant le passage de la Lune au nœud, on observe d'abord l'opposition (pleine Lune), puis le maximum de l'éclipse, puis le passage au nœud ;
- si l'éclipse a lieu après le passage de la Lune au nœud, on observe d'abord le passage au nœud, puis le maximum de l'éclipse et enfin l'opposition.

La géométrie de ce dessin montre également que plus l'opposition est proche du nœud, plus la distance minimale entre la Lune et le centre du cône d'ombre est petite et plus la grandeur (magnitude) de l'éclipse est grande. Ainsi, les éclipses par la pénombre correspondent à des oppositions situées loin des nœuds de l'orbite lunaire et les éclipses par l'ombre (partielles ou totales) correspondent à des oppositions proches des nœuds de l'orbite lunaire.

On peut détailler le critère en latitude en déterminant pour quelle valeur de b (0,89°) on a une éclipse par l'ombre avec certitude et pour quelle valeur de b (1,06°) on n'a pas d'éclipse par l'ombre avec certitude (mais une éclipse par la pénombre avec certitude) ; de même on peut déterminer pour quelle valeur de b (0,36°) on a une éclipse totale avec certitude et pour quelle valeur de b (0,53°) on n'a pas d'éclipse totale avec certitude. Ces valeurs sont données sur la figure 16.2.

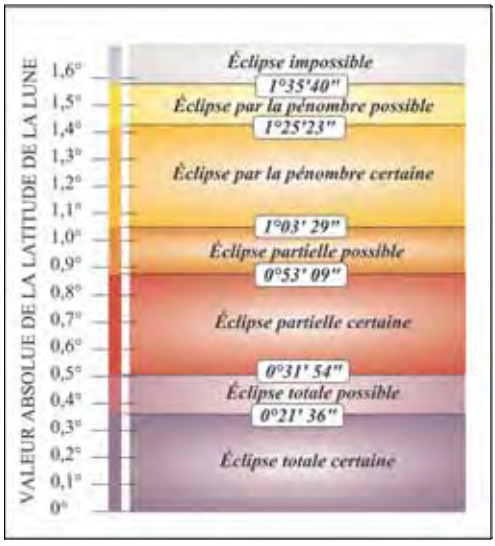


Figure 16.2. Critères en latitude pour les éclipses de Lune

On peut également calculer les valeurs moyennes de ces critères en latitude : éclipse de Lune par la pénombre : $b < \beta_m = 1{,}49°$; éclipse de Lune par l'ombre : $b < \beta_m = 0{,}96°$; éclipse totale de Lune : $b < \beta_m = 0{,}44°$.

Ces valeurs moyennes permettent de calculer également la proportion d'éclipses par la pénombre (36 %), la proportion d'éclipses par l'ombre (64 %) et la proportion d'éclipses totales (30 %).

2.1. Remarque importante

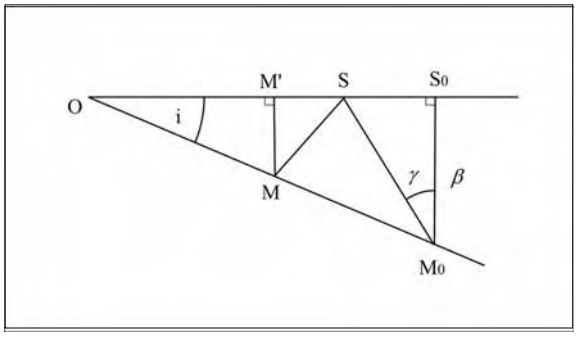
Les bornes d'existence des éclipses de Lune : 1,41° (1° 25′ 23″) et 1,59° (1° 35′ 40″) sont très proches des limites des éclipses de Soleil : 1,41° (1° 24′ 37″) et 1,58° (1° 34′ 46″). Les écarts sont de l'ordre de la minute de degré. Les bornes des éclipses de Lune sont un peu plus grandes que les bornes des éclipses de Soleil en raison de la réfraction atmosphérique.

3. La démonstration du critère en latitude

La démonstration est en tout point identique à la démonstration du critère en latitude des éclipses de Soleil, il suffit de remplacer la conjonction par l'opposition et le Soleil par les cônes d'ombre et de pénombre de la Terre.

Nous allons établir le critère en latitude dans le cas d'une éclipse au nœud ascendant de l'orbite lunaire, l'opposition ayant lieu avant le passage au nœud. La démonstration est identique pour un passage au nœud descendant ou avec une opposition située après le passage au nœud, la seule chose qui change dans ce dernier cas étant la position du minimum de distance entre les deux corps.

Critère en latitude.



Soit M_0 et S_0 : les positions de la Lune et du centre du cône d'ombre à l'instant de l'opposition (pleine Lune) avant le passage de la Lune au nœud ascendant de son orbite. M et S sont les positions de la Lune et du centre du cône d'ombre à un instant t postérieur à l'opposition, γ l'angle S_0M_0S, β la différence des latitudes entre la Lune et le centre du cône d'ombre à l'instant de l'opposition et q le rapport du mouvement en longitude de la Lune sur celui du centre du cône d'ombre (longitude du Soleil + 180°).

Le calcul du critère en latitude consiste à calculer le minimum de la distance SM et de le comparer à la somme des demi-diamètres géocentriques apparents des cônes d'ombre ρ (et de pénombre σ) et du demi-diamètre de la Lune. SM se calcule simplement en utilisant le théorème de Pythagore.

Comme pour les éclipses de Soleil (cf. chap. 7, paragraphe 7.4) nous obtenons

$$SM = \beta \cos i'.$$

Cette distance correspond à une observation vue du centre de la Terre (coordonnées géocentriques).

→ Il y a éclipse par la pénombre lorsque SM est inférieur à la somme des demi-diamètres apparents s_L et s_S du cône de pénombre et de la Lune

$$\boxed{\begin{aligned} &\beta \cos i' < \sigma + s_L \\ &\sigma = \pi_L + \pi_S - s_S \\ &\beta < (\sigma + s_L)/\cos i'. \end{aligned}} \qquad (1)$$

→ Il y a éclipse par l'ombre lorsque SM est inférieur à la somme des demi-diamètres apparents du cône d'ombre et de la Lune.

$$\boxed{\begin{aligned} &\beta \cos i' < \rho + s_L \\ &\rho = \pi_L + \pi_S - s_S \\ &\beta < (\rho + s_L)/\cos i'. \end{aligned}} \qquad (2)$$

→ Il y a éclipse totale par l'ombre lorsque SM est inférieur à la différence des demi-diamètres apparents du cône d'ombre et de la Lune.

$$\boxed{\begin{aligned} &\beta \cos i' < \rho + s_L \\ &\rho = \pi_L + \pi_S - s_S \\ &\beta < (\rho + s_L)/\cos i'. \end{aligned}} \qquad (3)$$

Il suffit alors de remplacer dans ces formules les paramètres par leurs valeurs extrêmes pour en déduire les critères en latitude.

Le tableau 16.I donne les valeurs extrêmes des paramètres, l'étude des séries donnant l'orbite de la Lune montre qu'au voisinage de la nouvelle Lune (et de la pleine Lune) la valeur de l'inclinaison est maximale. Il convient donc de prendre $i \sim 5° 17'$ dans ces formules.

Tableau 16.I. Valeurs extrêmes et moyennes des paramètres

Paramètres	Maximum	Minimum	Moyenne
q	16,2	10,9	13,5
$1/\cos i'$	1,005 2	1,004 3	1,004 72
Parallaxe lunaire π_L	61′ 27″	53′ 53″	57′ 2 ,7″
Parallaxe solaire π_S	8,96″	8,65″	8,80″
Demi-diamètre Lune S_L	16′ 45″	14 ′4 1″	15′ 32,58″
Demi-diamètre Soleil S_S	16′ 18″	15′ 46″	15′ 59,63″
ρ*	46′ 27″	38′ 15″	41′ 45,73″
σ*	1° 18′ 30″	1° 10′ 20″	1° 13′ 45″

** Dans le calcul de ces valeurs, on a tenu compte de la réfraction atmosphérique et de la parallaxe de la Lune à 45° de latitude en multipliant σ par (1+1/128) et ρ par (1+1/73).*

Ainsi la valeur inférieure β_{Min} du second membre de (1) est obtenue avec σ et s_L minimales, la valeur supérieure β_{Max} est obtenue quant à elle avec σ et s_L maximales. On obtient $\beta_{\text{Min}} = 1° 25' 23''$ et $\beta_{\text{Max}} = 1° 35' 40''$ qui sont les limites d'existence des éclipses de Lune.

De même, la valeur inférieure β_{Min} du second membre de (2) est obtenue avec ρ et s_L minimales, la valeur supérieure β_{Max} avec ρ et s_L maximales et l'on obtient $\beta_{\text{Min}} = 0° 53' 9,63''$ et $\beta_{\text{Max}} = 1° 3' 28,6''$. Ce sont les limites d'existence des éclipses de Lune par l'ombre.

Enfin la valeur inférieure β_{Min} du second membre de (3) est obtenue avec ρ minimal et s_L maximal, la valeur supérieure β_{Max} avec ρ maximal et s_L minimal et l'on obtient $\beta_{\text{Min}} = 0° 21' 35,52''$ et $\beta_{\text{Max}} = 0° 31' 54,52''$. Ce sont les limites d'existence des éclipses totales de Lune.

On remarque que le calcul du critère en latitude pour les éclipses de Lune ressemble par bien des points au calcul du critère en latitude pour les éclipses de Soleil. En fait la seule différence est la manière dont les parallaxes de la Lune et du Soleil interviennent. Dans le cas des éclipses de Lune, ces paramètres apparaissent dans les rayons des cônes d'ombre et de pénombre tandis que dans les éclipses de Soleil, ils apparaissent dans la position limite de l'observateur par rapport au centre de la Terre.

Si l'on néglige la correction sur la parallaxe lunaire et celle due à la réfraction atmosphérique, on a une parfaite équivalence entre les deux possibilités, comme le montre la figure 16.3.

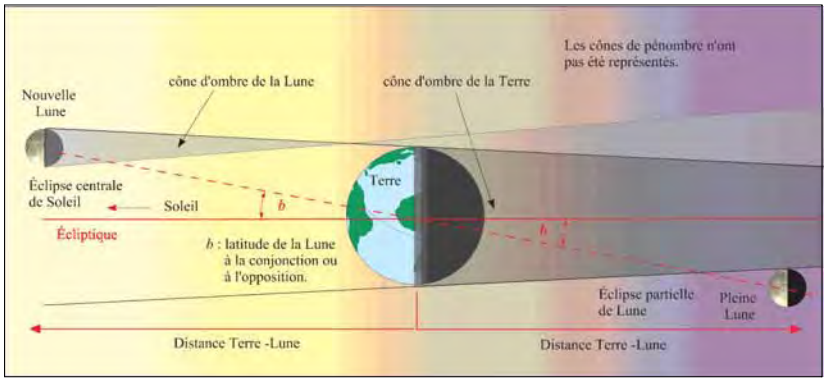


Figure 16.3. Équivalence des critères en latitudes.

4. Critère en longitude

Le critère sur la latitude du centre de la Lune peut se traduire en un critère sur la longitude de l'opposition Lune-Soleil donc de la longitude du centre du cône d'ombre (Soleil + 180°) par rapport au nœud de l'orbite lunaire. Ainsi il y aura éclipse si au moment de l'opposition en longitude, la différence de longitude entre le nœud de l'orbite lunaire et la longitude du centre du cône d'ombre est inférieure à 15,665°. Il n'y aura pas d'éclipse si cette différence est supérieure à 17,375°, et il y aura peut-être éclipse si elle est comprise entre ces deux valeurs. Comme on le voit, on a repris le même critère que dans le cas des éclipses de Soleil. En effet vu la faible différence des critères en latitude, on peut considérer que les critères en longitude sont identiques ; en réalité les critères en longitude pour les éclipses de Lune sont un petit peu plus larges que les critères en longitude pour les éclipses de Soleil.

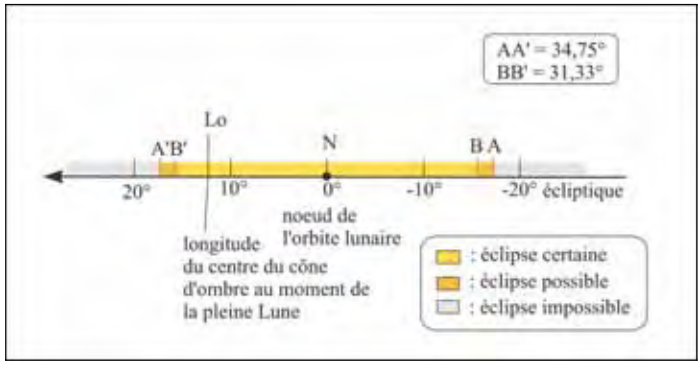
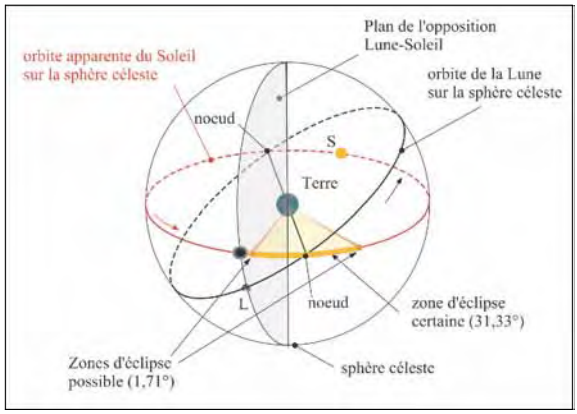


Figure 16.4. Critère en longitude pour les éclipses de Lune (vu depuis le centre de la Terre).

La figure 16.4 représente le critère en longitude vu dans le repère géocentrique écliptique.

Critère en longitude pour les éclipses de Lune (vu depuis l'espace).

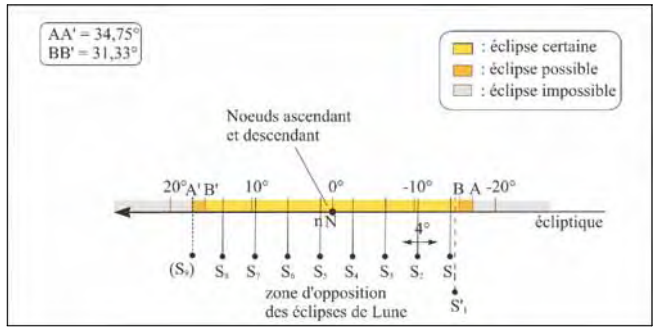


5. Les séries courtes d'éclipses

Nous allons nous intéresser à l'évolution des éclipses au cours du temps. Supposons que nous ayons une éclipse de Lune à une date donnée. Comment sera l'éclipse suivante ?

Généralement les éclipses successives de Lune sont séparées par six lunaisons (liées à une saison d'éclipses), donc il y a alternance de nœud lunaire (nœud ascendant et nœud descendant). Nous avons vu que, durant une lunaison, la Terre (ou le Soleil apparent) progressait en moyenne de 30,67° en longitude par rapport à la ligne des nœuds de l'orbite lunaire. Au bout de six lunaisons la Terre (ou le Soleil apparent) progresse de 6 × 30,67° = 184,02°. Si dl_1 est la différence de longitude entre l'opposition et le nœud de l'orbite lunaire pour la première éclipse, l'éclipse suivante a lieu au nœud suivant et la différence dl_2 entre l'opposition et ce nœud est égale à $dl_1 - (184{,}02° - 180°) = dl_1 - 4{,}02°$. Ainsi l'opposition se déplace par rapport aux nœuds successifs d'environ 4° dans le sens direct d'une éclipse à la suivante.

Série courte d'éclipse (vue depuis la Terre).



Les éclipses de la suite courte S_1 à S_8 ont lieu à chaque saison d'éclipses, alternativement au nœud ascendant puis au nœud descendant. Il y a toujours au moins huit éclipses dans la suite car l'arc BB' contient sept arcs de quatre degrés donc huit éclipses. Il peut éventuellement y avoir une neuvième éclipse S_9 (dans l'arc A'B'), dans ce cas cette éclipse est la dernière éclipse d'un triplet d'éclipses : Lune-Soleil-Lune. Dans ce cas, l'opposition correspondant à la première éclipse du triplet a lieu une lunaison plus tôt et se trouve 30,67° en amont et cette éclipse est la première éclipse de la série courte suivante ; nous avons donc un décrochage dans la suite des séries, la série suivante commence avant que la série en cours ne soit terminée. Ce phénomène peut également se produire lorsque la huitième éclipse de la série est très proche du point B'. On peut donc conclure que les éclipses des suites courtes sont séparées par six lunaisons et que la première éclipse d'une suite courte est séparée de la dernière éclipse de suite courte précédente par cinq lunaisons ou par une lunaison (antérieure) dans le cas d'un décrochage.

On remarque que les oppositions liées aux éclipses d'une série courte parcourent l'arc BB' dans le sens direct avec un pas moyen de quatre degrés, les premières et les dernières éclipses sont des éclipses faibles (éclipses par la pénombre ou éclipse partielle) et les éclipses du milieu de la série, proches des nœuds, sont des éclipses fortes (éclipses partielles par l'ombre, puis éclipses totales).

Attention, il ne faut jamais oublier que ces calculs sont faits à l'aide des révolutions moyennes de la Lune, la réalité est toujours un peu différente, l'avance de l'opposition n'est jamais exactement égale à quatre degrés mais varie autour de cette valeur moyenne. De plus, il faut se rappeler qu'entre deux saisons d'éclipses il s'écoule cinq ou six lunaisons, le plus souvent six. Or en six lunaisons la Terre peut passer du voisinage de son aphélie au voisinage de son périhélie, ou inversement, ce qui change dans de grandes proportions les diamètres des cônes d'ombre et de pénombre de la Terre. De même en six lunaisons, la distance Terre-Lune peut varier fortement en fonction de la position du périgée et du mouvement de la ligne des apsides ; de sorte que le cycle croissant puis décroissant dans les séries courtes peut parfois présenter des exceptions : deux éclipses de la première partie de la série peuvent ne pas être croissantes ou deux éclipses de la seconde partie de la série peuvent ne pas être décroissantes. On consultera les tableaux et les diagrammes de l'annexe A pour voir de tels exemples.

17

Canons et grandeurs des éclipses de Lune

1. Grandeurs des éclipses de Lune

Nous avons vu que la taille des cônes d'ombre et de pénombre dépend de deux paramètres, la distance Soleil-Terre qui conditionne la position des sommets des cônes et la distance Terre-Lune qui conditionne la position du plan d'intersection des cônes.

Les éclipses les plus longues seront des éclipses centrales, la durée de l'éclipse étant fonction de la vitesse synodique de la Lune, c'est-à-dire de la différence des vitesses entre la Lune et les cônes d'ombre et de pénombre car la Lune et ces cônes se déplacent dans le même sens par rapport à la Terre (sens direct). Le tableau 17.I donne les valeurs extrêmes du demi-diamètre apparent (ρ) du cône d'ombre en tenant compte des corrections de réfraction. Pour ces valeurs on donne également les positions de la Terre et de la Lune, la valeur du demi-diamètre apparent de la pénombre (σ), la vitesse synodique de la Lune en secondes de degré par heure, la grandeur de l'éclipse et la durée totale de l'éclipse.

La grandeur maximale s'observe dans le cas des éclipses centrales périgées (avec la Terre à l'aphélie), mais la durée maximale s'observe pour les éclipses apogées (avec la Terre au périhélie) ; en effet dans ce

Tableau 17.I. Valeurs extrêmes des paramètres.

Demi-diamètre de l'ombre ρ	Minimal : 2,61 s_L	Moyen : 2,69 s_L	Maximal : 2,78 s_L
Positions de la Lune et de la Terre	Lune apogée Terre périhélie	---	Lune périgée Terre aphélie
Demi-diamètre de la pénombre σ	4253″ = 4,82 s_L	4425″ = 4,75 s_L	4678″ = 4,65 s_L
Vitesse synodique de la Lune	1626″/h	1858″/h	2150″/h
Grandeur de l'éclipse	1,805	1,845	1,890
Durée de l'éclipse	~ 6 h 19 min	~5 h 46 min	~5 h 17 min

cas le diamètre apparent de la Lune est plus petit mais son mouvement synodique est plus lent. On retrouve donc la dualité déjà observée dans le cas des éclipses de Soleil de durée maximale (éclipses annulaires à l'apogée) et les éclipses de Soleil de grandeur maximale (éclipses totales au périgée).

2. Les canons d'éclipses de Lune

Les listes d'éclipses de Lune et de Soleil sont publiées dans des livres appelés *canons d'éclipses*. Nous en avons déjà parlé dans le chapitre 8 pour les éclipses de Soleil et nous invitons le lecteur à s'y référer.

3. Le canon d'éclipses de Lune de L'IMCCE

Les théories utilisées sont les mêmes que celles citées dans le chapitre 8.

Les paramètres physiques sont également identiques à ceux du même chapitre 8. Cependant on tient compte de la réfraction atmosphérique en augmentant le demi-diamètre géocentrique apparent de l'ombre de 1/73 et en augmentant le demi-diamètre géocentrique apparent de la pénombre de 1/128.

3.1. Les résultats

Nous avons trouvé sur cette période de 6 000 ans, 14 357 éclipses de Lune qui se répartissent de la manière suivante :

- Nombre d'éclipses totales : 4 210 (soit 29,3 % des éclipses).
- Nombre d'éclipses partielles : 5 019 (soit 34,9 % des éclipses).

- Nombre d'éclipses par la pénombre : 5 128 (soit 35,7 %) dont 164 totales par la pénombre.

Comme on l'a prédit, on vérifie que la proportion d'éclipses par l'ombre est bien d'environ 64 % et la proportion d'éclipses par la pénombre est bien d'environ 36 %.

4. Les éclipses totales les plus longues

Comme nous venons de le voir, il n'y a pas coïncidence entre les éclipses totales les plus grandes et les éclipses totales les plus longues. Les éclipses les plus longues ont lieu avec une Lune proche de l'apogée.

Le tableau 17.II. donne les 21 éclipses du canon de l'IMCCE dont la durée de la phase totale est supérieure à 1 h 46 min. On remarquera que la valeur maximale de la grandeur de ces éclipses est de 1,817 633 6.

Tableau 17.II. Les éclipses de Lune les plus longues.

Date de l'éclipse	Magnitude	Durée de la phase totale
29/06/–2344 - 30/06/–2344	1,755 995 8	1 h 46 min 05 s
01/06/–2203	1,799 576 6	1 h 46 min 37 s
04/05/–2062	1,792 195 0	1 h 46 min 36 s
06/04/–1921	1,805 015 5	1 h 46 min 27 s
23/06/–1646 - 24/06/–1646	1,791 413 0	1 h 46 min 16 s
26/05/–1505	1,799 213 9	1 h 46 min 30 s
27/04/–1364	1,805 479 7	1 h 46 min 29 s
30/03/–1223	1,801 012 4	1 h 46 min 15 s
16/07/–503	1,799 974 1	1 h 46 min 04 s
11/04/–98	1,800 299 8	1 h 46 min 02 s
07/08/54	1,810 467 7	1 h 46 min 13 s
28/06/177	1,771 633 5	1 h 46 min 23 s
31/05/318	1,782 017 9	1 h 46 min 33 s
03/05/459	1,817 633 6	1 h 46 min 33 s
12/06/1443	1,808 391 2	1 h 46 min 15 s
24/05/1584	1,815 295 8	1 h 46 min 06 s
13/08/1859	1,815 087 8	1 h 46 min 28 s
16/07/2000	1,768 661 1	1 h 46 min 25 s
09/06/2123	1,748 989 9	1 h 46 min 07 s
19/06/2141	1,741 640 2	1 h 46 min 07 s
11/05/2264 - 12/05/2264	1,798 559 7	1 h 46 min 14 s

Parmi cette liste, chaque éclipse appartient à un triplet d'éclipses et est encadrée par deux éclipses partielles de Soleil. En effet l'opposition

étant toujours proche du nœud donc du milieu de l'intervalle BB', la conjonction précédente et la conjonction suivante tombent également à l'intérieur de l'intervalle, on a donc toujours un triplet d'éclipses. Par exemple l'éclipse du 01/06/–2203 qui a la plus longue phase totale et qui a duré au total 6 h 14 min 10 s, est encadrée par les éclipses partielles de Soleil du 18/05/–2203 et de 16/06/–2203.

Pour cette éclipse on peut vérifier que c'est bien une éclipse apogée avec une opposition proche du passage au nœud de l'orbite :

- le 01/06/–2203 à 19 h 02 min 46 s UTC : la Lune passe par le nœud descendant de son orbite.
- le 01/06/–2203 à 19 h 09 min 59 s UTC : maximum de l'éclipse de Lune.
- le 01/06/–2203 à 19 h 10 min 11 s UTC : pleine Lune.
- le 03/06/–2203 à 01 h 26 min 53 s UTC : la Lune à l'apogée d = 406 185 km, diamètre apparent = 29,5'.

On vérifie que conformément à ce que nous avons dit lors de la définition du critère en latitude, le maximum de l'éclipse a lieu entre l'instant du passage au nœud et l'instant de la pleine Lune lorsque le passage au nœud est antérieur à la pleine Lune.

5. Les éclipses totales les plus grandes

Les éclipses totales les plus grandes correspondent à des éclipses totales périgées. Le tableau 17.III donne les 26 éclipses totales de Lune du canon de l'IMCCE dont la grandeur est supérieure à 1,86.

Chaque éclipse de Lune de cette liste appartient à un triplet d'éclipses et est encadrée par deux éclipses partielles de Soleil. Par exemple, l'éclipse du 05/06/2756 qui est la plus grande, dont la durée totale est de 5 h 17 min 31 s, est encadrée par les éclipses partielles de Soleil du 21/05/2756 et du 19/06/2756.

Pour cette éclipse on peut vérifier que c'est bien une éclipse périgée avec une opposition proche du passage au nœud de l'orbite :

- le 05/06/2756 à 03 h 38 min 22 s UTC : la Lune passe par le nœud ascendant de son orbite.
- le 05/06/2756 à 03 h 41 min 34 s UTC : maximum de l'éclipse de Lune.

