



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Physique

Luc Dettwiller, Pierre Léna and Denis Gratias

Astronomy, Atmospheres and Refraction: Foreword

Volume 23, Special Issue S1 (2022), p. 5-11


Published online: 27 October 2023

Issue date: 11 August 2023

<https://doi.org/10.5802/crphys.132>

Part of Special Issue: Astronomie, atmosphères et réfraction

Guest editors: Pierre Léna (Professeur émérite, Observatoire de Paris et Université Paris Cité, membre de l'Académie des sciences) and Luc Dettwiller (Université Jean Monnet Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France)

 This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Physique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org
e-ISSN : 1878-1535



Astronomie, atmosphères et réfraction / *Astronomy, Atmospheres and Refraction*

Astronomy, Atmospheres and Refraction: Foreword

Astronomie, atmosphères et réfraction : Avant-propos

Luc Dettwiller^{*, a}, Pierre Léna^{*, b} and Denis Gratias^c

^a Université Jean Monnet Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School,
Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

^b LESIA. Observatoire de Paris. 92195 Meudon, France

^c IRCP Chimie-ParisTech Paris, France

E-mails: dettwiller.luc@gmail.com (Luc Dettwiller), pierre.lena@obspm.fr
(Pierre Léna), denis.gratias@academie-sciences.fr (Denis Gratias)

Published online: 27 October 2023, Issue date: 11 August 2023

La version française suit la version anglaise

This volume devoted to astronomical and atmospheric refraction is singular in several ways.

First, by the apparent simplicity of the phenomenon discussed here, the refraction of light, taught in high schools with the famous Snell-Descartes formula found at the beginning of the XVIIth century, and whose study, going back to the Xth century with Ibn Sahl, did not cease to fascinate the astronomers in front of the difficulty of observing the stars after the travel of their light in the Earth's atmosphere.

Then, by the concern of many of the present authors to follow the historical evolution of the problem in referring explicitly to some of the most important original articles that have marked this research until the advent of satellites.

Finally, by the number and the content of articles written in French in order to allow easy access to teachers, in particular of the first cycle of higher education, and to invite them to show to their students the genesis of a scientific approach of almost four centuries, carried out between mathematics, astronomy and physics.

This volume is an educational issue of history of science, an exemplary illustration of the story of great scientific adventures, which we hope will be the first of its kind but not the unique one. Perceiving the progress of science in its historical dimension is an essential approach to practice

* Corresponding authors.

in our institutions to understand not only the world around us but also the way it has gradually opened up to us. Exhibiting research on astronomical refraction provides a great opportunity to do so.

Its main concern is the effects – excluding those of extinction – produced on the observation of the stars by the propagation of their light in the Earth's atmosphere, at the wavelengths of the visible, later extended to the infrared, radiations: the celestial bodies are seen in an apparent direction, different from their real direction, and more or less distorted. The study of these phenomena has a long and rich history, particularly since the xviiith century, in connection with developments not only in optics, but also in mathematics, physics of gases and the atmosphere, and geodesy. This gave rise to successive mathematical models and approximations interesting to examine in their historical development. Indeed, astronomical refraction calculations progressed hand in hand with those of differential geometry, integral calculus and series expansions, which they stimulated and used very early on. Obtaining good tables of astronomical refraction was a major issue for navigation. At a time of intense competition in the development of overseas empires, scientific interest met geopolitical interests. At the same time, Newton stressed the fundamental role of these tables for astronomy. Indeed, the accuracy of astrometric measurements had long been dependent on the careful consideration of astronomical refraction and its modeling, until the advent of space-based observations.

The inverse problem, i.e. the determination of properties of the Earth's atmosphere from observations of refraction, was also the subject of much work, until it was recognized that the problem was ill-posed and had no unique solution. The refraction of light in the atmospheres of other bodies in the solar system – which can be seen in particular during stellar occultations or transits – led to the discovery of an atmosphere around the planet Venus in the xviiith century. This method is still used today to probe the atmospheres of solar system bodies from a distance even if they are tenuous, and to follow their temporal evolution.

