

INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE ET DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES
OBSERVATOIRE DE PARIS



Le manuel des éclipses



Extrait de la publication

Le manuel des éclipses

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

Observatoire de Paris



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 1^{er} 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

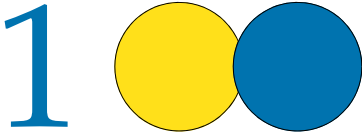
Avant-propos	III
Préface	V
1 – Introduction	1
1. Les phénomènes d'éclipses dans le système solaire, et au-delà... ..	1
2. La mesure des distances	2
3. Caractéristiques des orbites et distances à la Terre	10
2 – Historique	11
1. Les représentations mythologiques	11
2. La compréhension du phénomène des 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



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 :

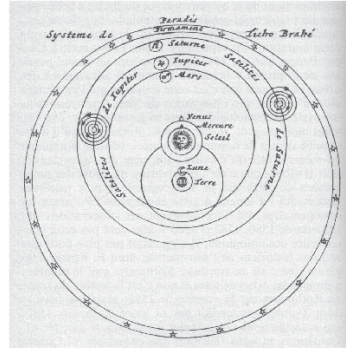
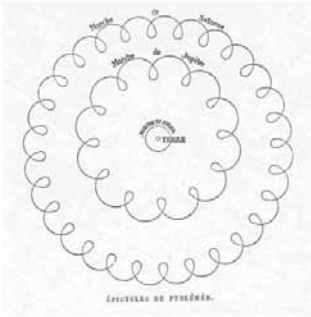
- mesurer les distances et observer les mouvements des astres du ciel ;
- « modéliser » l'univers qui nous entoure, c'est-à-dire supposer des distances, des tailles pour les corps célestes, des mouvements et voir si ces suppositions permettent de prévoir ce que l'on va observer dans le ciel (prévoir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

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.

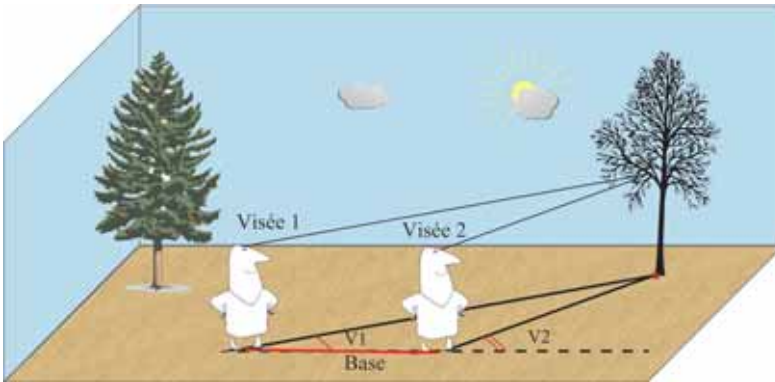
2. La mesure des distances

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.

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.



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.

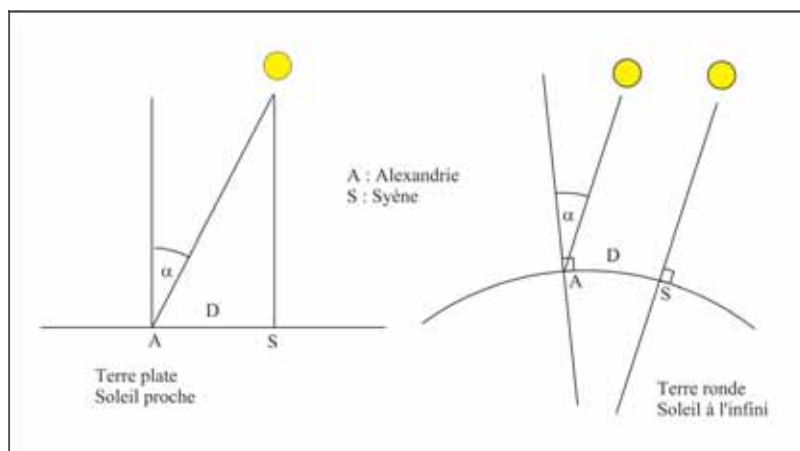
Le principe de la triangulation pour mesurer les distances est connu depuis l'antiquité. Malheureusement il ne s'applique que difficilement aux astres du ciel.