Date des éclipses	Grandeur	Durée de la phase totale
08/07/–2977	1,877 547 6	1 h 39 min 15 s
29/07/–2420	1,864 724 5	1 h 40 min 04 s
15/01/–2326	1,862 020 5	1 h 38 min 35 s
27/03/–1874	1,874 861 7	1 h 40 min 19 s
16/02/–1751	1,862 125 1	1 h 39 min 52 s
04/06/–1552	1,875 322 3	1 h 40 min 19 s
07/05/–1411	1,866 164 8	1 h 40 min 22 s
09/04/–1270	1,872 556 5	1 h 40 min 16 s
12/09/–1241 - 13/09/–1241	1,867 223 8	1 h 38 min 32 s
28/02/–1147 - 01/03/–1147	1,873 022 7	1 h 39 min 45 s
24/07/–1136	1,877 616 9	1 h 39 min 10 s
29/12/–540	1,863 620 2	1 h 38 min 10 s
09/01/–521 - 10/01/–521	1,868 489 1	1 h 38 min 15 s
01/04/–51	1,863 460 9	1 h 39 min 44 s
10/02/54 - 11/02/54	1,869 355 2	1 h 39 min 16 s
17/07/83	1,861 834 7	1 h 41 min 49 s
06/09/564	1,874 343 8	1 h 38 min 54 s
30/07/687	1,862 094 6	1 h 39 min 18 s
24/04/1092	1,873 755 8	1 h 39 min 20 s
28/09/1121	1,868 227 0	1 h 38 min 55 s
09/08/1226	1,879 448 5	1 h 39 min 39 s
15/05/1631	1,872 852 3	1 h 39 min 48 s
30/08/1765	1,863 108 7	1 h 41 min 28 s
26/07/1953	1,862 864 2	1 h 40 min 44 s
04/11/2264 - 05/11/2264	1,868 819 3	1 h 38 min 37 s
05/06/2756	1,879 940 0	1 h 39 min 20 s

Tableau 17.III. Les éclipses de Lune les plus grandes.

- le 05/06/2756 à 03 h 41 min 40 s UTC : pleine Lune.
- le 05/06/2756 à 09 h 01 min 51 s UTC : la Lune au périgée d = 357 129 km, diamètre apparent = 33,5′.

On vérifie de nouveau que le maximum de l'éclipse a lieu entre le passage au nœud et la pleine Lune.

6. Les éclipses les plus faibles et les plus courtes

Contrairement au cas des éclipses totales de Lune de grandeur maximale et des éclipses totales de Lune de durée maximale, il y a coïncidence entre les éclipses de Lune les plus courtes et les éclipses de grandeur minimale. Il s'agit d'éclipses rasantes par l'ombre dans le cas des éclipses partielles et par la pénombre dans le cas des éclipses par la pénombre. Le tableau 17.IV donne les six éclipses partielles de Lune du canon de l'IMCCE dont la grandeur est inférieure à 0,001.

Tableau 17.IV. Les éclipses partielles de Lune les plus faibles et les plus courtes.

Date de l'éclipse	Grandeur	Durée de la phase partielle
14/09/–2237	0,000 951 2	7 min 36 s
08/08/–1463	0,000 282 2	3 min 39 s
02/07/–754	0,000 429 7	4 min 47 s
13/10/273	0,000 080 6	1 min 58 s
24/02/2157	0,000 489 2	5 min 27 s
16/06/2421	0,000 628 0	5 min 34 s

Le tableau 17.V nous donne les deux éclipses de Lune par la pénombre du canon de l'IMCCE dont la grandeur est inférieure à 0,001.

Tableau 17.V. Les éclipses par la pénombre les plus courtes.

Date de l'éclipse	Grandeur	Durée de l'éclipse
07/07/1571	0,000 484 8	5 min 53 s
17/01/2986	0,000 693 6	8 min 01 s

Ces deux dernières éclipses de Lune appartiennent à des triplets d'éclipses. Ainsi l'éclipse du 07/07/1571 est la première du triplet comprenant ensuite l'éclipse annulaire de Soleil des 21 et 22/07/1571 puis l'éclipse partielle de Lune du 05/08/1571. De même l'éclipse du 17/01/2986 est la première du triplet comprenant ensuite l'éclipse annulaire-totale de Soleil du 31/01/2986 puis l'éclipse de Lune par la pénombre du 15/02/2986.

Il convient de remarquer que ces éclipses sont des cas limites propres au canon de l'IMCCE, les cas limites des autres canons d'éclipses de Lune sont différents, les constantes et les éphémérides utilisées pour l'élaboration des canons étant différentes.

Bibliographie

Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. Solution VSOP82, P. Bretagnon, *Astron. Astrophys*. **144**, 278-288, 1982.

Planetary Theories in Rectangular and Spherical Variables VSOP87 Solution, P. Bretagnon et G. Francou, *Astron. Astrophys.* **202**, 309-315, 1988.

The lunar ephemeris ELP2000, M. Chapront-Touzé et J. Chapront, *Astron. Astrophys.* **124**, 50, 1983.

ELP 2000-85 a semi-analytical lunar ephemeris adequate for historical times, M. Chapront-Touzé et J. Chapront, *Astron. Astrophys.* **190**, 342, 1988.

Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants, J.H. Lieske & al., *Astron. Astrophys.* **73**, 282-284, 1977.

The Forced Nutations of an Elliptical, Rotating, Elastic, and Oceanless Earth, J.M. Wahr, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* **64**, 705-727, 1981.

The new definition of Universal Time, S. Aoki & al., *Astron. Astrophys.* **105**, 359, 1982.

Canon of eclipses, T.R. von Oppolser, Dover publication, New York, 1962.

Canon of Lunar Eclipses –2002 to +2526, J. Meeus and H. Mucke, Astronomisches Büro, Wien, 1983.

18

Le saros et les suites longues d'éclipses de Lune

1. Nombre d'éclipses dans un saros

La définition du saros et les démonstrations qui lui sont liées ont été traitées dans la partie relative aux éclipses de Soleil. De même pour les particularités propres aux nombres éclipses. Nous invitons donc le lecteur à se référer au chapitre 10 paragraphe 5.

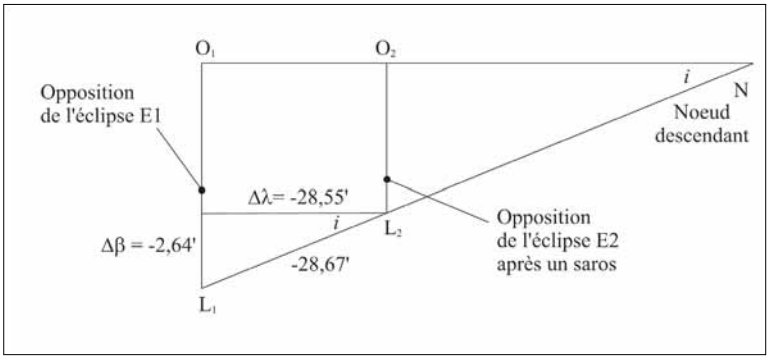
2. Éclipses homologues et suites longues d'éclipses de Lune

Nous avons vu qu'il existe une période de récurrence des éclipses, le saros, qui ramène sensiblement la même éclipse après une période de 6 585,32 jours. Ces éclipses séparées par un saros sont appelées *éclipses homologues*. En réalité, elles ne sont pas parfaitement identiques, mais elles évoluent légèrement d'un saros à l'autre et elles forment des suites qui portent sur de grandes périodes de temps d'où leur nom de *suites longues*.

2.1. Évolution de la longitude de l'opposition après un saros

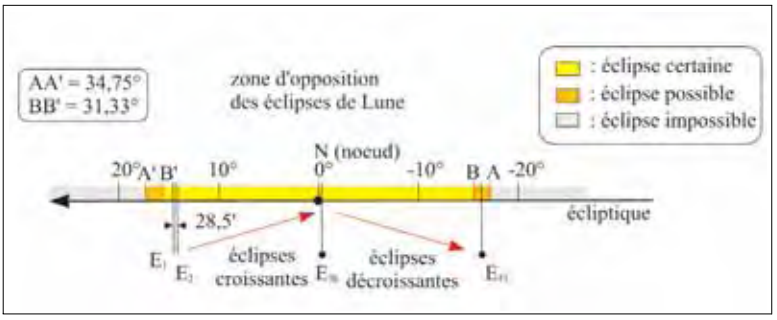
Nous allons regarder comment évolue la longitude de l'opposition après une période d'un saros. L'écart entre le saros de 223 lunaisons « *L* » et les 242 révolutions draconitiques « *G* » est de moins 52 minutes de temps (–0,036 12 jour).

Variation de la longitude de l'opposition entre deux éclipses homologues.



Durant ces 52 minutes, la Lune, sur son orbite, se déplace en moyenne par rapport à son nœud de –0,036 12 × 360°/*G* = –28,67′. La Lune en opposition se trouve donc déplacée sur son orbite de 28,67′ dans le sens rétrograde par rapport au nœud. Compte tenu de l'inclinaison de l'orbite lunaire, ce décalage se traduit par un décalage de la longitude céleste Δλ = –28,55′ et par une variation de la latitude céleste de la Lune de Δβ = –2,64′.

Évolution sur une suite longue d'éclipses.



Les oppositions des éclipses homologues vont donc parcourir l'arc BB′ dans le sens rétrograde avec un pas moyen de 28,55′. Si l'on divise l'arc BB′ par 28,55′, on constate qu'il peut contenir 66 éclipses et si l'on

divise l'arc AA' par 28,55' on voit qu'il peut contenir 74 éclipses. Ces suites d'éclipses sont appelées suites longues. L'étude des canons d'éclipses montre qu'en moyenne ces suites comportent 72 éclipses, ce qui correspond à une période de temps d'environ 1300 ans.

2.2. Aspect d'une suite longue d'éclipse de Lune

Les premières éclipses d'une suite longue sont faibles, car elles sont proches de l'arc A'B', donc loin du nœud. Ensuite, leur grandeur va croître jusqu'à ce qu'elles se produisent au voisinage du nœud, puis décroître pour finir de nouveau faible au voisinage de l'arc BA. Pour une suite longue de 72 éclipses, si l'on respecte les pourcentages des différents types d'éclipses (environ 1/3 de chaque), on aura donc successivement 12 éclipses par la pénombre de grandeur croissante, puis 12 éclipses partielles par l'ombre, puis 12 éclipses totales de grandeur croissante (sur 650 ans), puis de nouveau 12 éclipses totales de grandeur décroissante, puis 12 éclipses partielles par l'ombre et enfin 12 éclipses par la pénombre de grandeur décroissante (sur 650 ans). Dans la pratique, les deux ou trois éclipses du milieu de la suite longue sont maximales, elles servent de transition entre la période de croissance et de décroissance des éclipses totales. On remarque que toutes les éclipses d'une suite ont lieu au même nœud. Si la suite longue a lieu au nœud descendant, les latitudes célestes successives de la Lune croissent des latitudes négatives aux latitudes positives, les positions de la Lune par rapport aux cônes d'ombre et de pénombre de la Terre vont donc se déplacer du sud au nord. Inversement pour une suite longue au nœud ascendant, les latitudes célestes successives de la Lune décroissent des latitudes positives aux latitudes négatives, les positions de la Lune par rapport aux cônes d'ombre et de pénombre de la Terre vont donc se déplacer du nord au sud.

En réalité, dans les propos précédents, les directions nord et sud désignent le nord et le sud par rapport à l'écliptique et non pas par rapport à l'équateur terrestre, il faut bien se rappeler que l'écliptique est incliné par rapport à l'équateur terrestre.

3. Évolutions des éclipses homologues

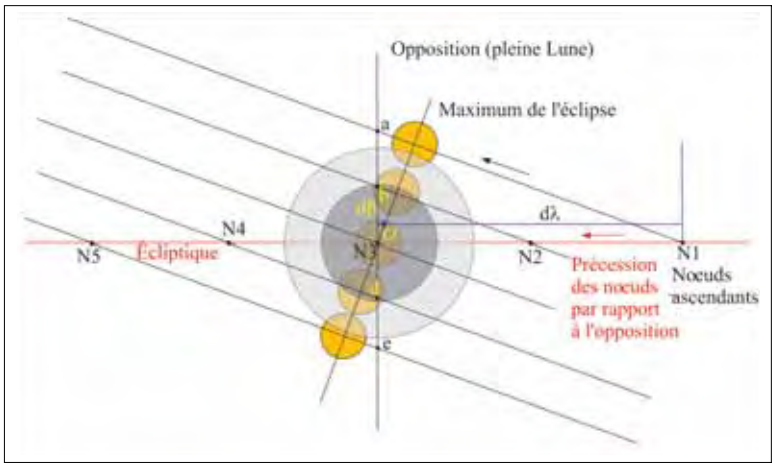
3.1. Évolution en longitude terrestre

Nous avons vu que la période du saros n'est pas un nombre entier de jours, sa valeur est de 6 585,32 jours. Donc entre deux éclipses

homologues, la Terre n'a pas tourné d'un nombre entier de jour, les zones concernées par les éclipses ne sont donc pas les mêmes. En 0,32 jour, la Terre tourne d'environ 120°, les zones concernées par l'éclipse se déplacent donc d'environ 120° vers l'ouest. Comme une éclipse de Lune est visible, au moins durant une partie de sa durée, sur environ les deux tiers de la surface terrestre, il n'est pas surprenant que des éclipses homologues successives soient visibles d'un même lieu. Après trois saros, l'éclipse a même lieu sensiblement au même instant. Cela explique que la période de récurrence des éclipses (saros) soit plus facilement décelable, en un lieu, à travers les suites d'éclipses de Lune observées, ce qui n'est pas le cas pour les éclipses de Soleil.

3.2. Évolution en latitude écliptique par rapport aux cônes d'ombre et de pénombre

Figure 18.1. Évolution en latitude.



La figure 18.1 montre l'évolution des éclipses homologues de Lune durant une suite longue de saros au nœud ascendant. Sur cette figure, nous avons figé la longitude de la pleine Lune (opposition), ce sont donc les positions du nœud ascendant qui vont varier dans le sens direct par rapport à l'opposition au cours du temps. Nous avons représenté la position du nœud ascendant environ tous les 325 ans ainsi que les maxima des éclipses correspondantes c'est-à-dire les distances minimales entre le centre de la Lune et le centre des cônes.

Au début de la suite longue d'éclipse de Lune, le nœud se trouve en position N1, à l'ouest de l'opposition. La Lune va donc passer d'ouest en est devant le bord nord du cône de pénombre, les premières éclipses

de la suite seront donc des éclipses par la pénombre passant au bord nord de la pénombre (éclipsant donc le sud de la Lune). 325 ans plus tard, le nœud ascendant de l'orbite lunaire est en N2, la Lune rencontre le bord nord du cône d'ombre, les éclipses de Lune sont donc partielles par l'ombre. 325 ans plus tard, le nœud ascendant N3 est confondu avec la longitude de l'opposition, c'est le cas idéal d'une éclipse totale centrale, puis nous avons une situation symétrique par rapport à l'opposition, c'est-à-dire un nœud en N4 correspondant à des éclipses partielles par l'ombre mais au sud du cône d'ombre (éclipsant le nord de la Lune), puis des éclipses par la pénombre au sud du cône de pénombre qui prennent fin après la dernière position N5 du nœud.

On remarque que, lorsque le nœud ascendant est à l'ouest de l'opposition, le maximum de l'éclipse a lieu avant l'opposition, et que lorsque le nœud ascendant est à l'est de l'opposition le maximum de l'éclipse a lieu après l'opposition. Donc la connaissance de l'instant du maximum de l'éclipse, de l'instant de l'opposition et de la nature du nœud (ascendant ou descendant) permet de situer la position de l'éclipse dans la suite longue d'éclipses homologues et la partie de la Lune éclipsée. Ou bien, inversement, la connaissance de la position d'une éclipse dans sa suite longue et la nature du nœud permet de savoir si le maximum de l'éclipse a lieu avant ou après l'opposition et de connaître la partie de la Lune éclipsée.

4. Positions des éclipses d'une saison dans les suites longues de saros

Nous avons vu qu'à chaque saison d'éclipses il y a soit un doublet soit un triplet d'éclipses de Lune et de Soleil. Nous allons essayer de déterminer les positions des éclipses de Lune et de Soleil dans leurs suites longues respectives en fonction de l'allure du triplet ou du doublet d'éclipses. On rappelle que lors d'une saison d'éclipses il y a inversion des nœuds avec la nature des éclipses. Ainsi si l'éclipse ou les éclipses de Soleil ont lieu au nœud ascendant, l'éclipse ou les éclipses de Lune de la même saison ont lieu au nœud descendant et inversement.

4.1. Cas d'un doublet d'éclipses

Dans le cas d'un doublet d'éclipses, l'opposition et la conjonction (les syzygies) sont toujours réparties de part et d'autre des nœuds. Donc l'éclipse correspondant à la syzygie à l'ouest (à droite) du nœud est

dans la partie décroissante de sa suite longue et l'éclipse correspondant à la syzygie à l'est (à gauche) du nœud suivant est dans la partie croissante de sa suite longue.

Exemple

Soit un doublet constitué d'une éclipse de Lune au nœud descendant suivie d'une éclipse de Soleil au nœud ascendant. Comme l'éclipse de Lune a lieu avant le passage au nœud, l'opposition est à l'ouest du nœud et l'éclipse de Lune est dans la partie décroissante de sa suite longue (au nœud descendant) et c'est donc la partie sud du disque lunaire qui est éclipsée. L'éclipse de Soleil, elle, a lieu après le passage au nœud, la conjonction est donc à l'est du nœud et l'éclipse de Soleil est dans la partie croissante de sa suite longue (au nœud ascendant), elle sera donc visible dans l'hémisphère nord.

Résumé des cas possibles pour un doublet d'éclipses.

Ordre du doublet	Éclipses de Lune et de Soleil	Éclipses de Soleil et de Lune
Position de l'éclipse de Lune dans sa suite longue	partie décroissante	partie croissante
Position de l'éclipse de Soleil dans sa suite longue	partie croissante	partie décroissante
Éclipse de Lune au nœud descendant Éclipse de Soleil au nœud ascendant	partie sud du disque lunaire éclipsée éclipse solaire visible au nord	partie nord du disque lunaire éclipsée éclipse solaire visible au sud
Éclipse de Lune au nœud ascendant Éclipse de Soleil au nœud descendant	partie nord du disque lunaire éclipsée éclipse solaire visible au sud	partie sud du disque lunaire éclipsée éclipse solaire visible au nord

4.2. Cas d'un triplet d'éclipses

Dans le cas d'un triplet d'éclipses, la première et la troisième éclipses sont de même nature (éclipses de Lune ou éclipses de Soleil) et la seconde éclipse est de nature opposée aux deux autres. La première éclipse appartient à la partie décroissante de sa suite longue et est proche de la fin de cette suite. La troisième appartient à la partie croissante de sa suite longue et est proche du début de cette suite. Pour l'éclipse du milieu, elle est proche du maximum dans sa suite longue. On peut la situer dans la partie croissante ou décroissante de sa suite, uniquement si l'on connaît la position de la syzygie par rapport au

nœud : une syzygie à l'ouest du nœud la place dans la partie décroissante et une syzygie à l'est du nœud la place dans la partie croissante de sa suite.

4.3. Remarques

Dans les explications ci-dessus, la position à l'ouest (à droite) du nœud est équivalente à une syzygie antérieure au passage au nœud et une position à l'est (à gauche) est équivalente à une syzygie postérieure au passage au nœud. De même, nous avons fondé nos explications sur les positions relatives des nœuds et des syzygies et nous aurions pu faire les mêmes raisonnements en remplaçant un des deux éléments par la position, ou par l'instant, du maximum des éclipses.

5. Évolutions des éclipses homologues

5.1. Variation sur le fond d'étoiles et dans l'année

Nous rappelons que d'un saros à l'autre, le Soleil, et donc également la direction de l'axe des cônes d'ombre et de pénombre de la Terre et les éclipses de Lune se décalent d'environ 10,5° vers l'est par rapport aux constellations zodiacales. Au cours d'une suite longue d'éclipses, le Soleil apparent effectue plus de deux tours complets d'orbite et l'on rencontre toutes les configurations liées au Soleil apparent. Les éclipses parcourent les quatre saisons et cela deux fois.

5.2. Variation des types d'éclipses

Nous avons vu également que suite à l'écart entre un saros et 239 révolutions anomalistiques, la distance de la Lune à son périgée varie de 2,8° d'un saros à l'autre. Au cours d'une suite longue de 72 saros, les oppositions lunaires liées aux éclipses homologues (donc la Lune) ne vont parcourir que 202° de l'orbite lunaire, soit un peu plus de la moitié. De plus, durant les 48 éclipses de Lune par l'ombre du saros, cet arc se réduit à 134°, il convient de comparer cette valeur avec les portions de l'orbite lunaire où les éclipses lunaires sont apogées ou périgées.

Contrairement aux éclipses solaires, où les limites entre les éclipses annulaires et totales sont bien définies, il n'y a pas de limites précises entre les éclipses de Lune dites périgées et les éclipses de Lune dites

apogées. Néanmoins, si le périgée est proche du milieu de cet arc de 134°, la suite longue est riche en éclipses périgées, si au contraire, cet arc avoisine l'apogée, la suite longue est riche en éclipses apogées.

5.3. Remarques supplémentaires

Les suites longues d'éclipses de Soleil et de Lune ont en moyenne 72 éclipses (donc 72 saros) réparties sur une période d'environ 1300 ans. L'étude des canons d'éclipses montre qu'il existe parfois de grandes dissymétries dans ces suites et que la répartition 1/6, 2/3, 1/6 entre les différents types d'éclipses est loin d'être exacte. En effet comme il existe des saros riches (94 éclipses) et des saros pauvres (78 éclipses), la répartition des éclipses dans les suites longues suit cette dissymétrie. On remarque également que l'évolution de la grandeur des éclipses est lente dans les suites longues, donc le saros conserve longtemps ses éclipses fortes. La variation du nombre d'éclipses de Lune et de Soleil dans un saros suit une période d'environ 590 ans.

5.4. Exemple de suite longue

Le tableau 18.I donne la liste des éclipses de la suite longue contenant l'éclipse de Lune du 9 janvier 2001. On donne successivement le numéro de l'éclipse dans la suite longue, le type d'éclipse, la date de l'éclipse, sa grandeur (magnitude) et la durée de la phase totale lorsque cette phase existe.

Tableau 18.I. Série de Saros de l'éclipse totale du 9 janvier 2001.

n° type	Date	Grandeur	Durée
1 P	01/04/1550	0,001 847 5	
2 P	11/04/1568	0,097 545 2	
3 P	03/05/1586	0,204 678 8	
4 P	13/05/1604	0,319 880 0	
5 P	24/05/1622	0,443 818 5	
6 P	04/06/1640	0,571 675 6	
7 P	15/06/1658	0,707 212 7	
8 P	25/06/1676	0,842 616 8	
9 O	06/07/1694-07/07/1694	0,031 683 6	
10 O	18/07/1712	0,167 799 2	
11 O	29/07/1730	0,302 310 7	
12 O	08/08/1748-09/08/1748	0,428 820 5	
13 O	20/08/1766	0,549 012 7	

n° type	Date	Grandeur	Durée
14 O	30/08/1784	0,660 419 1	
15 O	11/09/1802-12/09/1802	0,761 739 1	
16 O	22/09/1820	0,851 306 1	
17 O	03/10/1838	0,929 032 8	
18 O	13/10/1856-14/10/1856	0,996 275 5	
19 T	25/10/1874	1,049 995 7	0 h 32 min 47 s
20 T	04/11/1892	1,093 273 2	0 h 44 min 11 s
21 T	16/11/1910-17/11/1910	1,124 903 0	0 h 50 min 37 s
22 T	27/11/1928	1,148 909 5	0 h 54 min 50 s
23 T	08/12/1946	1,164 217 3	0 h 57 min 18 s
24 T	19/12/1964	1,175 150 8	0 h 58 min 59 s
25 T	30/12/1982	1,182 509 6	1 h 00 min 05 s
26 T	09/01/2001	1,189 185 1	1 h 01 min 05 s
27 T	21/01/2019	1,195 605 9	1 h 02 min 02 s
28 T	31/01/2037	1,207 675 7	1 h 03 min 44 s
29 T	11/02/2055-12/02/2055	1,224 910 5	1 h 06 min 02 s
30 T	22/02/2073	1,250 600 2	1 h 09 min 13 s
31 T	05/03/2091	1,283 434 1	1 h 12 min 54 s
32 T	16/03/2109-17/03/2109	1,329 852 1	1 h 17 min 32 s
33 T	28/03/2127	1,385 111 8	1 h 22 min 17 s
34 T	07/04/2145	1,455 184 8	1 h 27 min 19 s
35 T	18/04/2163-19/04/2163	1,533 962 3	1 h 31 min 51 s
36 T	29/04/2181	1,628 252 2	1 h 35 min 55 s
37 T	10/05/2199	1,729 806 6	1 h 38 min 50 s
38 T	21/05/2217-22/05/2217	1,844 458 3	1 h 40 min 24 s
39 T	02/06/2235	1,784 094 2	1 h 40 min 08 s
40 T	12/06/2253	1,652 340 5	1 h 37 min 36 s
41 T	23/06/2271-24/06/2271	1,516 954 8	1 h 32 min 18 s
42 T	04/07/2289	1,376 433 4	1 h 23 min 20 s
43 T	16/07/2307	1,233 369 1	1 h 09 min 08 s
44 T	26/07/2325	1,090 277 5	0 h 45 min 06 s
45 O	07/08/2343	0,949 031 4	
46 O	17/08/2361	0,811 865 1	
47 O	28/08/2379	0,679 958 8	

n° type	Date	Grandeur	Durée
48 O	07/09/2397-08/09/2397	0,556 357 3	
49 O	19/09/2415	0,441 888 5	
50 O	29/09/2433	0,336 119 9	
51 O	10/10/2451-11/10/2451	0,242 378 3	
52 O	21/10/2469	0,160 718 4	
53 O	01/11/2487	0,091 167 0	
54 O	12/11/2505-13/11/2505	0,031 376 8	
55 P	24/11/2523	1,024 269 1	
56 P	04/12/2541	0,992 169 5	
57 P	15/12/2559-16/12/2559	0,968 084 3	
58 P	26/12/2577	0,949 128 4	
59 P	06/01/2596	0,934 220 4	
60 P	17/01/2614-18/01/2614	0,920 610 5	
61 P	29/01/2632	0,904 781 1	
62 P	08/02/2650	0,886 328 1	
63 P	19/02/2668-20/02/2668	0,861 524 8	
64 P	02/03/2686	0,828 071 1	
65 P	13/03/2704	0,783 532 9	
66 P	24/03/2722-25/03/2722	0,728 928 3	
67 P	04/04/2740	0,661 984 8	
68 P	15/04/2758	0,581 094 7	
69 P	25/04/2776-26/04/2776	0,487 818 0	
70 P	07/05/2794	0,381 174 1	
71 P	17/05/2812	0,263 954 4	
72 P	28/05/2830	0,134 587 0	

On remarque que cette suite est complète, elle comporte 72 éclipses réparties sur 1280 ans entre 1550 et 2830. Elle comporte 8 éclipses par la pénombre, puis 10 éclipses par l'ombre, suivies de 26 éclipses totales puis 10 éclipses par l'ombre et 18 éclipses par la pénombre, la première étant totale. On remarquera la dissymétrie des éclipses totales. En effet le maximum est proche de l'éclipse numéro 38, donc de la vingtième éclipse totale. L'éclipse du 9 janvier 2001, éclipse numéro 26 est dans la partie croissante de la suite. On doit donc avoir le passage au nœud suivi du maximum de l'éclipse suivi de l'opposition.