In addition, to improve the altitude calculations of geodetic points on land, it appeared necessary to study what is usually called “terrestrial” or “atmospheric” refraction. Moreover, it is involved in the precise knowledge of the apparent height of the sea horizon, and therefore in the practice of astronomical navigation. This second aspect of the effects of refraction in the Earth's atmosphere, which includes various categories of particular and spectacular phenomena, such as mirages or *Fata Morgana*, also aroused curiosity and then quantitative explanations.

Beyond the large-scale refractive properties of the atmosphere, its local random fluctuations, which are caused by small-scale turbulence, were for a very long time a fundamental obstacle to the high angular resolution of astronomical images in the visible and infrared domains, until the development of contemporary adaptive optics methods, which are now used in all large ground-based telescopes. In parallel to this adaptive correction, the chromatic dispersion occurring in the atmosphere must be compensated for, so that multi-telescope optical interferometry, which is now rich in discoveries, is fully operational. The major importance of these two methods in contemporary astronomy justifies addressing them in this thematic issue dominated by refraction.

These developments, starting from the origin of the study of astronomical and atmospheric refractions, continuing with the exposition of theoretical properties and the analysis of various observations, and finally concluding with various consequences on astronomical observation using today's instruments, constitute a first part of twelve articles. The second part of this special issue wishes to shed light on several remarkable pieces of work from scientists of the past centuries, and to connect these with today's presentations. It includes seven more properly historical articles, including six commentaries on major texts, which opened up fruitful avenues of study. They are placed in their historical and scientific context, with their repercussions. Extensive excerpts from the original editions bring readers into direct contact with the source

of notions that have become essential. In order to overcome the difficulty of getting to the heart of an ancient text, a table of correspondences is proposed, linking the ancient notations to the current ones, as used in the two articles at the beginning of the first part. It is recommended to read these articles before tackling these historical comments. The two parts, both for the concepts and for the notations, thus retain an overall coherency, beyond the diversity of the articles.

By gathering here such a set of articles around refraction in the terrestrial and celestial atmospheres, we wish to show to the reader, researcher, professor or student, the richness and the variety of a subject which could seem almost trivial today, and to propose to him a tool which will be able to renew in depth his vision of a “simple”, most often geometrical, problem of optics. Many eminent scientists have dealt with it, as it has played and still plays a major role in astronomical observation and in the study of the atmospheres of celestial bodies.

The first three texts of Part I are by the same author and split for clarity. The first one (“Panorama historique...” [1]) presents a detailed history of the study of astronomical refraction, without limiting itself to general ideas. It goes into technical details, as is nowadays the practice in the history of mathematical sciences at large, and transcribes the outstanding formulas obtained in the past, accompanied by numerous quotations. The second article (“Propriétés remarquables de la réfraction astronomique...” [2]) exposes the main mathematical results, whether they take the form of rigorous theorems or more or less approximate expressions, in the case of an idealized, spherically symmetric atmosphere. The last article of this methodological presentation (“Phénomènes de réfraction atmosphérique terrestre” [3]) deals with terrestrial refraction and its various manifestations, of which it presents an attempt at a reasoned classification but non-exhaustive since some mysterious observations remain unclassifiable today.

Nine articles then discuss a variety of remarkable situations in which the interpretation or quality of the observation depends on refraction. Hence, article 4 (“Les tables de réfraction astronomique” [4]) presents the historical development of astronomical refraction tables. Article 5 (“Relations among atmospheric structure...” [5]) explores efforts to deduce the properties of the Earth’s atmosphere from refraction. With paper 6 (“Study of atmospheres in the solar system...” [6]), the richness of the methods used is revealed in the contemporary study of the atmospheres of solar system bodies, as it was in the discovery of an atmosphere around the planet Venus, presented in paper 7 (“The Lomonossov arc...” [7]), with interesting modern extensions. In articles 8 (“Les effets optiques de la turbulence atmosphérique...” [8]), 9 (“Optique adaptative...” [9]) and 10 (“Correction de la dispersion atmosphérique...” [10]), contemporary developments in adaptive optics and optical interferometry in the presence of atmospheric turbulence are analyzed. The reader’s curiosity will be nourished by articles 11 (“Novaya Zemlya effect and Fata Morgana” [11]) and 12 (“Images du Soleil et de la Lune...” [12]), which explore some consequences of unusual refractions: the *Novaya Zemlya* effect (1597), where the Sun is seen when it is significantly below the horizon; the distortion of the aspects of the Sun and the Moon at the horizon, seen from the ground or the International Space Station.