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.

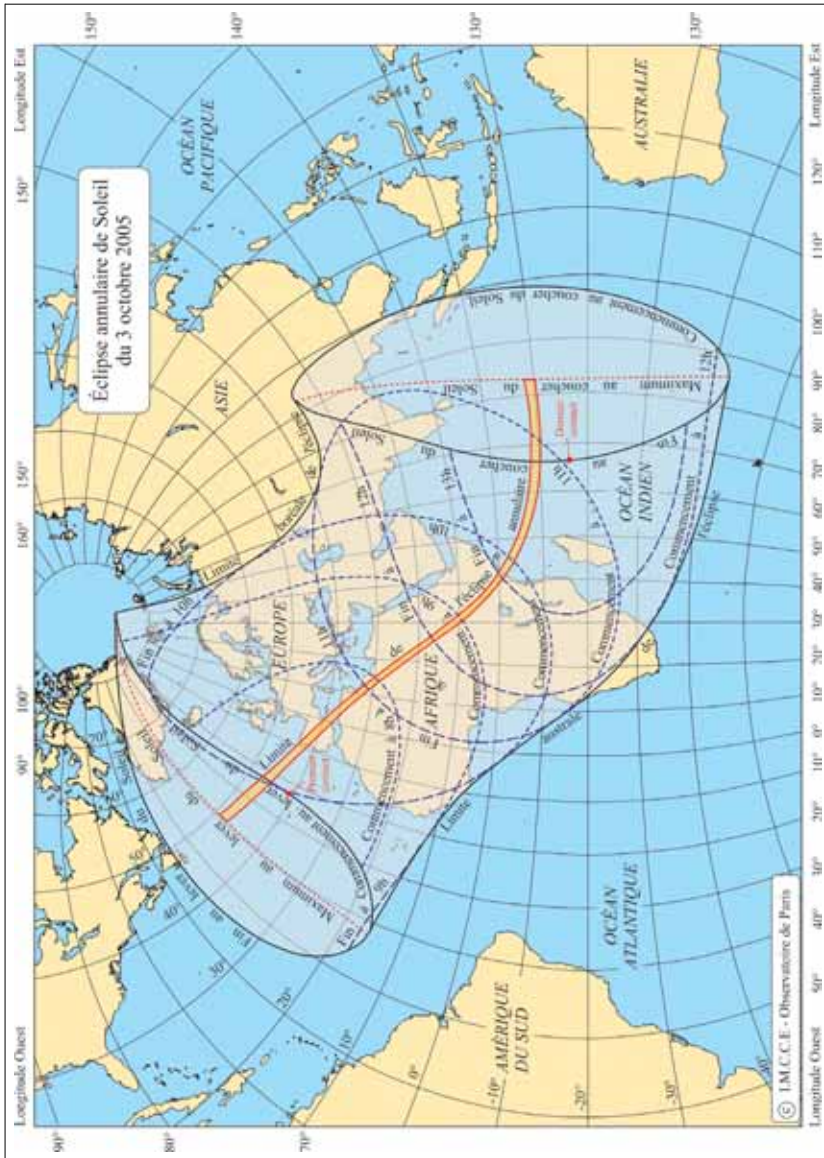
Figure 1.1. La mesure d'Ératosthène.



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

Éclipse annulaire de Soleil du 3 octobre 2005.



Éclipse annulaire de
Soleil du
3 octobre 2005.
Projection azimutale
de Lambert. © Imcce -
P. Rocher - 2002.