Les éphémérides de la Lune nous donnent les informations suivantes :

- le 09/01/2001 à 13 h 53 min 11 s UTC : la Lune passe par le nœud ascendant de son orbite, longitude moyenne = +105° 32,0'.
- le 09/01/2001 à 20 h 20 min 36 s UTC : maximum de l'éclipse de Lune.
- le 09/01/2001 à 20 h 24 min 24 s UTC : pleine Lune.
- le 10/01/2001 à 09 h 00 min 06 s UTC : la Lune au périgée, distance minimale à la Terre d = 357 130 km, diamètre apparent = 33,5'.

On constate que la suite d'éclipses est au nœud ascendant, c'est donc une éclipse au nord du cône d'ombre donc au sud de la Lune. On remarque également que cette éclipse est une éclipse proche du périgée, donc la durée totale de l'éclipse n'est pas très grande, ce qui est bien le cas : 5 h 11 min 11 s.

19

Les éclipses anciennes de Lune

1. Visibilité des éclipses anciennes à l'œil nu

L'Astronomie des Césars fut publiée par Petrus Apianus en 1540. Dédiée à Charles Quint et à son frère Ferdinand, *l'Astronomie des Césars* permet de déterminer les positions planétaires, ainsi que les éclipses, pour une période comprise entre 7000 av. J.-C. et 7000 ap. J.-C. ! Apianus utilise à la perfection l'usage des disques mobiles, ou « volvelles ». Des fils de soie permettent de lire les graduations sur les cadrans extérieurs. Les calculs sont effectués en utilisant les théories de C. Ptolémée. La figure 19.1 nous montre une des pages dédiées au calcul des éclipses de Lune. On y voit la Lune, les cônes d'ombre et de pénombre de la Terre représentés avec des proportions assez bonnes.

Difficilement décelables à l'œil nu, les éclipses de Lune par la pénombre ne seront pas observées avant l'apparition de la lunette astronomique mais il convient malgré tout de signaler l'observation d'une éclipse par la pénombre par les Babyloniens le 1 août –187 (188 av. J.-C.). Une étude des observations des éclipses de Lune publiées par les chroniqueurs arabes médiévaux faite par Said et F.R. Stephenson en 1991 montre que l'on a des observations à l'œil nu d'éclipses partielles par l'ombre jusqu'à des grandeurs de 0,28 et de 0,12.



Figure 19.1. Les éclipses de Lune de *l'Astronomie des Césars*. © BNF.

1.1. Les éclipses anciennes

Les Babyloniens surent prédire la date et la visibilité des éclipses de Lune relativement tôt. On dispose d'un texte datant du règne de Ukinzer (731-729 av. J.-C.) où figure la prédiction de l'éclipse de Lune du 9 avril –730 avec la mention de son invisibilité à Babylone. On distingue deux types de sources : tout d'abord les éclipses babyloniennes décrites par Ptolémée dans l'*Almageste*, qui sont au nombre de dix (Tab. 19.I).

Tableau 19.I. Les éclipses babyloniennes.

Date de l'éclipse	Type de l'éclipse
19 mars –720*	Totale (1,49)
8 mars –719*	Partielle (0,08)
1 septembre –719	Partielle (0,46)
22 avril –620	Partielle (0,18)
16 juillet –522	Partielle (0,56)
19 novembre –501*	Partielle (0,22)
25 avril –490	Partielle (0,12)
23 décembre –382*	Partielle (0,23)
18 juin –381*	Partielle (0,51)
12 décembre –381*	Totale (1,50)

(*) Ces observations ont été utilisées par Ptolémée pour calculer les variations de l'anomalie de la Lune. En plus de ces observations, Ptolémée donne six autres observations d'éclipses de Lune dont cinq ont été faites à Alexandrie et une à Rhodes.

L'autre source d'observations d'éclipses de Lune par les Babyloniens est constituée des textes cunéiformes. On y dénombre une soixantaine d'éclipses réparties entre 695 av. J.-C. et 67 av. J.-C.

Les données d'observations d'éclipses de Lune par les Chinois sont plus tardives, elles sont réparties entre l'an 434 et l'an 1280, les données d'observations d'éclipses de Lune par les Arabes sont comprises entre l'an 854 et l'an 1019. La totalité de ces observations a été utilisée, avec les observations d'éclipses de Soleil, pour déterminer les écarts entre le Temps universel et le Temps terrestre durant les siècles passés.

2. Quelques éclipses historiques

2.1. L'éclipse d'Alexandre

Cette éclipse totale de Lune (m = 1,23) eu lieu le 20 septembre –330 (331 av. J.-C.), à l'époque des combats entre Alexandre le Grand et les forces perses de Darius III, à Gaugamèles près d'Arbèles. La vue de cette éclipse aurait désorganisé les forces perses et permis la victoire d'Alexandre 11 jours plus tard (Plutarque, *Vie d'Alexandre*, Livre XXXI). Cette éclipse est également mentionnée par Pline l'Ancien (23-79 ap. J.-C.) dans son *Histoire Naturelle* (Livre II). Selon lui, cette éclipse fut également visible en Sicile au lever du Soleil alors qu'elle a eu lieu la nuit à Arbèles. Pline utilise ce décalage horaire pour prouver que la Terre est ronde. L'éclipse d'Alexandre est également décrite par Arrien de Nicomédie (v. 95 - v. 175) dans *L'Expédition d'Alexandre* ou *Anabase* (Livre II) ; il situe la bataille d'Arbèles au mois de Pyaneptiôn lorsque Aristophane était Archonte d'Athènes. Une autre description intéressante de l'éclipse est celle donnée par Quinte-Curce (I^{er} siècle. ap. J.-C.) dans son *Histoire d'Alexandre le Grand* (Livre IV). C'est, en effet, une des plus anciennes allusions à l'aspect rougeâtre des éclipses totales de Lune.



Bataille de Gaugamèles (Mosaïque, musée archéologique de Naples) © D.R.

2.2. L'éclipse de la chute de Constantinople

Cette éclipse partielle de Lune (m = 0,746) eu lieu le 22 mai de l'an 1453 et mit fin au siège de Constantinople par les troupes turques du Sultan Mohammed II. La ville fut vaillamment défendue par l'empereur Constantin Dragasès (1448-1453) et le Génois Giustiniani. Une ancienne prophétie affirmait que la ville ne pourrait tomber qu'à la Lune croissante alors qu'ils avaient déjà repoussé trois assauts avec succès et confiance, le lever de la pleine Lune éclipsée démoralisa les assiégés. La ville fut prise le 29 mai. Cette victoire des Turcs sur les forces chrétiennes marqua la fin de l'empire byzantin et le début de l'empire ottoman.



Cette illustration est tirée d'un manuscrit français de 1455. À gauche on distingue la Corne d'Or, et au fond, le détroit du Bosphore et la mer de Marmara. © D.R.

2.3. L'éclipse de C. Colomb

Cette éclipse totale de Lune (m = 1,097) eu lieu le 29 février de l'an 1504. Lors de son quatrième voyage, Christophe Colomb échoua sur les côtes de la Jamaïque. Suite à la mutinerie d'une partie de son équipage qui déroba une partie de ses réserves, Christophe Colomb se trouva à court de vivres, les indiens refusant de l'approvisionner. Christophe Colomb

prédit aux indiens une éclipse totale de Lune trois jours avant sa venue et la présenta comme un signe céleste du mécontentement du Dieu des chrétiens. L'éclipse eu lieu effectivement la nuit du 29 février et fut, nous dit Christophe Colomb, d'un rouge sombre. Fortement impressionnés par ce phénomène céleste, les indiens ravitaillèrent Christophe Colomb et son équipage jusqu'à l'arrivée des secours quatre mois plus tard. Christophe Colomb ne cite pas ses sources pour la détermination de cette éclipse. À cette époque trois sources étaient possibles : les éphémérides du *Calendarium* de Regiomontanus (pour Nuremberg), l'*Almanach Perpetuum* d'Abraham Zacuto (pour Salamanque) et enfin le *Lunarium* de Bernard Granollachs (pour Barcelone). Christophe Colomb a vraisemblablement utilisé le *Calendarium* de Regiomontanus. La Lune se leva éclipsée, C. Colomb mesura la durée de l'éclipse (cinq sabliers depuis le coucher du Soleil) et en déduisit la longitude du lieu. Mais dans le calcul de cette longitude, il va commettre une erreur importante de 37°.



Illustration de l'*Histoire des Astres* de S. Rambooson. © D.R.

3. Rotondité de la Terre

Aristote (384-322 av. J.-C.) dans le *Traité du ciel* (Livre II, 13) nous informe que les Pythagoriciens, notamment Philolaos (~470 - ~390 av. J.-C.), avaient observé qu'il y avait plus d'éclipses de Lune que d'éclipses de Soleil. Ils avaient expliqué ce phénomène en supposant l'existence d'une seconde Terre, l'anti-Terre, située à l'opposé de la Terre par rapport à un feu central et qui venait s'interposer entre le Soleil et la Lune. Cette anti-Terre n'était donc pas visible de la Terre et doublait le nombre d'éclipses de Lune. Cette explication, bien qu'erronée, prouve que les Pythagoriciens avaient bien compris le

mécanisme des éclipses, notamment que les corps célestes sont sphériques et que certains sont lumineux et d'autres plus ou moins opaques.

L'observation des éclipses de Lune a été utilisée par Aristote pour prouver que la Terre était ronde ainsi, dans le *Traité du ciel* (Livre II, 14) on peut lire « *Lors des éclipses, la Lune a toujours pour limite une ligne courbe : par conséquent, comme l'éclipse est due à l'interposition de la Terre, c'est la forme de la surface de la Terre qui est cause de la forme de cette ligne* ». On remarquera que cette preuve n'est pas suffisante pour prouver la sphéricité de la Terre, un cylindre et un disque ayant également des ombres circulaires. Le dessin de la figure 19.2 illustre la démonstration d'Aristote, il est extrait de la *Cosmographie* de Petrus Apianus (1581).

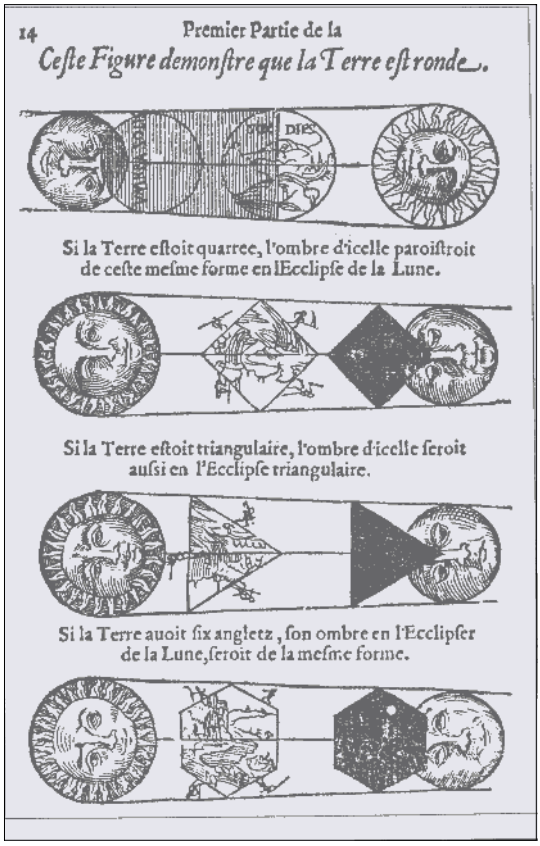


Figure 19.2. Démonstration de la rotondité de la Terre. © BNF.

20

Le calcul de la distance Terre-Lune

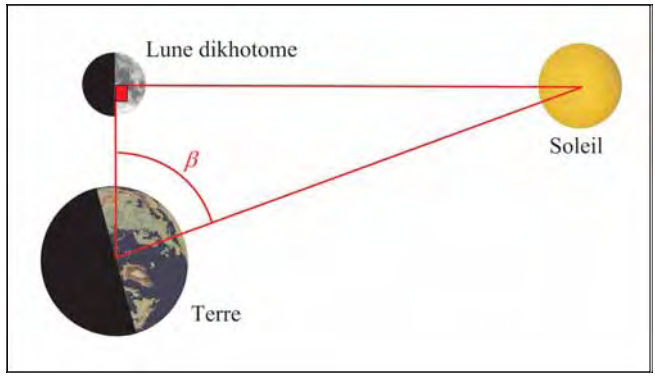
1. Par Aristarque de Samos

Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) fut l'élève de Straton de Lampsaque, il est l'auteur du premier système héliocentrique, système décrit dans son livre *Les Hypothèses* (disparu) cité par Archimède dans son traité de l'*Arénaire*. Aristarque est également l'auteur du traité *Sur la grandeur et la distance du Soleil et de la Lune*.

Pour le calcul des distances Terre-Lune et Terre-Soleil, il fait les hypothèses suivantes :

1 - La Lune reçoit la lumière du Soleil.
2 - La Terre peut être considérée comme un point et comme le centre de l'orbite de la Lune.
3 - Lorsque la Lune nous parait dikhotome (coupée en deux portions égales), elle offre à nos regards son grand cercle, qui détermine la partie éclairée et la partie obscure de cet astre.
4 - Lorsque la Lune nous parait dikhotome, sa distance du Soleil est moindre du quart de la circonférence, de la trentième partie de ce quart.
5 - La largeur de l'ombre est de deux Lunes.
6 - L'arc soutendu dans le ciel par la Lune est la quinzième partie d'un signe.

L'hypothèse 4 d'Aristarque.



Comme on le constate, certaines de ces hypothèses sont fausses : l'hypothèse 4 revient à donner à l'angle β la valeur de 87°. Cette valeur explique son erreur dans le calcul de la distance Terre-Soleil. L'hypothèse 6 donne à la Lune un diamètre de 2°, valeur quatre fois trop forte.

À partir de ces hypothèses, Aristarque va déduire que la distance Soleil-Terre est supérieure à 18 fois la distance Terre-Lune et inférieure à 20 fois la distance Terre-Lune. Il déduit de ces proportions les valeurs suivantes :

- le diamètre lunaire est inférieur à 2/45 distance Terre-Lune et supérieur à 1/30 distance Terre-Lune ;
- le diamètre solaire est inférieur à 43/6 diamètres terrestres et supérieur à 19/3 diamètres terrestres ;
- le diamètre terrestre est inférieur à 60/19 diamètres lunaires et supérieur à 108/43 diamètres lunaires.

1.1. Remarques

Il convient de remarquer, qu'à l'époque d'Aristarque, les Grecs n'avaient aucune notion de trigonométrie, les premières tables de cordes sont attribuées à Hipparque. C'est pourquoi Aristarque ne tire pas directement la valeur du rapport des distances Terre-Lune et Terre-Soleil de l'angle β, mais encadre cette proportion grâce à des considérations purement géométriques. On trouve dans la littérature et sur Internet de nombreux « exemples » de la détermination de la distance Terre-Lune par Aristarque, avec des hypothèques qui sont très variées (ombre cylindrique, ombre de trois diamètres lunaires, diamètre apparent de la Lune égal à 30'....) et utilisant des méthodes

trigonométriques. C'est fort dommage car les méthodes employées par Aristarque sont remarquables et ont un intérêt pédagogique certain.

On peut consulter, sur le site *Gallica* de la Bibliothèque Nationale de France, une version française du Traité d'Aristarque de Samos *Sur les grandeurs et les distances du Soleil et de la Lune* traduite du grec par le Comte de Fortia d'Urban et édité en 1823.

On trouve, dans un passage d'Archimède, qu'Aristarque a également utilisé la valeur d'un demi-degré pour le diamètre lunaire, l'usage de la valeur de 2° dans le traité *Sur la grandeur et la distance du Soleil et de la Lune* étant parfois présenté comme une valeur hypothétique utilisée par l'auteur dans une démonstration qui se veut plus didactique que physique.

2. Une des démonstrations d'Aristarque

La démonstration suivante est issue de la traduction du Comte de Fortia d'Urban et se trouve dans la proposition VIII du Traité d'Aristarque. Pour rendre la démonstration plus lisible, je l'ai retranscrite en termes mathématiques plus contemporains.

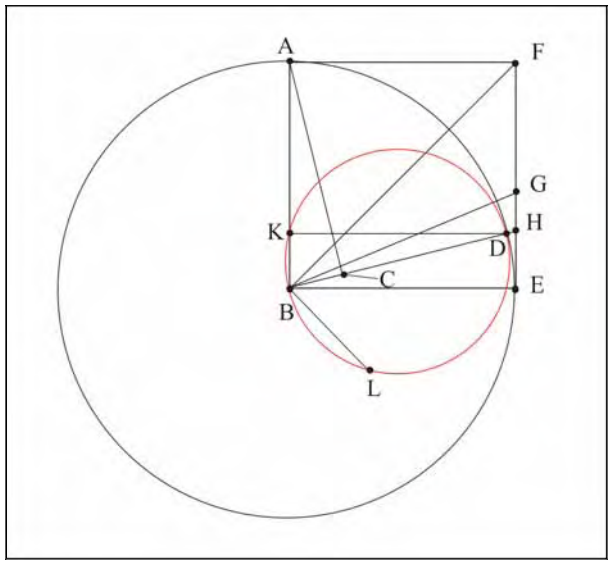
2.1. La proposition

La proposition VIII est la suivante *: « La distance à laquelle le soleil se trouve de la terre est plus grande dix-huit fois, mais moindre vingt fois que celle à laquelle la lune se trouve de la terre »*.

2.2. La démonstration

Soit A le centre du Soleil, B le centre de la Terre et C le centre de la Lune. Traçons le cercle (c) de centre B et de rayon AB, le rayon BD passant par C et faisant un angle de 3° avec le rayon BE perpendiculaire à BA (l'angle CBE est la trentième partie de l'angle droit). On construit le carré ABEF, ainsi que sa diagonale BF. Soit BG la bissectrice de l'angle EBF. L'angle CBE est la trentième partie d'un angle droit (90°/30) et l'angle GBE est le quart d'un angle droit (90°/4), donc l'angle GBE vaut les 15/2 de l'angle CBE. Le rapport de EG sur EH est plus grand que le rapport des deux angles GBE et CBE, donc plus grand que 15/2. BF est la diagonale du carré ABEF, donc le carré de BF est le double du carré de BE. De plus le carré construit sur FG est aussi le double du carré construit sur EG. Or comme 49 est inférieur au double de 25, le carré de FG/EG = 2 est

Démonstration d'Aristarque.



supérieur à 49/25, le rapport FG/EG est donc supérieur à 7/5. Donc EF/EG = (EG+GF)/EG = 1 + GF/EG est supérieur à 12/5 ou 36/15.

Ainsi EG/EH est plus grand que 15/2 et EF/EG est supérieur à 36/15, donc EF/EH est supérieur à 18. Comme EF = BE, donc BE/EH est supérieur à 18, et comme BH est supérieur à BE, BH/EH est également supérieur à 18. Or les triangles ABC et EBH sont semblables, donc les rapports BH/EH et AB/BC sont égaux et l'on a bien BA supérieur à 18 BC. La distance Terre-Soleil est supérieure à 18 fois la distance Lune-Soleil.

Reste à prouver que ce rapport est inférieur à 20. Pour cela, traçons la parallèle à BE, cette parallèle coupe AB en K. Traçons le cercle passant par les points BDK et soit L le point du cercle tel que LB soit le côté d'un hexagone inscrit dans ce cercle. L'angle DBK est égal à l'angle DBE égal à la trentième partie d'un angle droit, l'arc de cercle BK vaut le double donc la quinzième partie d'un angle droit ou encore la soixantième partie de la circonférence. Or BL est la sixième partie de cette même circonférence ; donc l'arc BL est dix fois plus grand que l'arc BK. Comme le rapport des cordes BL/BK est inférieur au rapport des arcs BL/BK, la corde BL est inférieure à dix fois la corde BK. BD étant égal à deux BL, BD est donc inférieur à 20 BK. Puisque les triangles DKB et ABC sont semblables alors BD/BK = AB/BC, donc AB est bien inférieur à 20 BC.

2.3. Remarque

Bien évidemment, si l'on connaît la trigonométrie, cette longue démonstration élégante est remplacée par une simple équation à savoir : AB/BC = 1/sin 3° d'où AB/BC = 19,10.

3. Par Claude Ptolémée

Ptolémée, dans l'*Almageste* (livre V chapitre 14), nous décrit deux méthodes permettant de calculer le diamètre apparent de la Lune, puis les distances Terre-Lune et Terre-Soleil.

3.1. Le calcul du diamètre lunaire

Pour le calcul du diamètre apparent de la Lune, Ptolémée utilise deux éclipses de Lune observées à Babylone. La première a eu lieu l'an 5 de l'ère de Nabopolassar, qui est l'année 127 de l'ère de Nabonassar, à la fin de la onzième heure du 27 au 28 du mois égyptien Athyr (troisième mois de l'année). Cette date correspond à la nuit du 21 au 22 avril –620 (621 av. J.-C.). Ptolémée écrit « *On vit à Babylone la Lune commencer à s'éclipser ; et la plus grande phase de cette éclipse fut du quart du diamètre dans la partie méridionale de l'astre* ». Puis il calcule la position de la Lune sur son orbite pour l'instant du maximum de l'éclipse et trouve qu'elle se trouve à 9,5° de son nœud et que la distance angulaire entre le centre de la Lune et le centre de l'axe des cônes est de 48,5'. La seconde éclipse de Lune utilisée est celle de l'an 7 de Cambyse, c'est-à-dire l'an 225 de l'ère de Nabonassar, elle s'est produite à une heure avant minuit du 17 au 18 du mois égyptien Phamenoth, ce qui correspond à l'éclipse du 16 juillet –522 (523 av. J.-C.). Ptolémée constate « *On vit à Babylone la lune s'éclipser de la moitié de son diamètre dans la partie boréale* » et il calcule qu'au maximum de l'éclipse la Lune est à 7,8° de son nœud et que la distance angulaire entre le centre de la Lune et le centre de l'axe des cônes est de 40,6'. Ptolémée calcule également que les deux éclipses ont lieu sensiblement lorsque la Lune est à une même distance angulaire de son apogée, donc que les diamètres lunaires apparents sont sensiblement identiques. Alors la différence des distances à l'axe des cônes est égale au quart de diamètre lunaire et Ptolémée en déduit que le diamètre lunaire est de l'ordre de 31,3'. À partir de la deuxième éclipse, Ptolémée calcule également le rayon du cône d'ombre en fonction du rayon apparent de la Lune et il trouve que ce rayon « *est un peu moindre que le double et 3/5 du rayon de la lune* ».

Les tableaux 20.I et 20.II donnent les valeurs calculées avec les théories actuelles et les valeurs données par Ptolémée dans l'*Almageste*.

Tableau 20.I. Éclipse des 21 et 22 avril –620.

L'éclipse des 21 et 22 avril –620		
	Valeurs calculées actuelles	Valeurs données par Ptolémée
Magnitude	0,1818685	
Diamètre lunaire apparent	29,51′	
Instant du maximum	1 h 56,2 min UT	
Instant du maximum en heure locale	4 h 54,2 min	environ 6 h
Distance centre de la Lune-axe des cônes	48′ 31,91″	48′ 30″
Longitude de la Lune	204° 53′ 31,5″	205° 32′
Élongation par rapport au nœud	8,77°	9,3°
Longitude par rapport à l'apogée	339° 6′	340° 7′

Tableau 20.II. Éclipse du 16 juillet –522.

L'éclipse du 16 juillet –522		
	Valeurs calculées actuelles	Valeurs données par Ptolémée
Magnitude	0,5615770	
Diamètre lunaire apparent	29,63′	
Instant du maximum	20 h 28,8 min UT	
Instant du maximum en heure locale	23 h 26,8 min	environ 23 h
Distance centre de la Lune-axe des cônes	37′ 21,56″	40′ 40″
Longitude de la Lune	287° 0′ 41,68″	288° 14′
Élongation par rapport au nœud	6,75°	7,8°
Longitude par rapport à l'apogée	31° 55′	28° 5′

Ptolémée garde cette valeur de 31′ 20″ pour le diamètre lunaire et la considère comme constante alors qu'il tient compte des variations de la distance Terre-Lune. Il estime le maximum de cette distance à 64 + 1/6 rayons terrestres. La valeur moyenne étant de 59 rayons terrestres, il représente le mouvement de la Lune à l'aide d'un cercle

déférent de 59 rayons terrestres et d'un épicycle de 5 + 1/6 rayons terrestres. En faisant l'hypothèse que le diamètre apparent du Soleil est égal au diamètre apparent de la Lune à son apogée, il déduit de ces valeurs la distance Terre-Soleil et la distance de la Terre au sommet de son cône d'ombre. Il trouve une distance Terre-Soleil de 605 rayons terrestres et une distance Terre-sommet du cône d'ombre de 134 rayons terrestres.

Bibliographie

Site de Gallica : gallica.bnf.fr

Traité d'Aristarque de Samos sur les grandeurs et les distances du Soleil et de la Lune, traduit en français par M. Le Comte de Fortia d'Urbain, F. Didot, 1823.

The Almagest, C. Ptolémée, traduit en langue anglaise par G.J. Toomer, Londres, Duckworth, 1984.

Annexe A : Les éclipses entre 2000 et 2050

1. Éclipses de Soleil et de Lune entre 2000 et 2050

Les tableaux de cette annexe contiennent les listes de toutes les éclipses de Lune et de Soleil comprises entre l'an 2000 et l'an 2050.

Pour chaque éclipse nous donnons sa date, le type de l'éclipse et sa magnitude.

Pour les types d'éclipses nous utilisons les abréviations suivantes :

pour les éclipses de Soleil sur fond jaune

- P : éclipse partielle,
- A : éclipse annulaire centrale,
- T : éclipse totale centrale,
- A-T : éclipse annulaire-totale (mixte) centrale,
- (A): éclipse annulaire non centrale,
- (T) : éclipse totale non centrale,

pour les éclipses de Lune sur fond bleu

P : éclipse par la pénombre,

- O : éclipse par l'ombre,
- T : éclipse totale.

Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude
Lune	21/01/2000	T	1,3246025	Soleil	05/02/2000	P	0,5796039				
Soleil	01/07/2000	P	0,4768268	Lune	16/07/2000	T	1,7686611	Soleil	31/07/2000	P	0,6037875
Soleil	25/12/2000	P	0,7231559	Lune	09/01/2001	T	1,1891851				
Soleil	21/06/2001	T	1,0252147	Lune	05/07/2001	O	0,4947989				
Soleil	14/12/2001	A	0,9844505	Lune	30/12/2001	P	0,8936772				
Lune	26/05/2002	P	0,6896106	Soleil	10/06/2002 11/06/2002	A	0,9985247	Lune	24/06/2002	P	0,2095559
Lune	19/11/2002 20/11/2002	P	0,8600101	Soleil	04/12/2002	T	1,0126156				
Lune	16/05/2003	T	1,1278615	Soleil	31/05/2003	A	0,9696001				
Lune	08/11/2003- 09/11/2003	T	1,0178456	Soleil	23/11/2003- 24/11/2003	T	1,0193793				
Soleil	19/04/2004	P	0,7368680	Lune	04/05/2004	T	1,3036097				
Soleil	14/10/2004	P	0,9287337	Lune	28/10/2004	T	1,3084634				
Soleil	08/04/2005	AT	1,0041093	Lune	24/04/2005	P	0,8651423				
Soleil	03/10/2005	A	0,9791830	Lune	17/10/2005	O	0,0628811				
Lune	14/03/2006- 15/03/2006	P	1,0303908	Soleil	29/03/2006	T	1,0262056				
Lune	07/09/2006	O	0,1837777	Soleil	22/09/2006	A	0,9679617				
Lune	03/03/2007- 04/03/2007	T	1,2330754	Soleil	19/03/2007	P	0,8761041				
Lune	28/08/2007	T	1,4757970	Soleil	11/09/2007	P	0,7508816				
Soleil	07/02/2008	A	0,9828846	Lune	21/02/2008	T	1,1062402				
Soleil	01/08/2008	T	1,0201517	Lune	16/08/2008	O	0,8079074				
Soleil	26/01/2009	A	0,9644953	Lune	09/02/2009	P	0,8995390				
Lune	07/07/2009	P	0,1562328	Soleil	21/07/2009 22/07/2009	T	1,0404188	Lune	05/08/2009 06/08/2009	P	0,4023110
Lune	31/12/2009	O	0,0766329	Soleil	15/01/2010	A	0,9598822				
Lune	26/06/2010	O	0,5367714	Soleil	11/07/2010	T	1,0294731				
Lune	21/12/2010	T	1,2563702	Soleil	04/01/2011	P	0,8580644				
Soleil	01/06/2011	P	0,6014134	Lune	15/06/2011	T	1,7001834	Soleil	01/07/2011	P	0,0970207
Soleil	25/11/2011	P	0,9049016	Lune	10/12/2011	T	1,1061698				
Soleil	20/05/2012 21/05/2012	A	0,9723279	Lune	04/06/2012	O	0,3707422				
Soleil	13/11/2012- 14/11/2012	T	1,0254674	Lune	28/11/2012	P	0,9155472				
Lune	25/04/2013	O	0,0148329	Soleil	09/05/2013 10/05/2013	A	0,9776006	Lune	25/05/2013	P	0,0160033
Lune	18/10/2013 19/10/2013	P	0,7652109	Soleil	03/11/2013	T	1,0083608				
Lune	15/04/2014	T	1,2906717	Soleil	29/04/2014	(A)	0,9870812				
Lune	08/10/2014	T	1,1661698	Soleil	23/10/2014	P	0,8118752				
Soleil	20/03/2015	T	1,0227204	Lune	04/04/2015	T	1,0011559				
Soleil	13/09/2015	P	0,7876400	Lune	28/09/2015	T	1,2764287				

Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude
Soleil	08/03/2016 09/03/2016	T	1,0229372	Lune	23/03/2016	P	0,7751182				
Soleil	01/09/2016	A	0,9872097	Lune	16/09/2016	P	0,9081124				
Lune	10/02/2017 11/02/2017	P	0,9884086	Soleil	26/02/2017	A	0,9965225				
Lune	07/08/2017	O	0,2467410	Soleil	21/08/2017	T	1,0157271				
Lune	31/01/2018	T	1,3154892	Soleil	15/02/2018	P	0,5992290				
Soleil	13/07/2018	P	0,3365252	Lune	27/07/2018	T	1,6089631	Soleil	11/08/2018	P	0,7372376
Soleil	05/01/2019 06/01/2019	P	0,7149238	Lune	21/01/2019	T	1,1956059				
Soleil	02/07/2019	T	1,0234099	Lune	16/07/2019- 17/07/2019	O	0,6531531				
Soleil	26/12/2019	A	0,9854480	Lune	10/01/2020	P	0,8958968				
Lune	05/06/2020	P	0,5685818	Soleil	21/06/2020	A	0,9974166	Lune	05/07/2020	P	0,3546691
Lune	30/11/2020	P	0,8285569	Soleil	14/12/2020	T	1,0131100				
Lune	26/05/2021	T	1,0097577	Soleil	10/06/2021	A	0,9721316				
Lune	19/11/2021	O	0,9741818	Soleil	04/12/2021	T	1,0187996				
Soleil	30/04/2022	P	0,6397212	Lune	16/05/2022	T	1,4137517				
Soleil	25/10/2022	P	0,8623437	Lune	08/11/2022	T	1,3591909				
Soleil	20/04/2023	AT	1,0070213	Lune	05/05/2023	P	0,9637652				
Soleil	14/10/2023	A	0,9764046	Lune	28/10/2023	O	0,1223879				
Lune	25/03/2024	P	0,9560172	Soleil	08/04/2024	T	1,0287289				
Lune	18/09/2024	O	0,0849457	Soleil	02/10/2024	A	0,9666760				
Lune	14/03/2025	T	1,1787132	Soleil	29/03/2025	P	0,9381424				
Lune	07/09/2025	T	1,3618771	Soleil	21/09/2025	P	0,8552514				
Soleil	17/02/2026	A	0,9818863	Lune	03/03/2026	T	1,1507411				
Soleil	12/08/2026	T	1,0197565	Lune	28/08/2026	O	0,9302625				
Soleil	06/02/2027	A	0,9644268	Lune	20/02/2027 21/02/2027	P	0,9267730				
Lune	18/07/2027	P	0,0015406	Soleil	02/08/2027	T	1,0399794	Lune	17/08/2027	P	0,5460452
Lune	12/01/2028	O	0,0664968	Soleil	26/01/2028	A	0,9607672				
Lune	06/07/2028	O	0,3892382	Soleil	22/07/2028	T	1,0284600				
Lune	31/12/2028	T	1,2465488	Soleil	14/01/2029	P	0,8718771				
Soleil	12/06/2029	P	0,4579048	Lune	26/06/2029	T	1,8439275	Soleil	11/07/2029	P	0,2303014
Soleil	05/12/2029	P	0,8913015	Lune	20/12/2029 21/12/2029	T	1,1174569				
Soleil	01/06/2030	A	0,9725113	Lune	15/06/2030	O	0,5028171				
Soleil	25/11/2030	T	1,0238658	Lune	09/12/2030- 10/12/2030	P	0,9416239				
Lune	07/05/2031	P	0,8815041	Soleil	21/05/2031	A	0,9798511	Lune	05/06/2031	P	0,1295111
Lune	30/10/2031	P	0,7164128	Soleil	14/11/2031	AT	1,0057140				
Lune	25/04/2032	T	1,1913620	Soleil	09/05/2032	A	0,9982624				
Lune	18/10/2032	T	1,1030780	Soleil	03/11/2032	P	0,8558966				
Soleil	30/03/2033	T	1,0235238	Lune	14/04/2033	T	1,0947340				

Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude
Soleil	23/09/2033	P	0,6890949	Lune	08/10/2033	T	1,3497570				
Soleil	20/03/2034	T	1,0233533	Lune	03/04/2034	P	0,8548991				
Soleil	12/09/2034	A	0,9872183	Lune	28/09/2034	O	0,0145157				
Lune	22/02/2035	P	0,9651991	Soleil	09/03/2035 10/03/2035	A	0,9963617				
Lune	18/08/2035 19/08/2035	O	0,1040369	Soleil	01/09/2035 02/09/2035	T	1,0164541				
Lune	11/02/2036 12/02/2036	T	1,2995071	Soleil	27/02/2036	P	0,6287435				
Soleil	23/07/2036	P	0,1990944	Lune	06/08/2036 07/08/2036	T	1,4546534	Soleil	21/08/2036	P	0,8627597
Soleil	16/01/2037	P	0,7053069	Lune	31/01/2037	T	1,2076757				
Soleil	13/07/2037	T	1,0210949	Lune	27/07/2037	O	0,8095403				
Soleil	05/01/2038	A	0,9867935	Lune	21/01/2038	P	0,8998936				
Lune	17/06/2038	P	0,4424957	Soleil	02/07/2038	A	0,9959715	Lune	16/07/2038	P	0,4999838
Lune	11/12/2038	P	0,8046476	Soleil	25/12/2038 26/12/2038	T	1,0138570				
Lune	06/06/2039	O	0,8849124	Soleil	21/06/2039	A	0,9730915				
Lune	30/11/2039	O	0,9426442	Soleil	15/12/2039	T	1,0182248				
Soleil	11/05/2040	P	0,5307065	Lune	26/05/2040	T	1,5348281				
Soleil	04/11/2040	P	0,8078634	Lune	18/11/2040	T	1,3976964				
Soleil	30/04/2041	T	1,0098790	Lune	15/05/2041 16/05/2041	O	0,0645704				
Soleil	24/10/2041 25/10/2041	A	0,9737120	Lune	08/11/2041	O	0,1699382				
Lune	05/04/2042	P	0,8683932	Soleil	19/04/2042 20/04/2042	T	1,0311736				
Lune	29/09/2042	P	0,9529186	Soleil	13/10/2042- 14/10/2042	A	0,9653990				
Lune	25/03/2043	T	1,1144503	Soleil	09/04/2043	(T)	1,0101227				
Lune	18/09/2043 19/09/2043	T	1,2555977	Soleil	03/10/2043	(A)	0,9499237				
Soleil	28/02/2044	A	0,9803831	Lune	13/03/2044	T	1,2031138				
Soleil	22/08/2044 23/08/2044	T	1,0186573	Lune	07/09/2044	T	1,0459220				
Soleil	16/02/2045- 17/02/2045	A	0,9646042	Lune	03/03/2045	P	0,9624364				
Soleil	12/08/2045	T	1,0391413	Lune	27/08/2045	P	0,6828991				
Lune	22/01/2046	O	0,0535506	Soleil	05/02/2046 06/02/2046	A	0,9619708				
Lune	17/07/2046 18/07/2046	O	0,2460961	Soleil	02/08/2046	T	1,0270214				
Lune	11/01/2047 12/01/2047	T	1,2343819	Soleil	25/01/2047- 26/01/2047	P	0,8912473				
Soleil	23/06/2047	P	0,3131735	Lune	07/07/2047	T	1,7513426	Soleil	22/07/2047	P	0,3604899
Soleil	16/12/2047 17/12/2047	P	0,8818944	Lune	01/01/2048	T	1,1280622				
Soleil	11/06/2048	A	0,9724532	Lune	25/06/2048 26/06/2048	O	0,6391101				

Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude	Corps	Date	Type	Magnitude
Soleil	05/12/2048	T	1,0224418	Lune	20/12/2048	P	0,9617115				
Lune	17/05/2049	P	0,7638363	Soleil	31/05/2049	A	0,9819525	Lune	15/06/2049	P	0,2514106
Lune	09/11/2049	P	0,6811658	Soleil	25/11/2049	AT	1,0032687				
Lune	06/05/2050 07/05/2050	T	1,0767361	Soleil	20/05/2050	AT	1,0023109				
Lune	30/10/2050	T	1,0540492	Soleil	14/11/2050	P	0,8878524				

2. Les statistiques sur ces éclipses

Voici les statistiques sur l'ensemble de ces éclipses réparties sur 107 saisons d'éclipses :

- 94 doublets d'éclipses formés de
  - 46 doublets « éclipse de Lune – éclipse de Soleil »,
  - 48 doublets « éclipse de Soleil – éclipse de Lune »,
- 14 triplets d'éclipses formés de
  - 8 triplets « éclipse de Lune – éclipse de Soleil – éclipse de Lune »,
  - 6 triplets « éclipse de Soleil – éclipse de Lune – éclipse de Soleil ».

Les 114 éclipses de Soleil se répartissent de la manière suivante :

- 72 éclipses centrales formées de
  - 35 éclipses annulaires,
  - 32 éclipses totales,
  - et 5 éclipses mixtes.
- 3 éclipses non centrales formées de
  - 2 éclipses non centrales annulaires,
  - 1 éclipse non centrale totale.
- 39 éclipses partielles.

Les 116 éclipses de Lune se répartissent de la manière suivante :

- 47 éclipses totales,
- 27 éclipses partielles,
- 42 éclipses par la pénombre.

3. Tableaux des éclipses de Lune et de Soleil par année

3.1. Descriptions et explications

Les figures A1 et A2 donnent pour chaque année les éclipses de Lune et de Soleil pour la période 2000 à 2050.

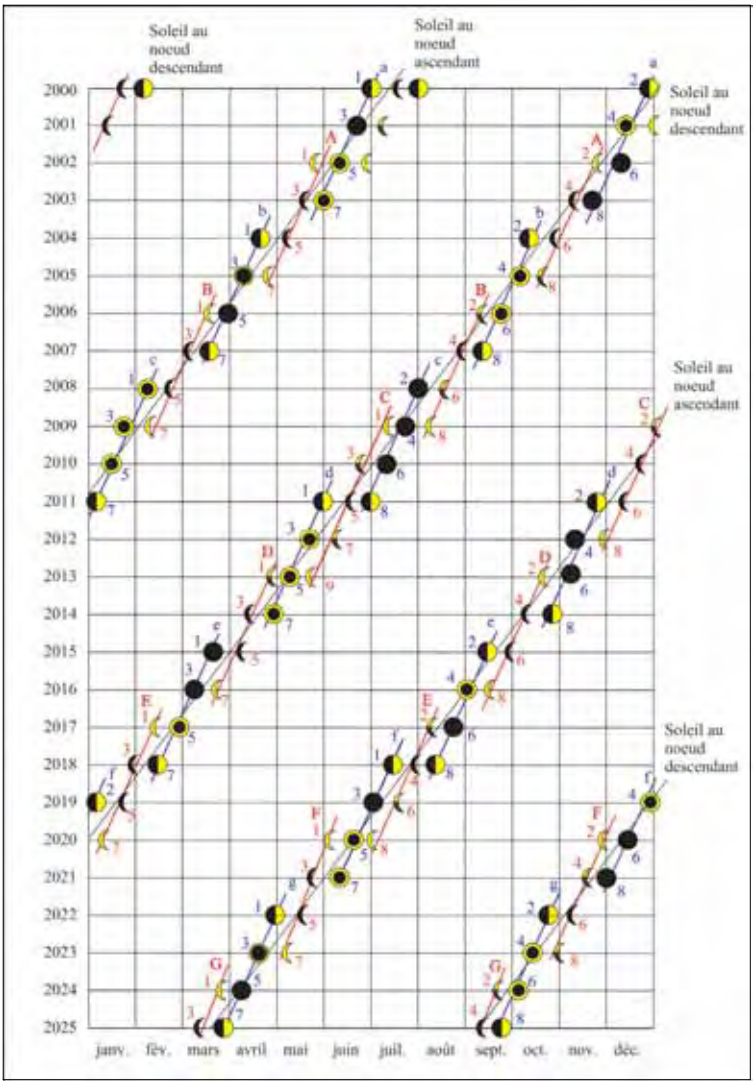


Figure A1. Éclipses de Lune et de Soleil entre l'an 2000 et 2025.

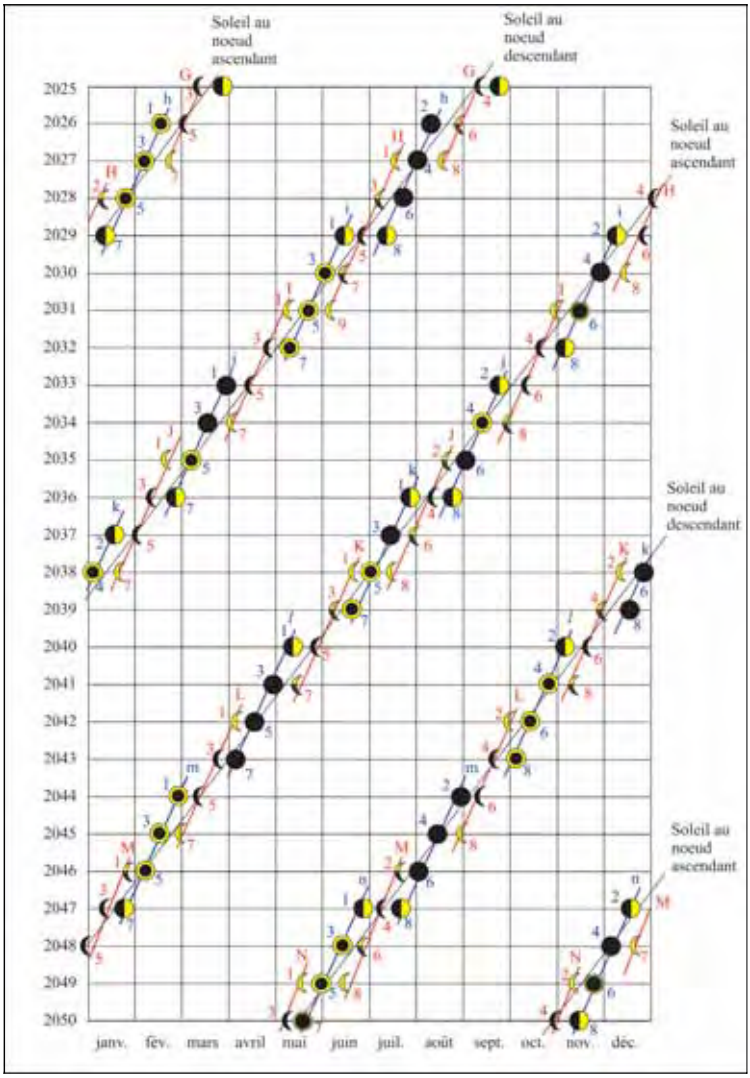


Figure A2. Éclipses de Lune et de Soleil entre l'an 2025 et 2050.

Les éclipses sur ces diagrammes sont représentées de la manière suivante :

Éclipses de Soleil : = mixte; = totale; = annulaire; = partielle.

Éclipses de Lune : = totale; = partielle; = par la pénombre.

Séries courtes d'éclipses de Lune : A, B, C ,D ,E ,F, G, H, I, J, K, L, M et N.

Séries courtes d'éclipses de Soleil : a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, *l*, m et n.

Sur ces diagrammes, nous avons tracé les droites reliant les passages du Soleil par les nœuds ascendants et descendants de l'orbite lunaire correspondant aux éclipses de Soleil. Ainsi pour chaque triplet ou doublet d'éclipses correspondant à une saison d'éclipse, les éclipses de Soleil ont lieu au nœud indiqué sur la droite, alors que les éclipses de Lune ont lieu au nœud opposé. Sur ces diagrammes nous avons également tracé et numéroté les suites courtes d'éclipses de Lune et de Soleil.

3.2. Remarques

On peut faire un certain nombre de remarques à partir de ces diagrammes et des tableaux précédents :

On constate que sur cette période de 51 ans, il n'y a qu'une seule année comportant sept éclipses, l'année 2038, cela ne s'étant pas produit depuis l'année 1982. Il y a également très peu de séries courtes comportant neuf éclipses, ce sont deux séries courtes d'éclipses de Lune : les séries C et G.

On constate également que les séries courtes de Soleil ne commencent pas et ne se terminent pas toujours par des éclipses partielles, mais commencent ou se terminent parfois par des éclipses centrales totales ou annulaires, ce qui est conforme à ce que nous avons annoncé précédemment.

De même, la succession des éclipses de Lune ne se fait systématiquement d'une manière croissante puis décroissante ainsi la dernière éclipse de la série courte L, l'éclipse partielle du 8 novembre 2041, a une magnitude plus grande que la série précédente, l'éclipse partielle des 15 et 16 mai 2041. De plus, la dernière éclipse de la série courte F est une éclipse partielle (28 octobre 2023) alors que l'avant dernière éclipse est une éclipse par la pénombre (5 mai 2023).

On remarquera de nouveau que chaque triplet d'éclipses correspond à un décrochage dans les séries courtes d'éclipses. La première éclipse du triplet est la première éclipse de la série courte suivante, alors que la troisième éclipse du triplet est la dernière éclipse de la série courte en cours.

4. Tracé des éclipses sur la période 2000 à 2050

Les quatre dernières figures de cette annexe donnent les bandes de centralité des éclipses centrales et non centrales.

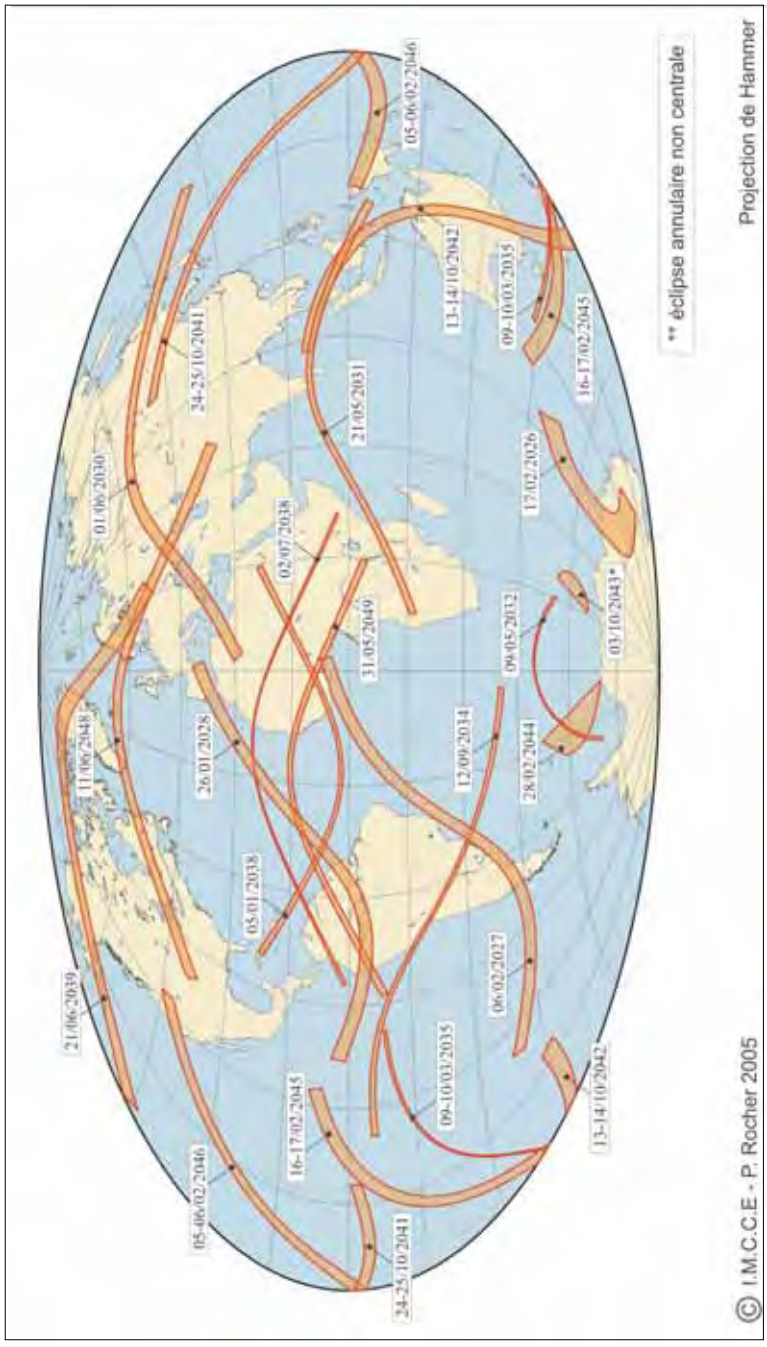
On a regroupé sur des mêmes cartes les éclipses totales centrales, les éclipses totales non-centrales et les éclipses mixtes et sur d'autres cartes les éclipses annulaires centrales et non-centrales.

La projection utilisée est la projection de Hammer, certaines éclipses présentant des bandes de centralité en deux ou trois parties en fonction de leurs positions géographiques. On remarquera la grande variété des largeurs des bandes de centralité due d'une part à la largeur propre du cône d'ombre, mais aussi à sa projection sur l'ellipsoïde terrestre. Ainsi les projections proches des pôles sont plus larges.



Éclipses annulaires entre l'an 2000 et l'an 2025.

Éclipses annulaires entre l'an 2026 et 2050.





Éclipses totales et mixtes entre l'an 2000 et 2025.

Éclipses totales et mixtes entre l'an 2026 et 2050.



Annexe B : Les éclipses en 2005 et 2006

1. Les éclipses de Soleil de l'année 2005

1.1. Éclipse annulaire-totale du 8 avril 2005

Cette éclipse est la première éclipse annulaire-totale du XXI^{e} siècle.

La bande de centralité débute au sud de la Nouvelle Zélande puis traverse tout l'océan Pacifique, elle prend fin sur le sud de l'Amérique centrale (Panama) et le nord de l'Amérique du Sud (Colombie et Venezuela). Sur ce trajet, alors qu'elle est en phase totale, elle passe près des îles Pitcairn (atoll d'Oeno). Dans sa phase finale, lorsqu'elle traverse le continent américain, elle est en phase annulaire. Il n'y a donc pas de lieu sur Terre où l'éclipse est observable sous la forme d'une éclipse totale.

Éléments de l'éclipse

Instant de la conjonction géocentrique en ascension droite : le 8 avril 2005 à 20 h 15 min 38,201 s UTC, jour julien : 2 453 469,344 192 137 0.

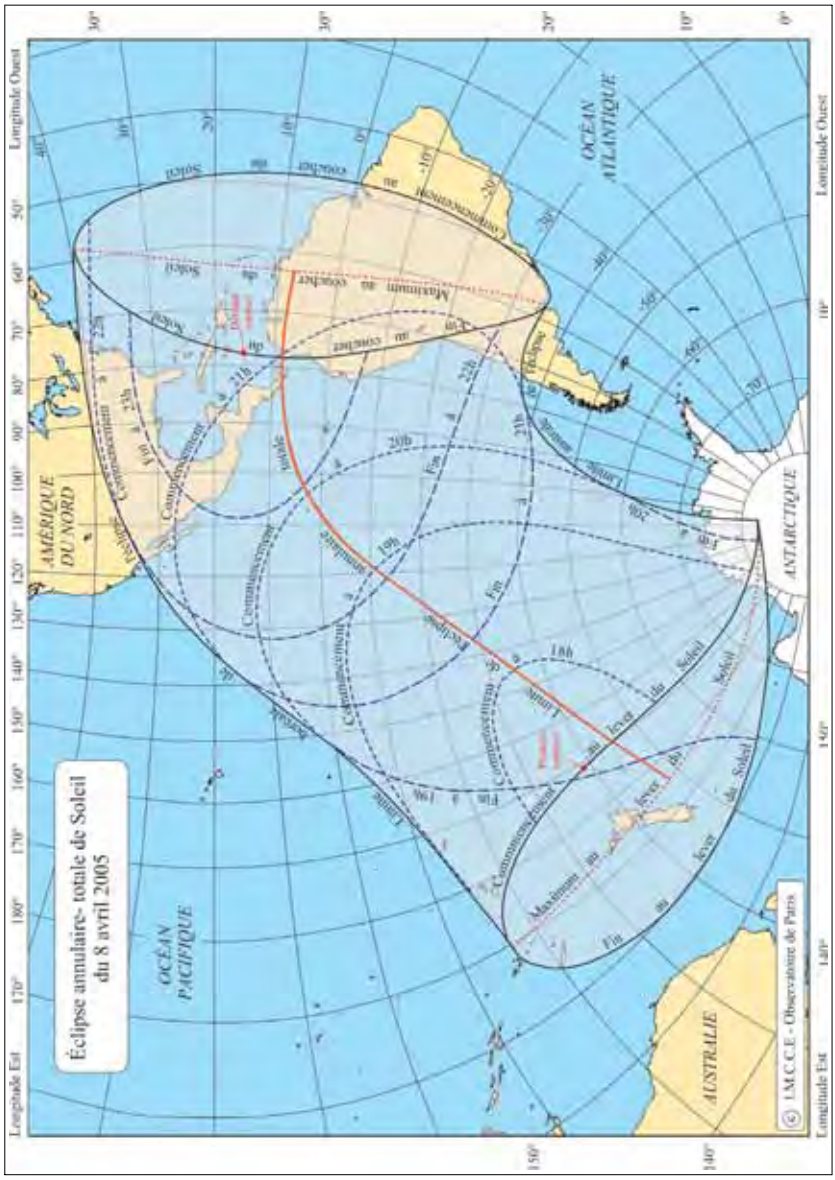
Ascension droite du Soleil	1 h 10 min 27,202 s
Déclinaison du Soleil	7° 28′ 28,51″
Ascension droite de la Lune	1 h 10 min 27,202 s
Déclinaison de la Lune	7° 5′ 39,79″
Parallaxe équatoriale du Soleil	8,78″
Parallaxe équatoriale de la Lune	58′ 9,46″
Demi-diamètre vrai du Soleil	15′ 58,17″
Demi-diamètre vrai de la Lune	15′ 50,80″

Circonstances générales de l'éclipse

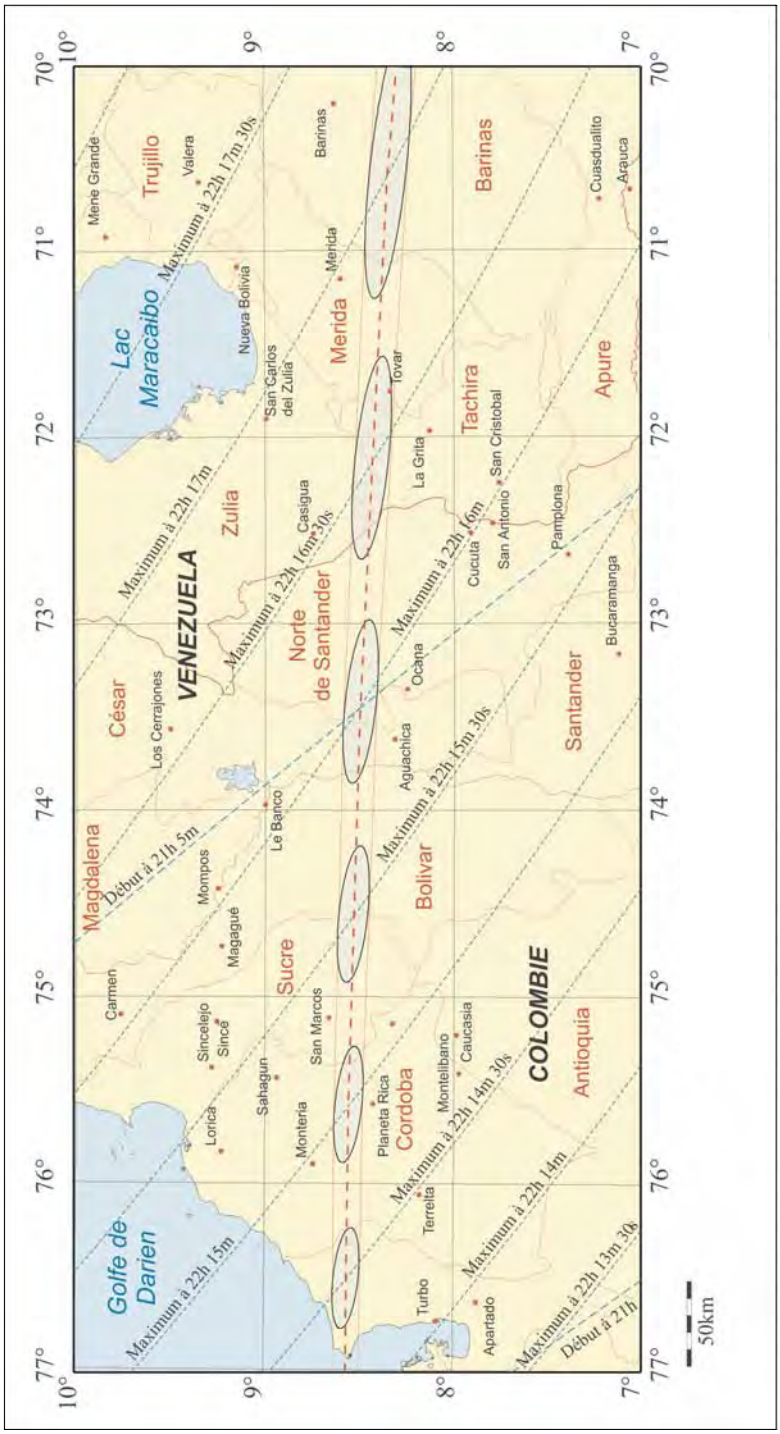
Magnitude : 1,0041

Circonstance	UTC	Longitude	Latitude
Commencement de l'éclipse générale	17 h 51,3 min	+170° 56,0′	–40° 41,5′
Commencement de l'éclipse annulaire	18 h 53,4 min	–175° 24,7′	–47° 54,8′
Commencement de l'éclipse centrale	18 h 53,6 min	–175° 22,1′	–47° 57,2′
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	20 h 15,6 min	+123° 28,8′	–15° 47,3′
Maximum de l'éclipse	20 h 35,7 min	+118° 58,6′	–10° 34,3′
Fin de l'éclipse centrale	22 h 18,1 min	+63° 5,3′	+7° 35,1′
Fin de l'éclipse annulaire	22 h 18,3 min	+63° 8,9′	+7° 38,0′
Fin de l'éclipse générale	23 h 20,4 min	+77° 40,5′	+14° 55,5′

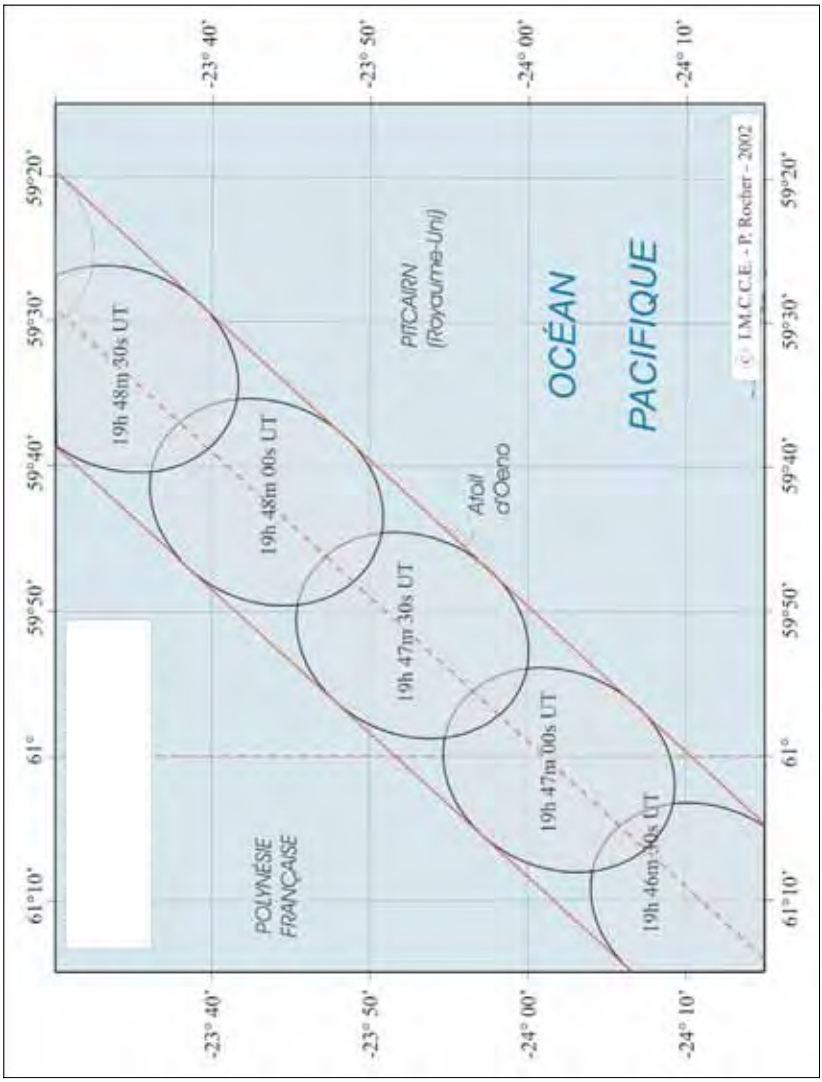
Attention dans tous ces tableaux, les instants sont toujours donnés en Temps universel coordonné (UTC) et les longitudes géographiques sont comptées positivement vers l'ouest et négativement vers l'est à partir du méridien international.



Éclipse annulaire-totale de Soleil du 8 avril 2005.

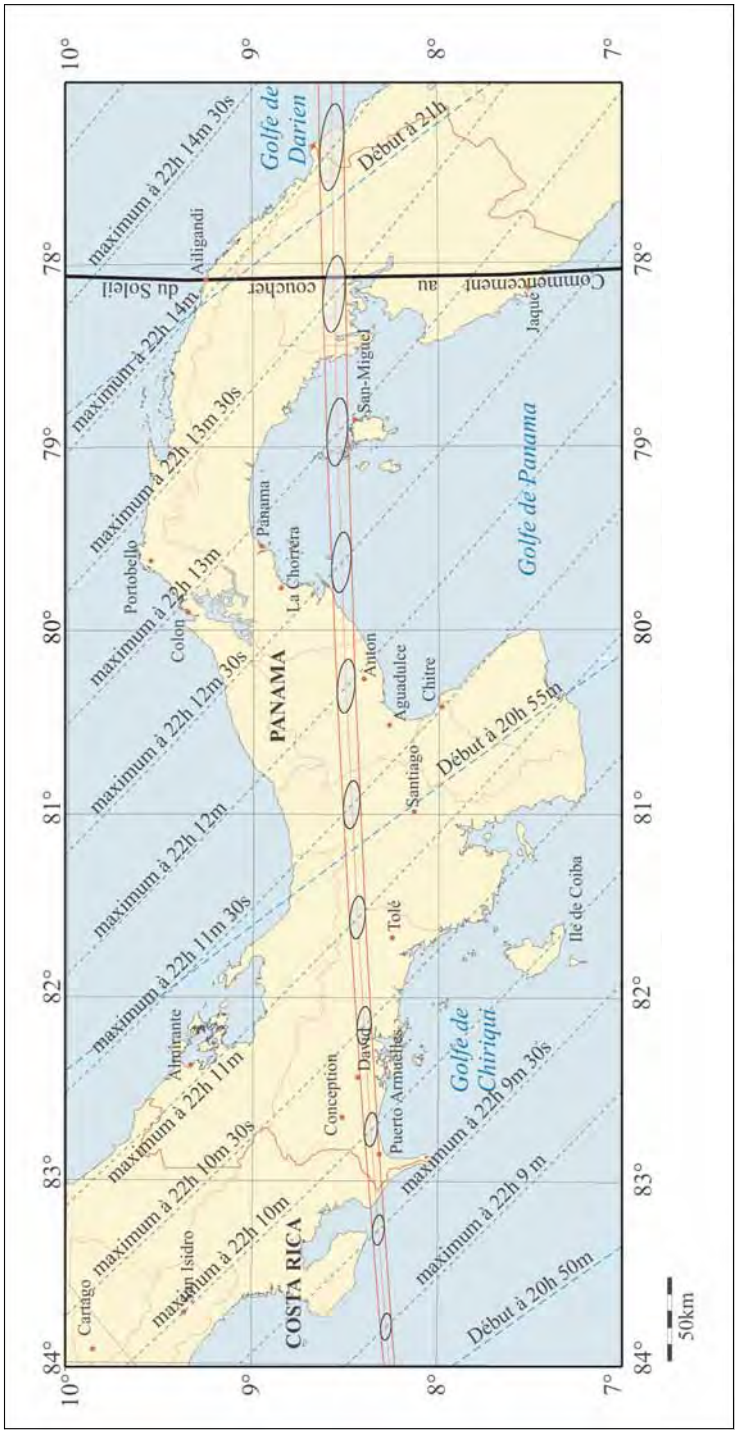


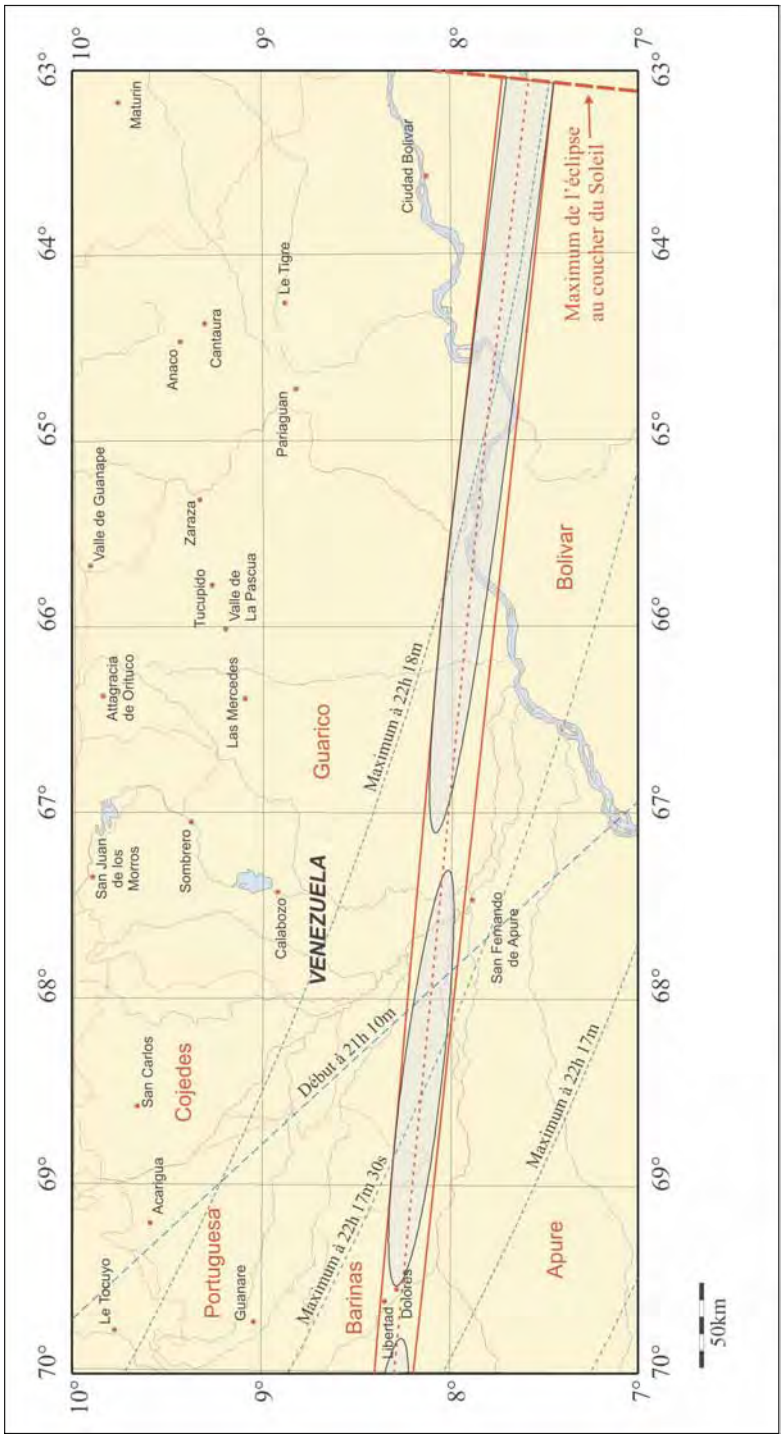
Éclipse annulaire-totale de Soleil du 8 avril 2005. © Imcce - P. Rocher - 2002.



Éclipse annulaire-totale du Soleil le 8 avril 2005.
TT-UTC = 65,184 s.

Éclipse annulaire-totale de Soleil du 8 avril 2005. © Imcce - P. Rocher - 2002.





Éclipse annulaire-totale de Soleil du 8 avril 2005. © Imcce - P. Rocher - 2002.

1.2. Éclipse annulaire du 3 octobre 2005

Cette éclipse est visible sous forme partielle sur presque trois continents (l'Europe, l'Afrique et l'Asie). La bande de centralité débute dans l'Atlantique Nord, puis traverse successivement les pays suivants : le nord du Portugal, l'Espagne, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, le nord-est du Tchad, le Soudan, le sud-ouest de l'Éthiopie, le Kenya et enfin le sud de la Somalie. Elle prend fin au milieu de l'océan Indien.

Éléments de l'éclipse

Instant de la conjonction géocentrique en ascension droite : le 3 octobre 2005 à 10 h 10 min 40,846 s UTC, jour julien : 2 453 646,924 083 863 9.

Ascension droite du Soleil	12 h 37 min 51,838 s
Déclinaison du Soleil	– 4° 4′ 43,91″
Ascension droite de la Lune	12 h 37 min 51,838 s
Déclinaison de la Lune	– 3° 43′ 53,93″
Parallaxe équatoriale du Soleil	8,79″
Parallaxe équatoriale de la Lune	55′ 21,71″
Demi-diamètre vrai du Soleil	15′ 59,15″
Demi-diamètre vrai de la Lune	15′ 5,10″

Circonstances générales de l'éclipse

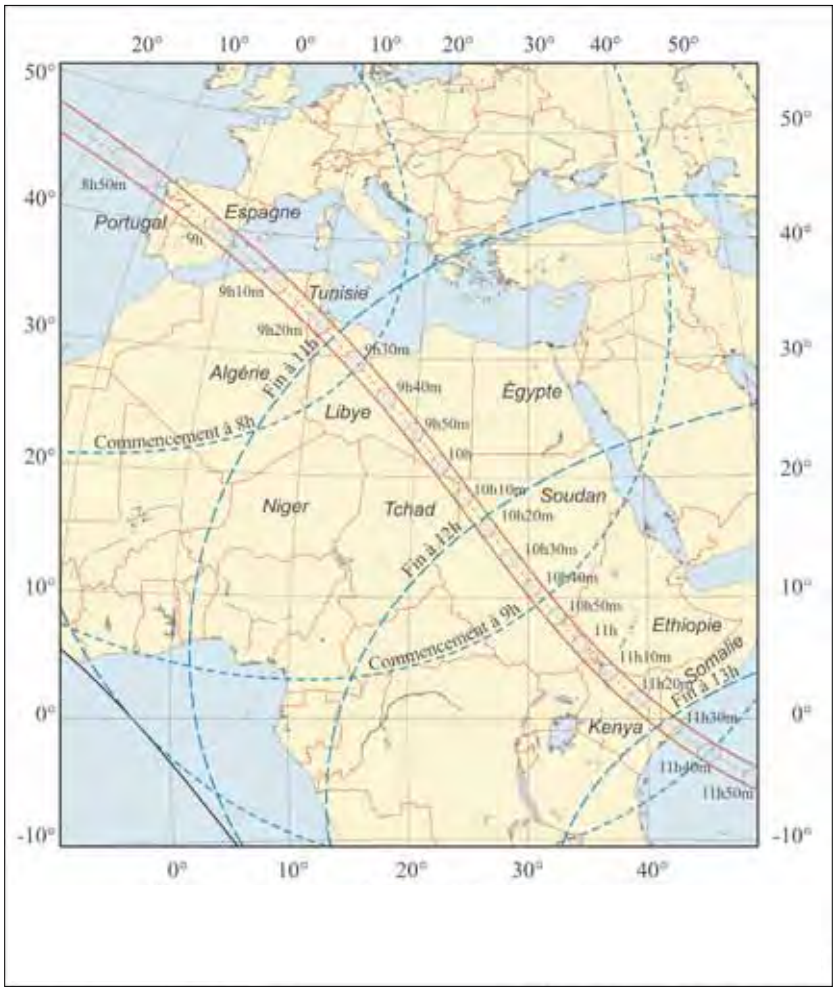
Magnitude : 0,9792

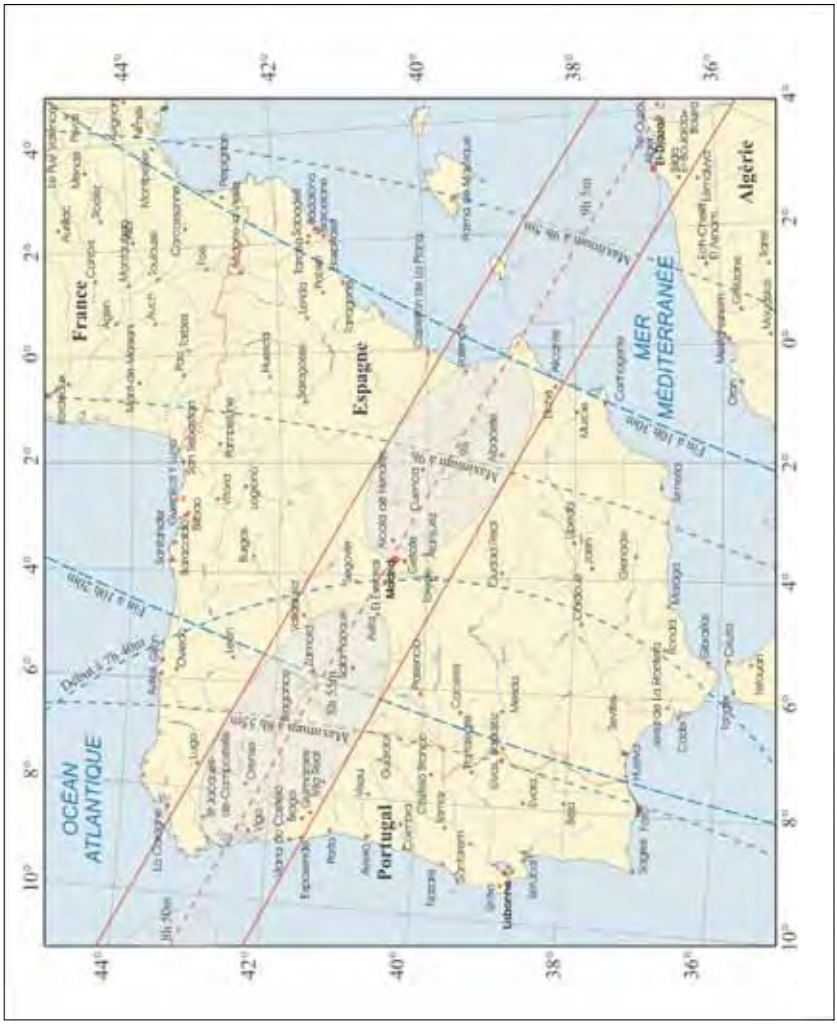
Circonstance	UTC	Longitude	Latitude
Commencement de l'éclipse générale	7 h 35,6 min	+ 23° 5,4′	+41° 7,7′
Commencement de l'éclipse annulaire	8 h 41,0 min	+ 38° 29,4′	+47° 53,2′
Commencement de l'éclipse centrale	8 h 43,0 min	+ 38° 56,4′	+48° 12,5′
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	10 h 10,7 min	– 24° 34,8′	+18° 12,6′
Maximum de l'éclipse	10 h 31,7 min	– 28° 44,4′	+12° 53,2′
Fin de l'éclipse centrale	12 h 20,6 min	– 82° 47,5′	– 9° 34,4′
Fin de l'éclipse annulaire	12 h 22,5 min	– 82° 19,5′	– 9° 53,5′
Fin de l'éclipse générale	13 h 27,9 min	– 66° 30,7′	–16° 40,9′



Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005.

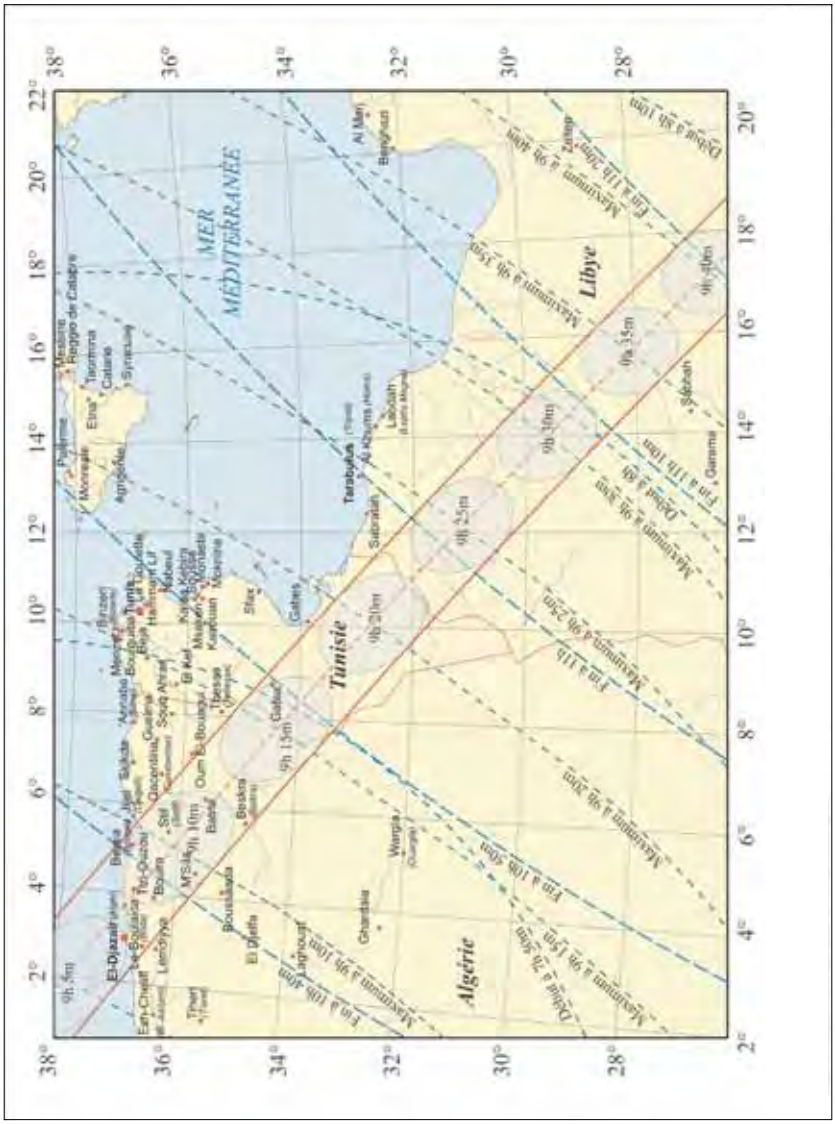
Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

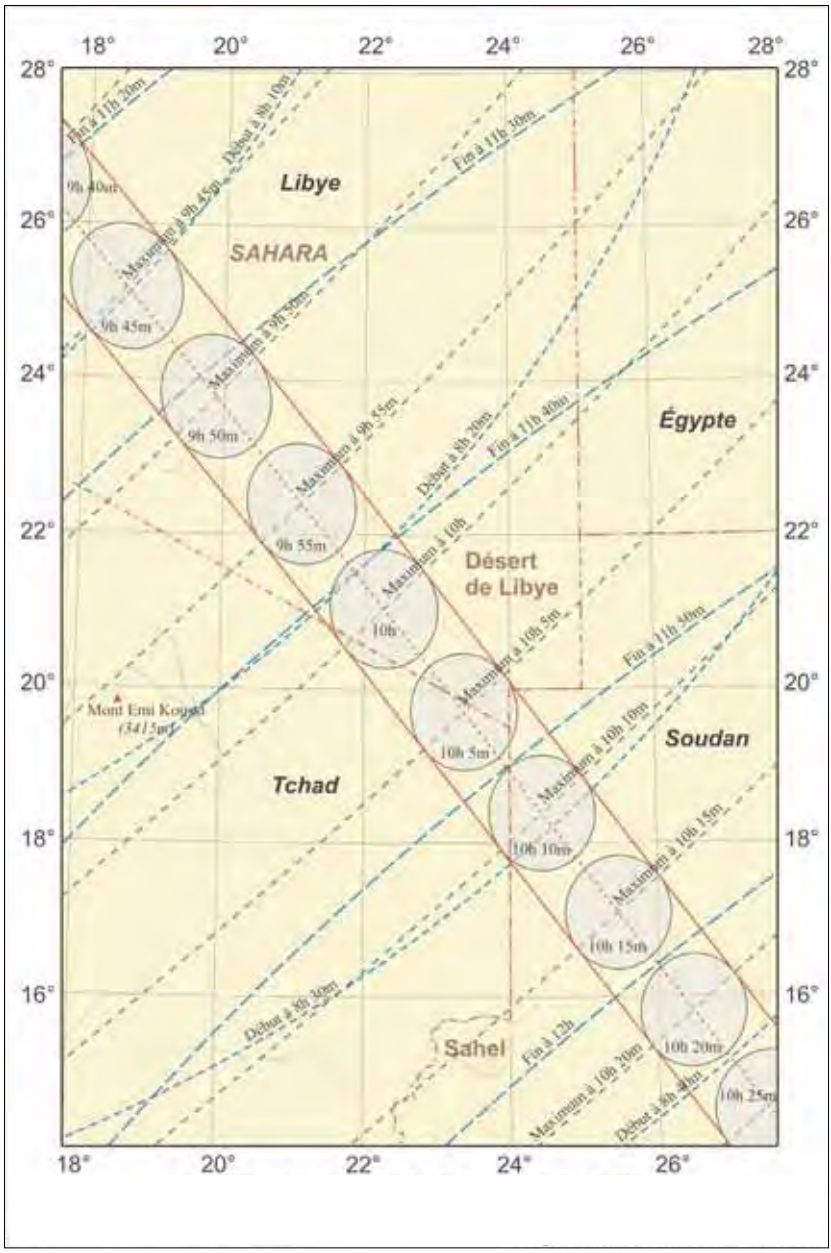




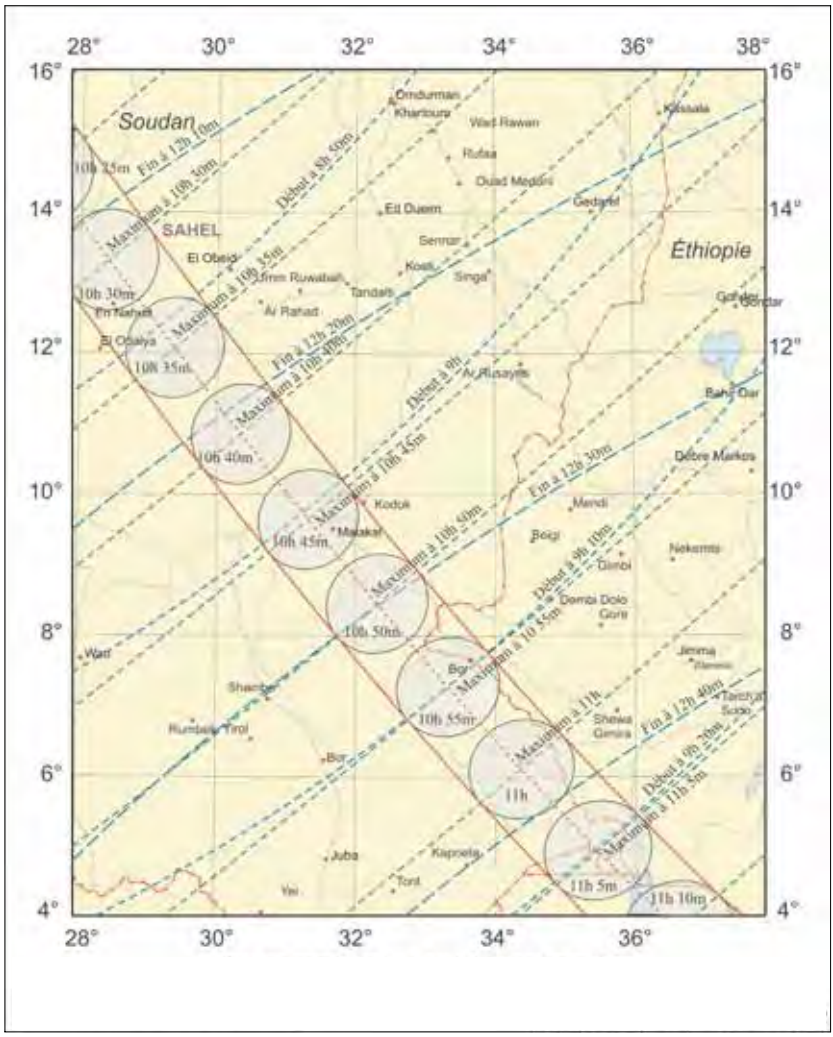
Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.





Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.



Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.



Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005. Projection azimutale de Lambert. © Imcce P. Rocher - 2002.

2. Les éclipses de Soleil de l'année 2006

2.1. Éclipse totale du 29 mars 2006

Cette éclipse est visible sous forme partielle sur pratiquement quatre continents, l'est de l'Amérique du Sud, l'Afrique , l'Europe et l'ouest de l'Asie. La bande de totalité débute au nord-est du Brésil, puis elle traverse l'océan Atlantique Sud. Elle traverse ensuite le nord de l'Afrique (Ghana, Togo, Bénin, Nigeria, Niger, Tchad, Libye, pointe nord-ouest de l'Égypte). Après avoir traversé la Méditerranée, elle traverse la Turquie, la Géorgie, la Russie (sud-ouest), le nord de la mer Caspienne, puis le Kazakhstan et de nouveau la Russie et elle prend fin à la frontière nord-est de la Mongolie.

Éléments de l'éclipse

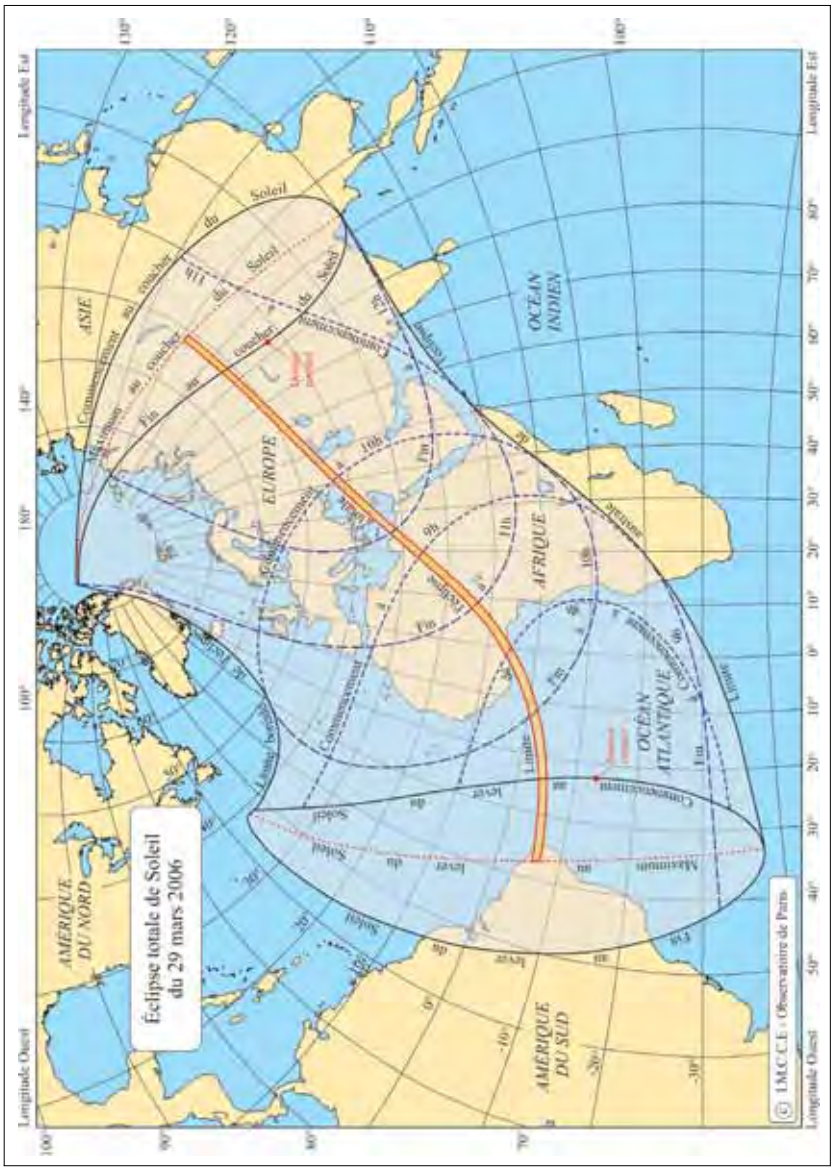
Instant de la conjonction géocentrique en ascension droite : le 29 mars 2006 à 10 h 33 min 15,082 s UTC, jour julien : 2 453 823,939 757 893 3.

Ascension droite du Soleil	0 h 31 min 35,073 s
Déclinaison du Soleil	+ 3° 24′ 31,76″
Ascension droite de la Lune	0 h 31 min 35,073 s
Déclinaison de la Lune	+3° 51′ 9,76″
Parallaxe équatoriale du Soleil	8,81″
Parallaxe équatoriale de la Lune	60′ 51,09″
Demi-diamètre vrai du Soleil	16′ 1,13″
Demi-diamètre vrai de la Lune	16′ 34,84″

Circonstances générales de l'éclipse

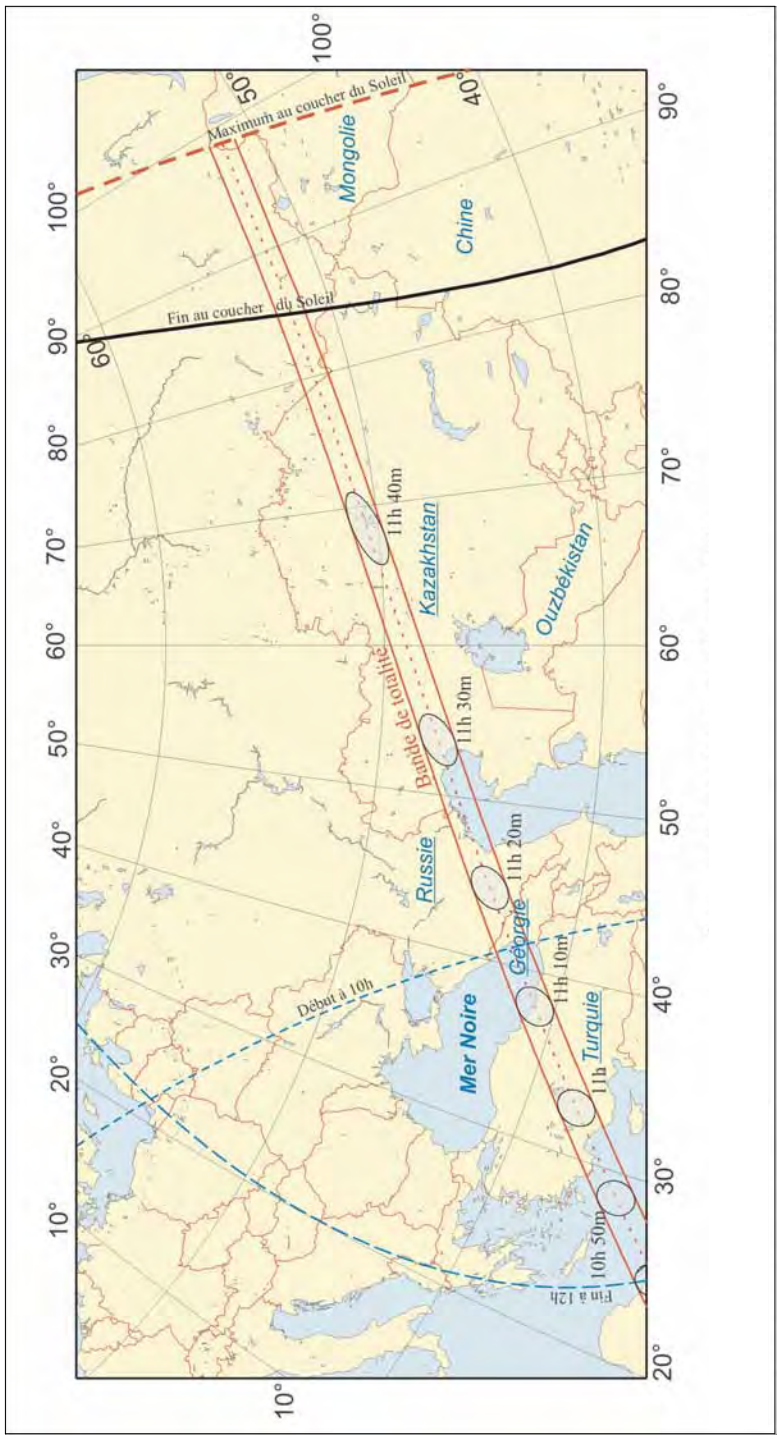
Magnitude : 1,0262

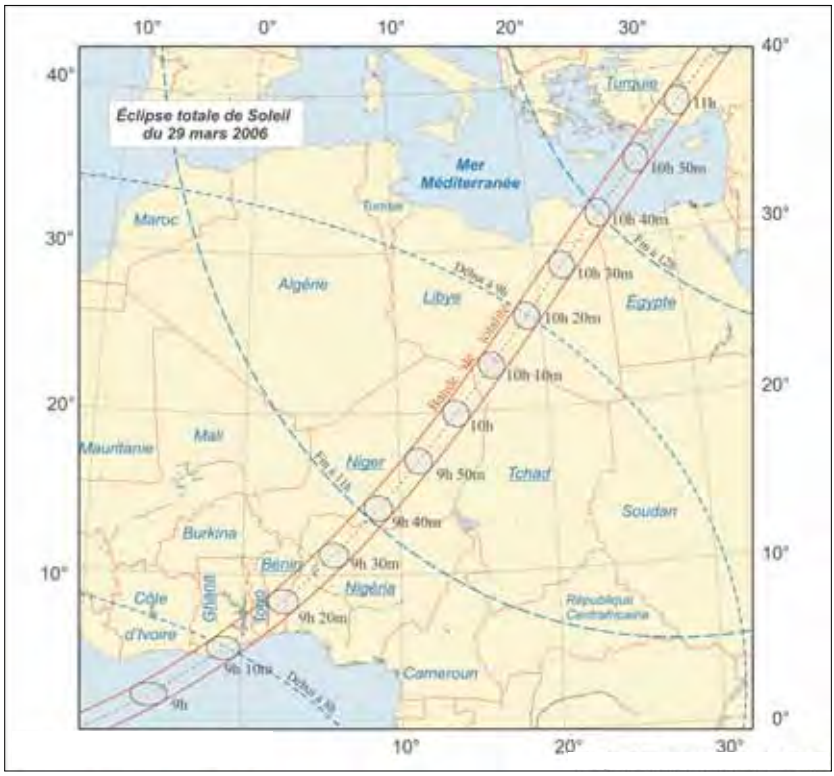
Circonstance	UTC	Longitude	Latitude
Commencement de l'éclipse générale	7 h 36,8 min	+ 22° 6,4′	–14° 27,7′
Commencement de l'éclipse totale	8 h 34,3 min	+ 36° 59,1′	– 6° 31,7′
Commencement de l'éclipse centrale	8 h 35,4 min	+ 37° 15,8′	– 6° 18,3′
Maximum de l'éclipse	10 h 11,3 min	– 16° 45,6′	+23° 8,9′
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	10 h 33,3 min	– 22° 53,5′	+29° 37,2′
Fin de l'éclipse centrale	11 h 46,9 min	– 98° 48,2′	+51° 33,7′
Fin de l'éclipse totale	11 h 47,9 min	– 98° 30,5′	+51° 20,6′
Fin de l'éclipse générale	12 h 45,6 min	– 83° 3,0′	+43° 26,3′



Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006.

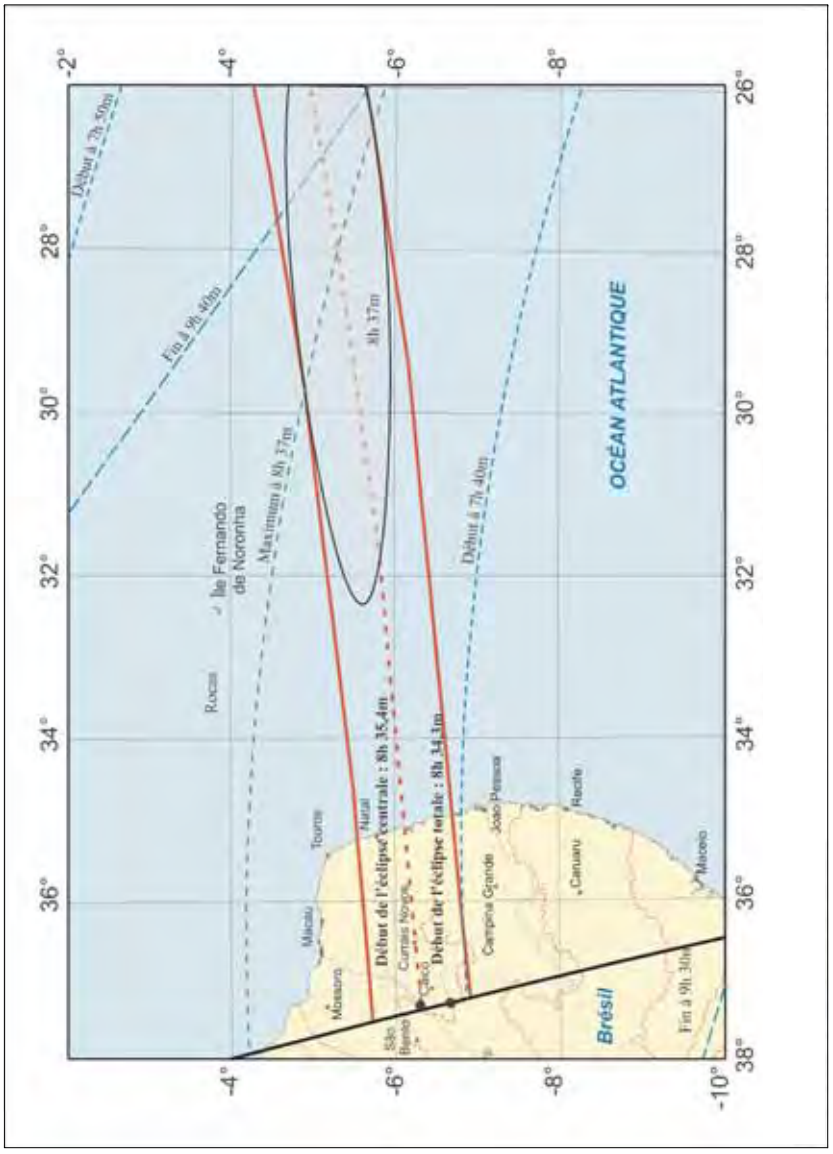
Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

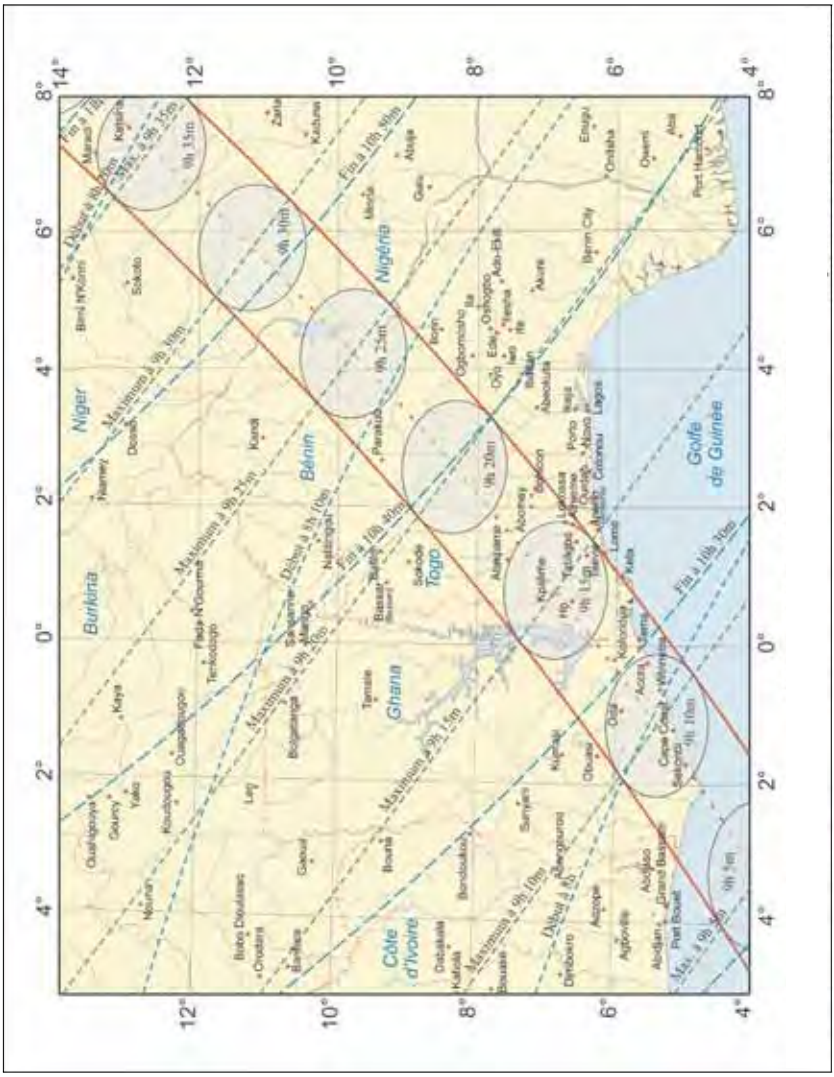




Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

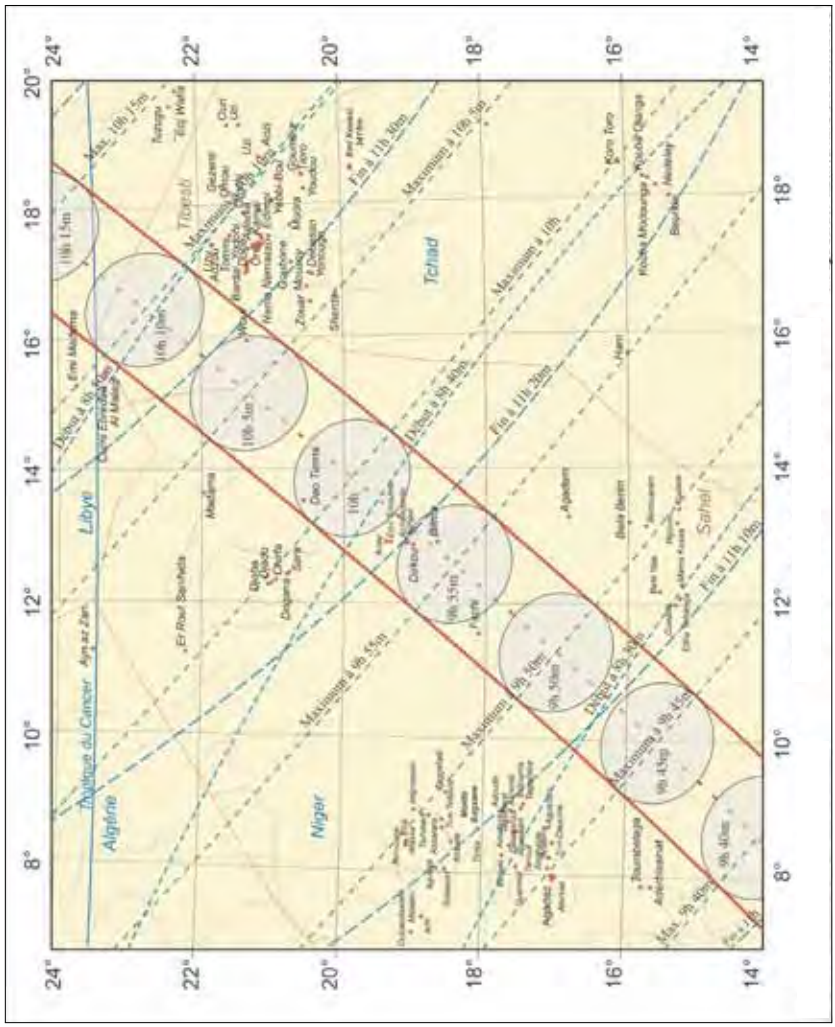
Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

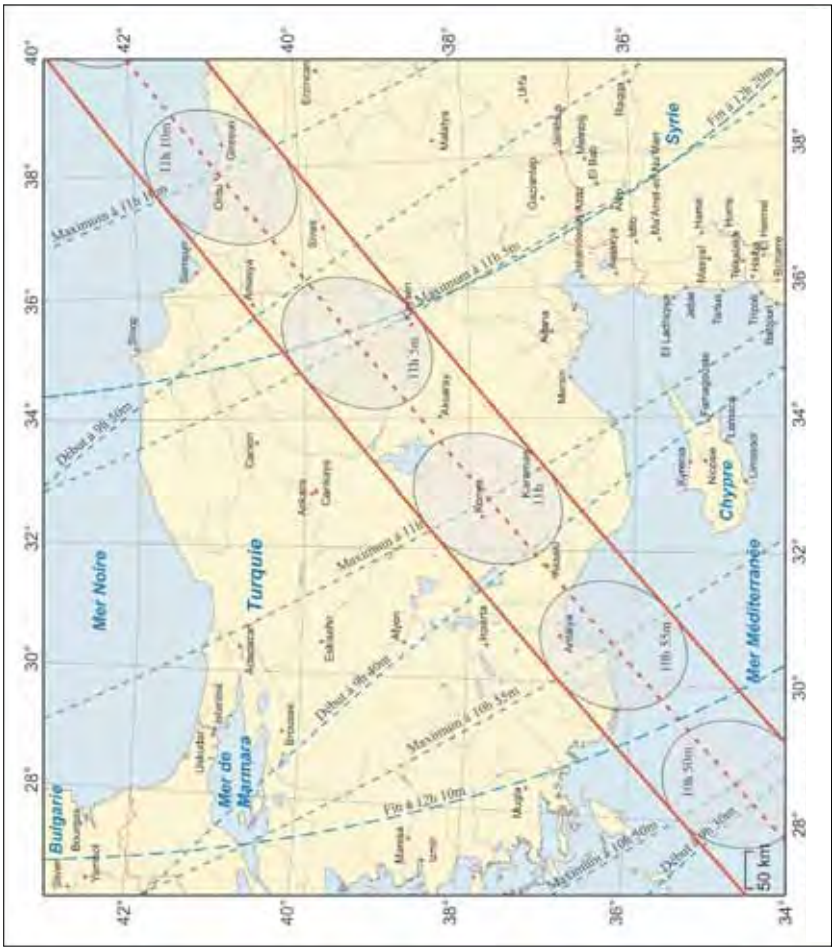




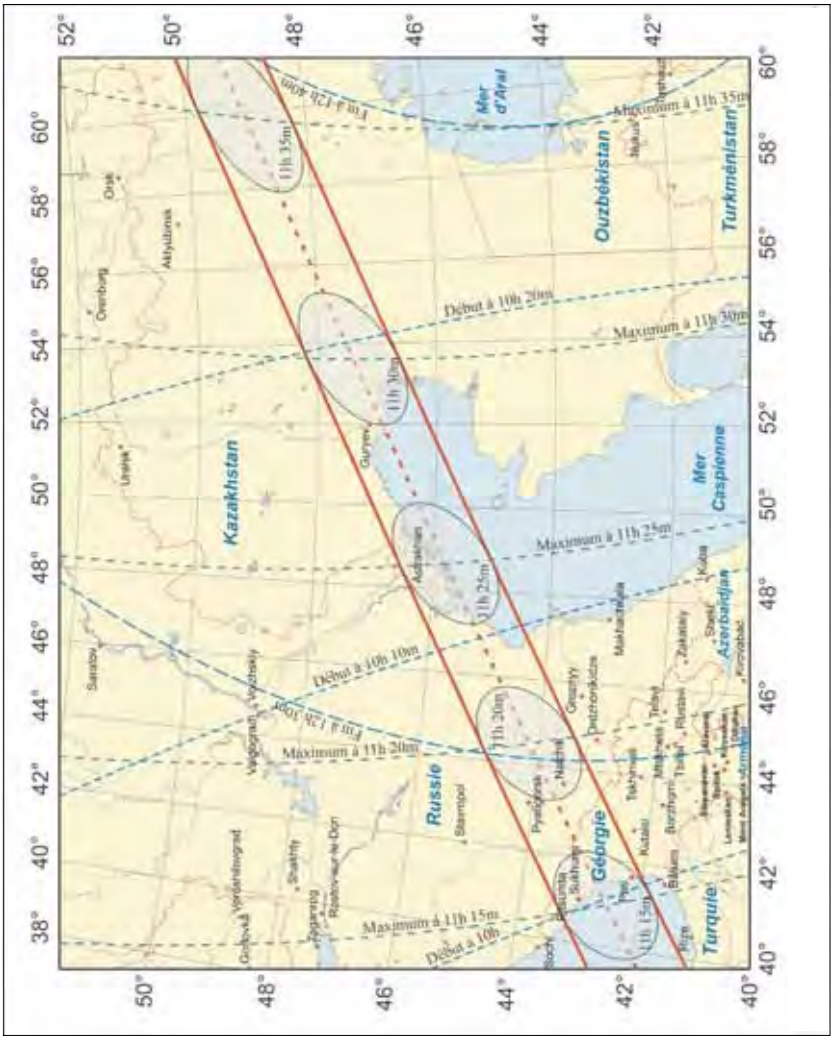
Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

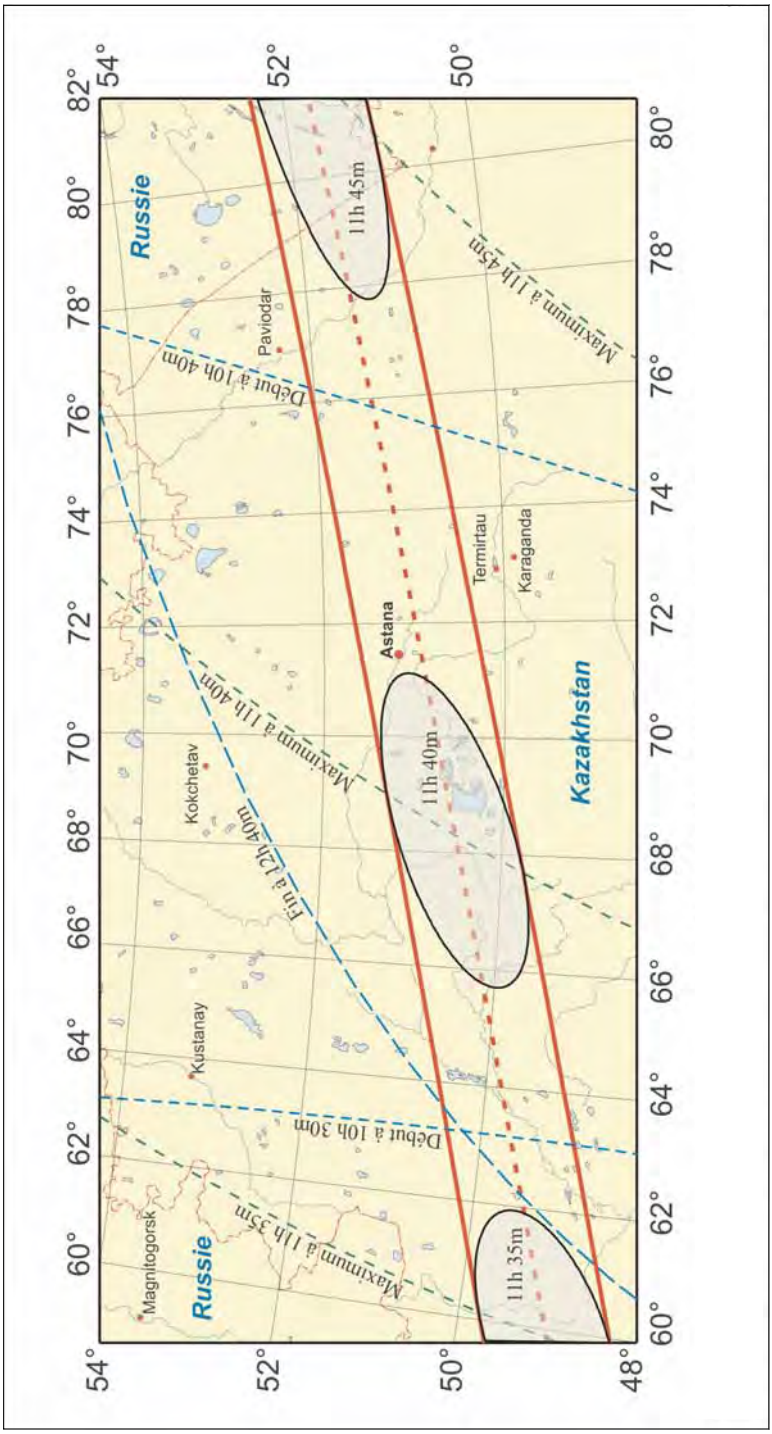




Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2004.

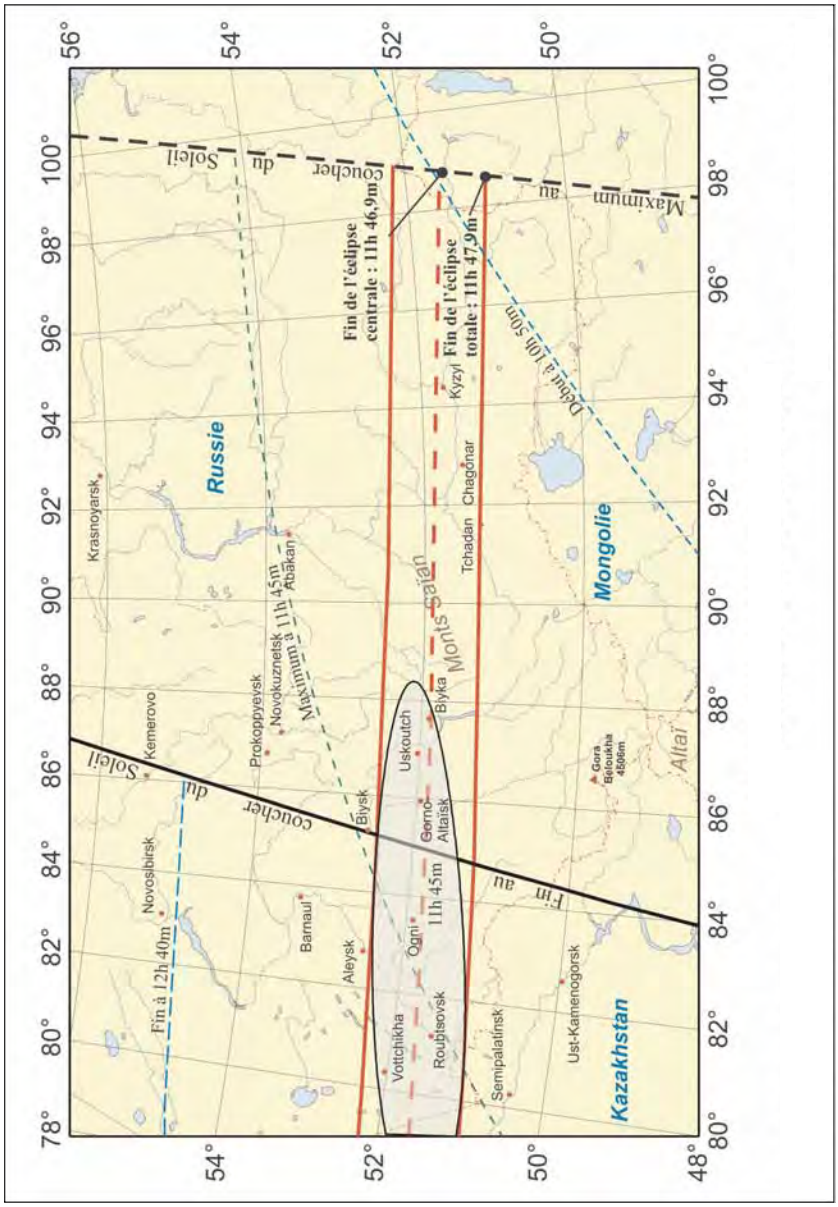


Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.



Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.

Éclipse totale de Soleil du 29 mars 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2002.



3. Éclipse annulaire du 22 septembre 2006

L'éclipse est visible sous forme partielle sur pratiquement toute l'Amérique du sud et sur le sud-ouest et le sud de l'Afrique ainsi que sur une partie de l'Antarctique. En revanche, la bande de centralité ne rencontre pratiquement aucun continent, elle est visible sous forme annulaire le matin au lever du Soleil sur le nord-est de l'Amérique du Sud (Guyana, Suriname, Guyane et extrême nord du Brésil), puis la bande de centralité traverse l'océan Atlantique Sud, passe entre l'Afrique et l'Antarctique et prend fin dans l'océan Indien.

Éléments de l'éclipse

Instant de la conjonction géocentrique en ascension droite le 22 septembre 2006 à 12 h 7 min 8,665 s UTC, jour julien : 2 454 001,004 961 401 2.

Ascension droite du Soleil	11 h 57 min 36,890 s
Déclinaison du Soleil	+ 0° 15′ 30,65″
Ascension droite de la Lune	11 h 57 min 36,889 s
Déclinaison de la Lune	–0° 9′ 31,69″
Parallaxe équatoriale du Soleil	8,76″
Parallaxe équatoriale de la Lune	53′ 56,71″
Demi-diamètre vrai du Soleil	15′ 56,1″
Demi-diamètre vrai de la Lune	14′ 41,9″

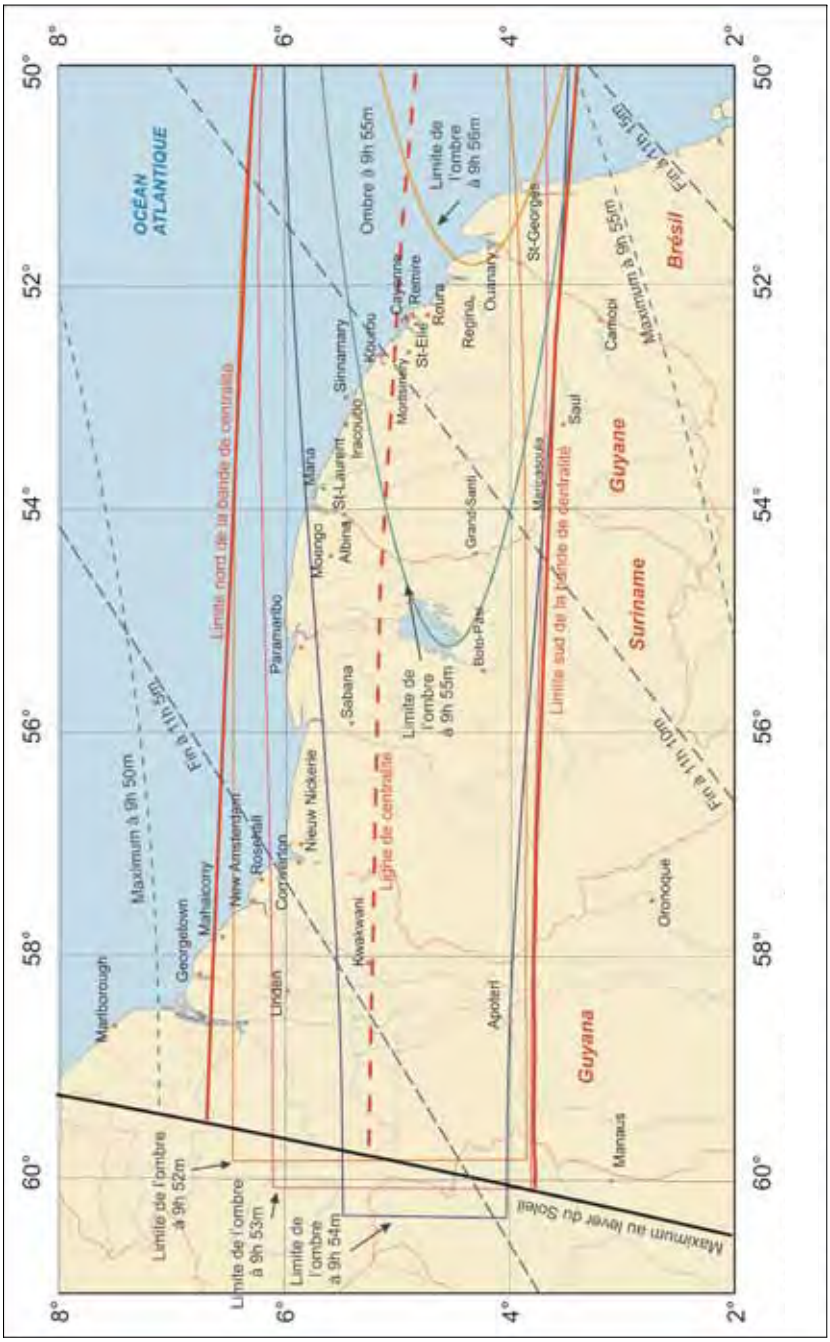
Circonstances générales de l'éclipse

Magnitude : 0,9680

Circonstance	UTC	Longitude	Latitude
Commencement de l'éclipse générale	8 h 39,9 min	+ 41° 51,2′	+14° 17,0′
Commencement de l'éclipse annulaire	9 h 48,5 min	+ 58° 57,8′	+ 5° 49,9′
Commencement de l'éclipse centrale	9 h 51,5 min	+ 59° 42,2′	+ 5° 15,5′
Maximum de l'éclipse	11 h 40,2 min	+ 9° 4,2′	–20° 39,0′
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	12 h 7,1 min	+ 3° 35,9′	–27° 39,5′
Fin de l'éclipse centrale	13 h 28,5 min	– 65° 43,8′	–53° 24,2′
Fin de l'éclipse annulaire	13 h 31,5 min	– 64° 59,5′	–52° 49,9′
Fin de l'éclipse générale	14 h 40,2 min	– 47° 54,5′	–44° 24,1′

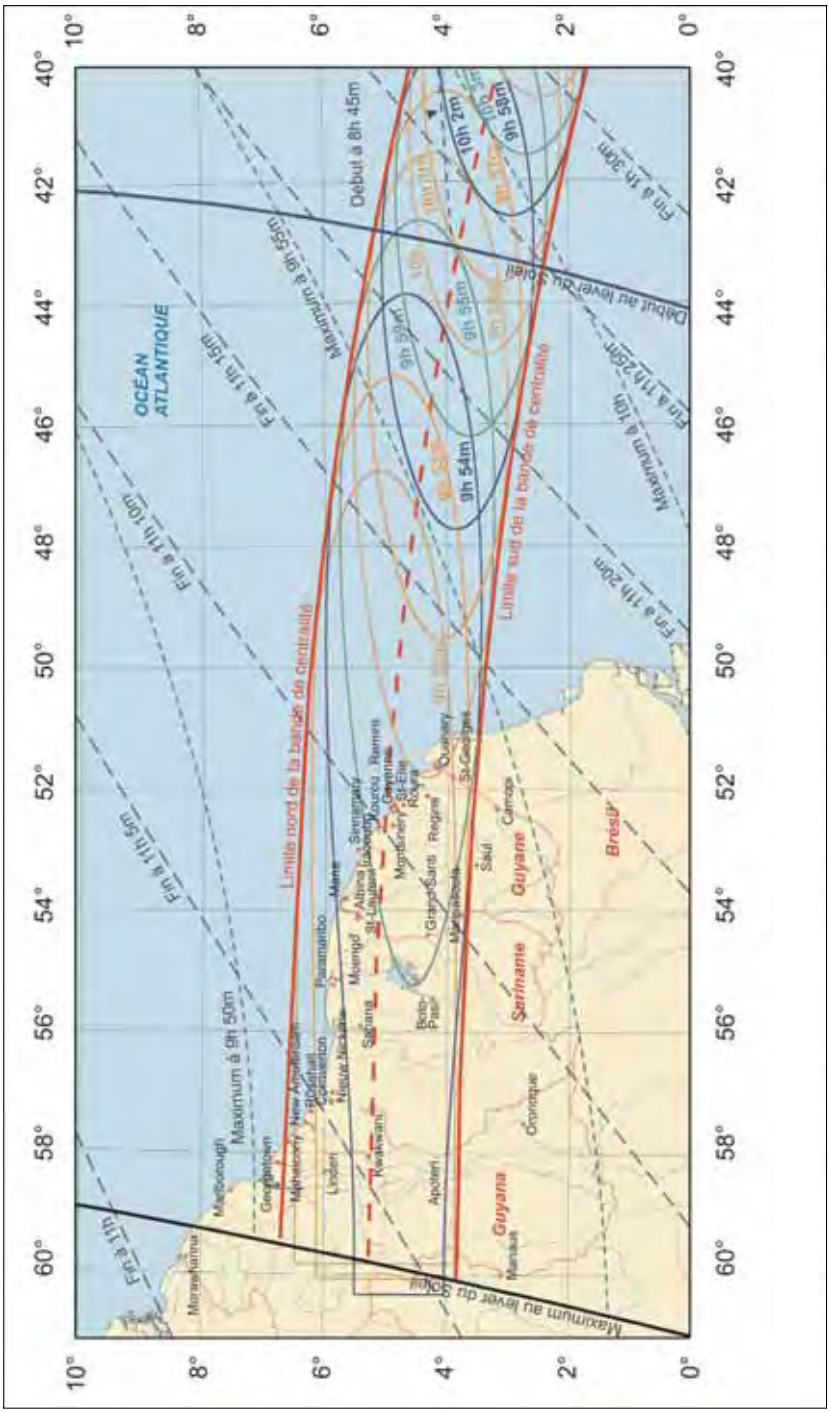
Éclipse annulaire de Soleil du 22 septembre 2006.





Éclipse annulaire du 22 septembre 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2004.

Éclipse annulaire du 22 septembre 2006. Projection azimutale de Lambert. © Imcce - P. Rocher - 2004.



Glossaire

Ce glossaire, en grande partie issu de l'ouvrage *Introduction aux éphémérides astronomiques* publié par le Bureau des longitudes, donne une liste de définitions correspondant à une nomenclature astronomique rangée par ordre alphabétique. Les mots en italique à l'intérieur des explications renvoient à des entrées du glossaire.

–A–

Angle horaire d'une direction, en un lieu donné. L'une des *coordonnées horaires*. Angle dièdre du *cercle horaire* de la direction et du *méridien* du lieu pris comme origine. L'angle horaire est compté positivement dans le sens rétrograde.

Année anomalistique. Intervalle de temps séparant en moyenne deux passages de la Terre à son *périhélie*. L'année anomalistique vaut environ 365,259 6 jours.

Année draconitique. Intervalle de temps séparant en moyenne deux passages du Soleil par le même nœud de l'orbite lunaire. L'année draconitique vaut environ 346,62 jours. Pour les astronomes arabes du Moyen Âge, un dragon se trouvait au voisinage des nœuds de l'orbite lunaire, d'où l'origine du terme « draconitique ».

Année julienne. Unité auxiliaire de temps définie comme étant égale à 365,25 *jours*, valeur correspondant à la valeur moyenne de l'année dans le *calendrier julien*.

Année tropique. Intervalle de temps séparant deux passages du Soleil à l'*équinoxe* moyen. L'année tropique vaut, actuellement, environ 365,242 2 jours.

Anomalie moyenne. Dans le *mouvement elliptique képlérien*, le produit du *moyen mouvement* du corps par le temps écoulé depuis le passage du corps au *périastre*.

Anomalie vraie. Dans le *mouvement elliptique képlérien*, l'angle (FP, FM) où F désigne le foyer de l'ellipse occupé par le corps central, P le *périastre* et M la position du corps à l'instant t.

Aphélie. Voir *Apoastre*.

Aplatissement. Paramètre qui rend compte de la façon dont un corps céleste, considéré comme un ellipsoïde de révolution, diffère d'une sphère : c'est le rapport $f = (a\text{-}b)/a$ où a est le rayon équatorial de l'ellipsoïde et b le rayon polaire ($b < a$).

Apoastre. Sur une *orbite* elliptique, le point le plus éloigné du foyer de l'ellipse occupé par le corps central. L'apoastre est appelé *apogée* lorsque le corps central est la Terre, *aphélie* lorsque le corps central est le Soleil.

Apogée. Voir *Apoastre*.

Ascension droite d'une direction, pour une date donnée. L'une des *coordonnées équatoriales* polaires. Angle dièdre du *cercle horaire* de la direction et de celui de l'équinoxe pris comme origine. L'ascension droite est comptée positivement dans le sens direct, parfois en degrés, de 0° à 360°, plus généralement en heures de 0 h à 24 h (1 h = 15°).

Azimut d'une direction, en un lieu donné. L'une des *coordonnées horizontales*. Angle dièdre du *vertical* contenant la direction et du vertical contenant le *pôle céleste* Sud (pour les astronomes) ou Nord (pour les marins) pris comme origine. L'azimut est compté positivement dans le sens rétrograde.

–B–

Bande de centralité d'une éclipse de Soleil. Lieu des projections sur la surface de la Terre du cône d'ombre de la Lune dans le cas d'une éclipse centrale (annuaire ou totale).

–C–

Cercle horaire d'une direction. Demi-grand cercle de la *sphère céleste* contenant les *pôles célestes* et le point de la sphère céleste associé à la direction. Le cercle horaire est donc perpendiculaire à l'*équateur céleste*.

Chromosphère. Région de l'atmosphère d'une étoile, en particulier du Soleil, située entre la *photosphère* et la *couronne*. La chromosphère solaire a une épaisseur de quelques milliers de kilomètres et présente un aspect coloré. Moins lumineuse que la surface du Soleil, la chromosphère n'est visible que quand le disque solaire est occulté.

Conjonction. Phénomène dans lequel deux ou plusieurs corps célestes ont des *longitudes célestes géocentriques* ou des *ascensions droites* égales. Conjonction d'une planète supérieure avec le Soleil : les longitudes célestes géocentriques de la planète et du Soleil sont égales. Conjonction de Mercure ou Vénus avec le Soleil : les longitudes célestes géocentriques de la planète et du Soleil sont égales, la conjonction est dite supérieure ou inférieure suivant que le Soleil est entre la Terre et la planète ou que la planète est entre la Terre et le Soleil. Conjonction de deux planètes entre elles, d'une planète avec la Lune ou avec une étoile : les ascensions droites des deux astres considérés sont égales.

Constante de Gauss (k = 0,017 202 098 95). Constante définissant, dans le système d'unités astronomiques, l'unité de longueur (*unité astronomique*) à partir de l'unité de temps (*jour*) et de l'unité de masse (masse du Soleil) par l'intermédiaire de la troisième loi de Kepler. k^2 a les dimensions $L^3M^{-1}T^{-2}$ de la constante de la gravitation.

Coordonnées apparentes d'un corps à l'instant t. Coordonnées donnant la direction du corps telle qu'elle serait vue par un observateur placé au centre de la Terre à l'instant t. Les coordonnées apparentes sont rapportées à l'*équinoxe* et à l'*équateur vrais* de la date ou à l'équinoxe vrai et à l'*écliptique moyen* de la date.

Coordonnées astronomiques d'un lieu (*longitude* et *latitude astronomique*). Coordonnées polaires de la *verticale* du lieu rapportées à *l'équateur vrai* de la date et à la direction origine, intersection de ce plan et *du méridien terrestre origine*.

Coordonnées écliptiques d'une direction. Coordonnées de la direction rapportées à *l'écliptique moyen* et à la direction origine de ce plan définie par l'*équinoxe*. Ces coordonnées sont dites vraies lorsqu'elles sont rapportées à l'écliptique moyen et à l'équinoxe vrai de la date, moyennes de la date lorsqu'elles sont rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de la date et moyennes d'une date de référence lorsqu'elles sont rapportées à l'écliptique et à l'équinoxe moyens de cette date de référence. On utilise deux sortes de coordonnées écliptiques : les coordonnées écliptiques cartésiennes et les coordonnées écliptiques polaires *longitude* et *latitude célestes*.

Coordonnées équatoriales d'une direction. Coordonnées de la direction rapportées à *l'équateur céleste* et à la direction origine de ce plan définie par *l'équinoxe*. Ces coordonnées sont dites vraies lorsqu'elles sont rapportées à l'équateur et à l'équinoxe vrais de la date, moyennes de la date lorsqu'elles sont rapportées à l'équateur et à l'équinoxe moyens de la date et moyennes d'une date de référence lorsqu'elles sont rapportées à l'équateur et à l'équinoxe moyens de cette date de référence. On utilise deux sortes de coordonnées équatoriales : les coordonnées équatoriales cartésiennes et les coordonnées équatoriales polaires *ascension droite* et *déclinaison*.

Coordonnées horaires d'une direction, en un lieu donné (*angle horaire* et *déclinaison*). Coordonnées polaires de la direction rapportées à l'équateur vrai de la date et à la direction origine, intersection de ce plan et du méridien céleste du lieu.

Coordonnées horizontales d'une direction, en un lieu donné (*azimut* et *hauteur*). Coordonnées polaires de la direction rapportées au *plan horizontal* du lieu et à la direction origine, intersection de ce plan et du *vertical* contenant la direction du *pôle céleste* Sud (pour les astronomes) ou Nord (pour les marins).

Coronographe. Instrument muni d'un disque qui occulte la surface solaire, permettant ainsi d'observer la *couronne* solaire.

Couronne. Région la plus externe d'une étoile, en particulier du Soleil. La couronne solaire est un halo ténu entourant le Soleil qui n'est visible que si le disque solaire, beaucoup plus lumineux, est caché.

Cycle d'activité solaire. Période de 11 ans où l'activité à la *surface du Soleil* passe successivement par un minimum et un maximum.

–D–

Date julienne (DJ). Durée écoulée depuis le 1 janvier –4712 à 12 h, origine de la *période julienne*. On l'exprime en jour et fraction de jour. Pour un usage rigoureux, on doit préciser l'échelle de temps utilisée (TU, TT, TE, etc.).

Déclinaison d'une direction. L'une des *coordonnées équatoriales* polaires et l'une des *coordonnées horaires*. Angle de la direction avec *l'équateur céleste*. La déclinaison est comptée en degrés, de –90° à +90°.

Degré d'obscuration. Lors d'une éclipse de Soleil, pourcentage de la surface solaire occultée par la Lune.

Demi-grand axe. Paramètre représentant la moitié du grand axe d'une ellipse. Le demi-grand axe est l'un des *éléments elliptiques* usuels.

Distance zénithale d'une direction, en un lieu donné. Angle que fait la direction avec la direction du *zénith* (voir *Verticale*). La distance zénithale est le complément de la *hauteur*.

–E–

Éclipse. Obscurcissement d'un astre produit par l'interposition d'un autre corps céleste entre cet astre et la source lumineuse.

Éclipse centrale. Éclipse de Soleil par laquelle l'axe du cône d'ombre coupe la surface terrestre. Les éclipses centrales regroupent les éclipses *annulaires*, les éclipses *totales* et les éclipses *mixtes*.

Éclipse de Lune. *Éclipse* où la Terre s'interpose entre la Lune et le Soleil. L'éclipse de Lune est dite totale quand la Lune disparaît entièrement dans l'*ombre* de la Terre, partielle quand la Lune pénètre dans l'ombre de la Terre sans y être totalement immergée, par la *pénombre* quand la Lune entre dans la pénombre de la Terre sans entrer dans l'ombre.

Éclipse de Soleil. Passage du Soleil derrière la Lune qui le cache à la vue d'un observateur terrestre. C'est donc, en fait, l'*occultation* du Soleil par la Lune. L'éclipse de Soleil est dite totale quand la Lune masque complètement le Soleil, annulaire quand le disque lunaire se projette sur le Soleil en laissant apparaître un anneau de lumière concentrique, partielle quand la Lune masque en partie le Soleil sans que l'on se retrouve dans les conditions d'éclipse totale ou annulaire.

Éclipse mixte. *Éclipse de Soleil* qui est *annulaire* à son début, *totale* vers son maximum, puis de nouveau annulaire et qui se produit lorsque les diamètres apparents de la Lune et du Soleil sont presque égaux. Ce type d'éclipse est parfois appelée éclipse annulaire-totale.

Éclipse perlée. *Éclipse mixte* au cours de laquelle, les diamètres de la Lune et du Soleil étant très voisins, on aperçoit de très nombreux *grains de Baily* entourant le limbe lunaire, lui donnant l'aspect d'une couronne de perles.

Écliptique moyen de la date. Plan moyen de l'orbite du barycentre Terre-Lune dans son mouvement héliocentrique.

Éléments elliptiques. Dans le *mouvement elliptique képlérien*, paramètres permettant de définir la position d'un corps sur son *orbite*. Cinq

paramètres sont suffisants pour définir l'orbite elle-même, par exemple le *demi-grand axe* et l'*excentricité* de l'ellipse, l'*inclinaison* de l'ellipse sur un plan de référence, la longitude du *nœud ascendant* de l'ellipse sur un plan de référence, la longitude du *périastre*. Un sixième paramètre est nécessaire pour avoir la position du corps sur l'orbite, par exemple *l'anomalie moyenne, l'anomalie vraie* ou encore la *longitude moyenne*. Les cinq premiers paramètres sont des constantes et le sixième est une fonction du temps (linéaire dans le cas de l'anomalie moyenne ou de la longitude moyenne).

Ellipse képlérienne. *Orbite* d'un corps dans un *mouvement elliptique képlérien*.

Ellipticité. Paramètre e caractéristique d'un ellipsoïde, lié à l'*aplatissement* f par relation $e^2 = 2f - f^2$

Équateur d'un astre. Grand cercle de la surface d'un astre, considéré comme un ellipsoïde de révolution, perpendiculaire à son axe de rotation. (Voir *Équateur céleste*.)

Équateur céleste. Grand cercle de la *sphère céleste* perpendiculaire à un axe voisin de l'axe de rotation de la Terre. Par extension, plan de ce grand cercle.

Équateur céleste vrai (ou **Équateur vrai** de la date). Grand cercle de la *sphère céleste* perpendiculaire à la direction du *pôle céleste des éphémérides* (CEP).

Équateur moyen de la date. Se déduit de *l'équateur vrai* de la date par une transformation fournie par la théorie de la *nutation*. On passe de l'équateur moyen d'une date à l'équateur moyen d'une autre date par une transformation fournie par la théorie de la *précession*. (Voir *Précession-nutation*.)

Équation du centre. Partie de *l'équation du temps* de période un an, due à l'*excentricité* de l'*orbite* terrestre. Dans le *mouvement elliptique* de la Terre autour du Soleil, elle représente la différence anomalie vraie – anomalie moyenne.

Équation du temps. Différence temps solaire moyen – temps solaire vrai.

Équinoxe de la date. L'un des deux points de la *sphère céleste* associés à l'intersection de *l'écliptique moyen* de la date avec *l'équateur céleste*.

Évection. Perturbation périodique la plus importante de la *longitude* de la Lune, due à l'action du Soleil et qui dépend de l'*excentricité* de l'orbite lunaire. Sa découverte est attribuée à Ptolémée au II^{e} siècle de notre ère. L'évection a une amplitude d'environ 1° 16′ et une période de 31,81 jours.

Excentricité. Paramètre caractérisant la forme d'une conique. Dans une ellipse, rapport de la distance centre-foyer au *demi-grand axe*. L'excentricité est l'un des *éléments elliptiques* usuels.

–G–

Géocentrique. Qui se rapporte à un système de référence centré au centre de la Terre.

Grains de Baily. Grains de lumière parsemant le bord de la Lune qui apparaissent pendant les *éclipses totales* de Soleil au moment des contacts intérieurs, lorsque la lumière du Soleil traverse les vallées lunaires en étant cachée par les monts, juste avant qu'il ne disparaisse ou ne réapparaisse derrière la Lune.

–H–

Hauteur d'une direction, en un lieu donné. L'une des *coordonnées horizontales*. Angle de la direction avec le *plan horizontal* du lieu.

Héliocentrique. Qui se rapporte à un système de référence centré au centre du Soleil.

–I–

Inclinaison. Angle entre le plan de l'*orbite* d'un corps et un plan de référence. L'inclinaison est l'un *des éléments elliptiques* usuels.

Instants du lever et du coucher d'un astre, en un lieu donné. Instants où la *distance zénithale* de l'astre z en dehors de l'atmosphère est : $z = 90° + R(90°)$ où $R(90°)$ est la valeur de la *réfraction* pour une distance zénithale de 90° (réfraction à l'horizon). La valeur de la réfraction à l'horizon étant mal connue, les instants du lever et du coucher des astres ne peuvent être calculés à une précision meilleure que la minute.

–J–

Jour (d). Unité de temps du système UAI d'unités astronomiques. Le jour est égal à 86 400 *secondes SI*.

Jour julien. Partie entière de la date julienne.

–L–

Latitude astronomique d'un lieu. L'une des *coordonnées astronomiques*. Angle de la *verticale* du lieu avec *l'équateur vrai*. La latitude astronomique est comptée en degrés, de –90° à +90°.

Latitude céleste d'une direction. L'une des *coordonnées écliptiques* polaires. Angle de la direction avec *l'écliptique moyen*. La latitude céleste est comptée en degrés, de –90° à +90°.

Libration de la Lune. Balancements apparents de la Lune permettant d'observer un peu plus de la moitié de sa surface. On distingue la libration optique due aux variations de la vitesse orbitale de la Lune (libration en longitude), à l'inclinaison de l'équateur de la Lune sur le plan de son orbite (libration en latitude) et au déplacement de l'observateur terrestre provenant de la rotation de la Terre sur elle-même (libration diurne) et la libration physique – beaucoup plus petite – due aux variations de la rotation de la Lune autour de son axe.

Ligne de centralité. Ligne formée par les lieux intersections du cône d'ombre de la Lune avec la surface terrestre durant une *éclipse centrale* de soleil.

Ligne des nœuds d'une orbite. Ligne droite intersection du plan de l'*orbite* avec un plan de référence.

Longitude astronomique d'un lieu. L'une des *coordonnées astronomiques*. Angle dièdre du *méridien céleste* du lieu et du méridien céleste passant par l'intersection du *méridien terrestre origine* et de *l'équateur vrai* de la date. La longitude astronomique est comptée généralement en degré, soit de –180° à +180° positivement vers l'ouest comme c'est l'usage en France, soit de 0° à 180° est ou ouest comme le recommande l'UAI.

Longitude céleste d'une direction pour une date donnée. L'une des *coordonnées écliptiques* polaires. Angle dièdre des deux demi-grands cercles de la *sphère céleste* passant par les pôles de l'écliptique et contenant, respectivement, le point représentant la direction envisagée et *l'équinoxe* (demi-grand cercle pris comme origine). La longitude céleste est comptée, en degrés, positivement dans le sens direct de 0° à 360°.

Longitude moyenne. Dans le *mouvement elliptique képlérien*, le paramètre λ défini par $\lambda = M + \varpi$ ou M représente *l'anomalie moyenne* et ϖ, la longitude du *périastre*.

–M–

Méridien céleste d'un lieu. Demi-grand cercle de la *sphère céleste* contenant les *pôles célestes* vrais et le *zénith* du lieu (voir *Verticale* d'un lieu). Par extension, demi-plan contenant ce demi-grand cercle.

Méridien de Greenwich. *Méridien terrestre* passant par l'observatoire de Greenwich. Le méridien de Greenwich est maintenant remplacé, en tant que méridien origine, par le *méridien terrestre origine*.

Méridien d'un astre. Demi-grand cercle de la *sphère céleste* contenant les *pôles* de l'astre.

Méridien terrestre d'un lieu. Demi-grand cercle de la *sphère céleste géocentrique* contenant les *pôles* terrestres et dont le demi-plan passe par le point considéré.

Méridien terrestre origine. *Méridien terrestre*, proche du *méridien de Greenwich*, défini conventionnellement par les coordonnées de points de la surface terrestre.

Mouvement elliptique képlérien. *Mouvement képlérien* dans lequel l'*orbite* du corps est une ellipse. C'est, par exemple, le mouvement que décrirait autour du Soleil, une planète soumise à la seule attraction du Soleil (le Soleil et la planète étant considérés comme des masses ponctuelles).

Mouvement elliptique perturbé. Mouvement voisin du *mouvement elliptique képlérien* dans lequel le corps est soumis non seulement à l'attraction du corps central mais aussi à l'attraction d'autres corps perturbateurs de masses faibles devant celle du corps central. C'est, par exemple, le mouvement décrit par les planètes autour du Soleil (le Soleil et les planètes étant considérés comme des masses ponctuelles).

Mouvement képlérien. Mouvement relatif d'un corps ponctuel M autour d'un corps ponctuel central O, la masse de M étant faible devant celle de O, les seules forces en présence étant les attractions newtoniennes entre M et O. Dans un mouvement képlérien l'*orbite* de M est une conique de foyer O.

Moyen mouvement. Dans le *mouvement elliptique képlérien*, vitesse angulaire moyenne d'un corps effectuant une révolution complète sur une *orbite* de *demi-grand axe* donné. Le moyen mouvement n est relié au demi-grand axe a par la troisième loi de Kepler n^2a^3 = constante.

–N–

Nadir. Voir *Verticale* d'un lieu.

Nœud. L'un des deux points de la *sphère céleste* associés à l'intersection du plan de l'*orbite* avec un plan de référence. La position du nœud est l'un des *éléments elliptiques* usuels.

Nœud ascendant et nœud descendant de la Lune. L'*orbite* lunaire est inclinée sur l'écliptique de 5° 09′ en moyenne. Le plan de cette orbite coupe l'écliptique en deux points appelés *nœuds* ; on distingue le nœud ascendant où la Lune passe du Sud au Nord de l'*écliptique*, et le nœud descendant où la Lune passe du Nord au Sud de l'écliptique.

Nouvelle Lune. Aspect de la Lune au moment de sa *conjonction* en longitude géocentrique avec le Soleil.

Nutation. Voir *Précession-nutation*.

–O–

Obliquité de l'écliptique. Inclinaison de *l'écliptique moyen* sur *l'équateur moyen* à une date donnée.

Occultation. Passage d'un astre derrière un autre qui le cache à la vue d'un observateur terrestre.

Ombre de la Terre, d'une planète ou d'un satellite naturel. Région de l'espace dans laquelle le corps considéré cache entièrement le Soleil.

Opposition d'une planète supérieure avec le Soleil. Phénomène dans lequel les *longitudes célestes* géocentriques de la planète et du Soleil diffèrent de 180°.

Orbite. Trajectoire décrite dans l'espace par un corps céleste.

Origine des temps (ou **Époque standard**). En 1984 l'origine des temps a été fixée au 1 janvier 2000 à 12 heures de l'échelle de temps considérée. Elle correspond à la *date julienne* 2 451 545.0 et est désignée par J2000.0 ou J2000. Par définition le début d'une *année julienne* est séparé de l'époque standard par un nombre entier d'années juliennes.

–P–

Parallaxe. Différence entre les directions apparentes d'un corps céleste lorsque l'observateur passe d'un point de l'espace à un autre.

Angle sous lequel est vu, du corps céleste, un segment de droite joignant les deux points. (Voir *Parallaxe annuelle*, *Parallaxe diurne*).

Parallaxe annuelle. Différence entre les directions apparentes d'un corps céleste vu par un observateur placé au barycentre du système solaire et vu par un observateur placé au centre de la Terre. Pour une étoile, angle sous lequel est vu, de l'étoile, le *demi-grand axe* de l'orbite terrestre.

Parallaxe diurne. Différence entre les directions apparentes d'un corps céleste vu par un observateur placé au centre de la Terre et vu par un observateur placé sur la Terre. Pour une étoile la parallaxe diurne est négligeable. Pour la Lune, la parallaxe diurne peut atteindre plus de 1°.

Pénombre de la Terre, d'une planète ou d'un satellite naturel. Région de l'espace dans laquelle le corps considéré cache en partie le Soleil.

Périastre. Sur une *orbite* elliptique, le point le plus proche du corps central, foyer de l'ellipse. La position du périastre est l'un des *éléments elliptiques* usuels. Le périastre est appelé *périgée* lorsque le corps central est la Terre, *périhélie* lorsque le corps central est le Soleil.

Périgée. Voir *Périastre*.

Périhélie. Voir *Périastre*.

Période julienne. Système chronologique qui numérote, sans discontinuer, les jours depuis le 1 janvier –4712 à 12 h.

Phases de la Lune. Configurations successives de la Lune se produisant lorsque les *longitudes célestes géocentriques* de la Lune et du Soleil sont égales (*nouvelle Lune*), diffèrent de 90° (premier quartier), de 180° (*pleine Lune*) ou de 270° (dernier quartier).

Plan horizontal d'un lieu. Plan passant par le centre de la *sphère céleste* et perpendiculaire à la *verticale* du lieu.

Photosphère. Région la plus profonde de l'atmosphère d'une étoile, en particulier du Soleil, d'où nous provient la quasi-totalité du rayonnement.

Plasma. Ensemble des particules porteuses d'une charge électrique obtenu par transformation des atomes ou des molécules neutres d'un gaz en ions ou électrons.

Pleine Lune. Aspect de la Lune au moment de son *opposition* en longitude géocentrique avec le Soleil.

Pôle céleste des éphémérides (CEP). Pôle (Nord) de référence pour le mouvement du pôle et la *nutation*. Sa direction, voisine de l'axe de rotation de la Terre, est définie de façon à ne présenter aucun mouvement diurne ou quasi-diurne ni dans la Terre, ni dans l'espace.

Pôles célestes. Les deux points d'intersection (pôle céleste Nord et pôle céleste Sud) de la *sphère céleste* avec un diamètre dont la direction est voisine de celle de l'axe de rotation de la Terre.

Pôles d'un astre. Les deux points d'intersection de la surface de l'astre (pôle Nord et pôle Sud) avec l'axe de rotation de l'astre.

Précession. Voir *Précession-nutation*.

Précession-nutation. Déplacement au cours du temps du plan de l'*équateur* et du plan de l'*écliptique* par rapport à un *système de référence inertiel*, dû aux actions gravitationnelles de la Lune, du Soleil et des planètes. Conventionnellement on appelle *précession* la partie uniforme de ce développement et *nutation* la partie périodique.

–Q–

Quadrature d'une planète supérieure avec le Soleil. Phénomène dans lequel les *longitudes célestes* géocentriques de la planète et du Soleil diffèrent de 90°. Pour la Lune on emploie les expressions premier quartier et dernier quartier.

–R–

Raie spectrale. Trait plus sombre ou plus lumineux qui apparaît dans un spectre. Chaque raie correspond à un élément chimique qui se trouve dans un état donné.

Réfraction astronomique (ou **réfraction**). Changement de la direction des rayons lumineux provenant d'un astre, dû à leur traversée de l'atmosphère terrestre (ou plus généralement d'une atmosphère planétaire). La réfraction a pour effet que la *distance zénithale* observée de l'astre est inférieure à la distance zénithale qu'il aurait s'il n'y avait pas d'atmosphère. Son amplitude dépend de la distance zénithale de l'astre, des conditions atmosphériques et de la longueur d'onde de la lumière.

Révolution anomalistique de la Lune. Intervalle de temps qui sépare en moyenne le passage de la Lune à son *périgée* (27,554 549 878 jours).

Révolution draconitique de la Lune. Intervalle de temps qui sépare en moyenne le passage de la Lune par un même *nœud* de son *orbite* (27,212 220 817 jours).

Révolution sidérale de la Lune. Intervalle de temps qui sépare en moyenne le passage de la Lune par une même valeur de sa *longitude moyenne* (27,321 661 547 jours).

Révolution synodique de la Lune. Intervalle de temps qui sépare en moyenne deux *conjonctions* de la Lune et du Soleil (deux *nouvelles Lune*). Cette période est également appelée lunaison ou mois lunaire (29,530 588 853 jours).

–S–

Saison d'éclipses. Intervalle de temps qui sépare en moyenne le passage du Soleil par les deux *nœuds* de l'*orbite* lunaire, c'est-à-dire la moitié de *l'année draconitique*, environ 173,31 jours.

Saros. Période utilisée par les Babyloniens et n'ayant rien avoir avec les éclipses. Ce terme fut pris par erreur par E. Halley pour désigner la période de 223 lunaisons permettant de prévoir le retour des éclipses de Soleil et de Lune. Cette mauvaise définition, bien que souvent signalée, est passée dans l'usage courant.

Seconde SI (s). Unité de temps du Système International depuis 1967. La seconde SI est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Spectre électromagnétique. Ensemble des radiations monochromatiques obtenu par décomposition de la lumière. La lumière visible est décomposée par un prisme en bandes colorées qui forment un arc-en-ciel. On définit des bandes de longueurs d'onde qui sont, des plus courtes vers les plus grandes : rayons gamma, rayons X, ultraviolet, visible, infrarouge et ondes radio.

Spectrographe. Instrument servant à décomposer la lumière en un spectre ou à observer seulement une longueur d'onde bien précise.

Sphère céleste. Sphère de centre et de rayon quelconques dont les points servent à représenter les directions de l'espace : à toute direction D on associe le point d'intersection de la sphère céleste et de la demi-droite parallèle à D dont l'origine est le centre de la sphère.

Surface du Soleil. Séparation entre la région d'où le rayonnement nous parvient (qui forme l'extérieur du Soleil, son atmosphère), quelle que soit la longueur d'onde, et la région qui est trop opaque pour que le rayonnement nous parvienne (l'intérieur du Soleil).

Syzygies. Phases du mouvement lunaire correspondant à la *conjonction* ou à l'*opposition* de la Lune et du Soleil, donc à la *nouvelle Lune* ou la *pleine Lune*.

–T–

Taches solaires. Régions sombres à la surface du Soleil qui correspondent à des zones plus froides que la matière avoisinante. Le diamètre des plus grosses taches solaires peut dépasser celui de la Terre.

Temps atomique international (TAI). Coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau international de l'heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements et dont l'unité est la *seconde SI*.

Temps des éphémérides (TE ou ET). Échelle de temps utilisée de 1952 à 1976 pour les théories dynamiques et jusqu'en 1984 pour les éphémérides des corps du système solaire. Elle est définie à partir de la théorie du mouvement de la Terre autour du Soleil de Newcomb. Cette échelle de temps est maintenant remplacée par les échelles de *Temps terreste* TT, de *Temps Coordonnée barycentrique* TCB, de *Temps Coordonnée géocentrique* TCG, de *Temps Dynamique Barycentrique* TDB.

Temps sidéral en un lieu donné, à un instant donné. *Angle horaire* de l'*équinoxe*. On parle du temps sidéral vrai lorsqu'il s'agit de l'équinoxe vrai et du temps sidéral moyen lorsqu'il s'agit de l'équinoxe moyen de la date. En un lieu donné, à un instant donné, la somme de l'*ascension droite* vraie d'un astre et de son angle horaire est égale au temps sidéral vrai. Au moment du passage supérieur d'un astre au *méridien*, son ascension droite vraie est donc égale au temps sidéral vrai.

Temps solaire moyen. *Temps solaire vrai* corrigé des inégalités de l'ascension droite du Soleil : c'est donc la partie linéaire, par rapport au temps, du temps solaire vrai.

Temps solaire vrai en un lieu, à un instant donné. *Angle horaire* du centre du Soleil en ce lieu, à cet instant.

Temps terrestre (TT). Échelle de temps utilisée pour les éphémérides géocentriques apparentes dont l'unité de temps est la

seconde SI. Au 1 janvier 1977 0 h TAI, TT a pour valeur 1 janvier 1977, 0 h 0 min 32,184 s. C'est une échelle de temps idéale dont la réalisation pratique est liée au *Temps Atomique International* TAI, par TT = TAI + 32,184 s.

Temps universel (TU ou UT). Échelle de temps étroitement liée à la rotation diurne de la Terre qui a longtemps été à la base des temps légaux. TU est défini par une relation mathématique donnant l'expression du *Temps sidéral* en fonction du Temps universel. On peut donc déterminer TU à partir d'observations d'étoiles (passage d'étoiles au *méridien*, par exemple). Le Temps universel ainsi obtenu est rapporté à un pôle fixe sur la Terre et est noté UT0. Le Temps universel rapporté au *pôle céleste des éphémérides* CEP s'obtient en s'affranchissant du mouvement du pôle et est noté UT1. Depuis 1984 l'échelle de temps légale n'est plus basée sur le Temps universel mais sur *le Temps universel coordonné* UTC.

Temps universel coordonné (UTC). Échelle de temps diffusée par les signaux horaires et utilisée comme base des temps légaux. C'est, en fait le *Temps Atomique International* TAI décalé d'un nombre entier de secondes. Ce nombre est modifié régulièrement de telle sorte que la différence entre UTC et le *Temps universel* UT1 n'excède pas 0,9 s en valeur absolue.

Terminateur. Courbe le long de laquelle le cône circonscrit au Soleil et à un astre est tangent à l'astre. Cette courbe sépare la région éclairée de l'astre de celle qui est dans l'ombre.

–U–

Unité astronomique (ua). *Demi-grand axe* d'une *orbite* que décrirait autour du Soleil une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le *moyen mouvement* est égal à k radians par jour, k étant la *constante de Gauss*.

–V–

Vent solaire. Matière éjectée en permanence du Soleil qui se propage dans l'espace à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde.

Vertical d'une direction, en un lieu donné. Demi-grand cercle de la *sphère céleste* contenant la verticale du lieu et le point de la sphère céleste associé à la direction. Par extension, le demi-plan contenant ce demi-grand cercle.

Verticale d'un lieu. Direction opposée au champ de pesanteur en ce lieu. Le point de la *sphère céleste* associé à cette direction est le *zénith* du lieu, le point diamétralement opposé est le *nadir*.

Zénith. Voir *Verticale* d'un lieu.

Zone de transition. Région de l'atmosphère solaire de quelques centaines de kilomètres d'épaisseur, où la température passe de quelques milliers de degrés à plusieurs millions de degrés.

Référence

Introduction aux éphémérides astronomiques, Supplément explicatif à la Connaissance des Temps. Bureau des longitudes. J.-L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot, Eds. EDP Sciences, les Ulis.