The second part, as announced, deals with historical studies, without however neglecting the theoretical and quantitative aspects. Six short articles by the same author each focus on a major text by a different scholar, systematically giving the context, then a summary with comments, and finally the most important derivations and results, reproducing certain essential original passages. This second part, with its precise analysis, along with a choice to go in depth into the presentation of these works, is clearly aimed at physicists as well as historians of science. Three texts are dedicated to the xviiith century. Bouguer’s seminal work (“L’invariant de Bouguer et ses conséquences” [13]) explores the curvature of light rays. Shortly afterwards, Lambert (“Les développements de Lambert” [14]) corrects the summit altitudes calculated by the Cassinis who had neglected terrestrial refraction, and proposes various series expansions to express the astronomical refraction angle. The last text (“Did Monge really explain inferior mirages?” [15])

shows that the claim about Monge, who after Bonaparte's expedition to Egypt is often credited with explaining ordinary mirages, is neither historically nor scientifically valid.

Three scholars of the XIXth century follow: Biot, author of a remarkable theorem and method of calculation concerning the integral of refraction ("Le théorème de Biot..." [16]); Kummer, applying a classical method of discussion in mechanics to the study of the vision of the horizon, which makes it possible to expose the whole of the corrections required at the time of the astronomical point at sea ("La discussion par Kummer d'une quadrature..." [17]); and finally, Radau, synthesizing the studies of the time – largely based on series expansions of which the divergence was then little known ("Les développements de Radau et leur divergence" [18]).

For the XXth century, we have chosen the remarkable works of Link, who laid the foundations of a theoretical photometric study of total lunar eclipses and showed that they can be indirectly used to probe the upper atmosphere of the Earth ("La photométrie des éclipses de Lune..." [19]).

We hope that this issue, with its wealth of historical references and the talent of its authors, will contribute to the work of researchers and historians and inspire many teachers to go beyond teaching science and tell its wonderful story!

Version française

Ce numéro thématique consacré à la réfraction astronomique et /ou atmosphérique est singulier à plus d'un titre.

Tout d'abord, par la simplicité apparente du phénomène discuté ici, la réfraction de la lumière enseignée en France dès le lycée avec la fameuse formule de Snell–Descartes du début du XVIII^e siècle. Son étude, remontant au X^e siècle avec Ibn Sahl, n'a cessé de passionner les astronomes face à la difficulté d'observer les astres après le passage de leur lumière dans l'atmosphère terrestre.

Ensuite, par le souci affiché des auteurs de suivre l'évolution historique du problème en se référant explicitement à certains des plus importants articles originaux qui ont jalonné cette recherche jusqu'à l'avènement des satellites.

Enfin, par le nombre et la teneur de certains articles, rédigés pour beaucoup en langue française afin d'en permettre facilement l'accès aux enseignants, en particulier du premier cycle de l'enseignement supérieur. Ils sont ainsi invités à montrer à leurs étudiants la genèse d'une démarche scientifique de quatre siècles, conduite conjointement entre les mathématiques, l'astronomie et la physique.

On l'aura compris, il s'agit d'un numéro à caractère pédagogique tourné vers l'histoire des sciences, une illustration exemplaire du récit des grandes aventures scientifiques, que nous espérons le premier de ce genre mais non l'unique. Percevoir les progrès des sciences dans leur dimension historique est une démarche essentielle à pratiquer dans nos institutions d'enseignement pour comprendre non seulement le monde qui nous entoure mais également la façon dont il s'est peu à peu ouvert à nous. Exposer les recherches sur la réfraction astronomique en fournit une formidable occasion.

Sa problématique est celle des effets, hors celui d'extinction, produits sur l'observation des astres par la propagation de leur lumière dans l'atmosphère terrestre, aux longueurs d'onde du visible puis de l'infrarouge : les corps célestes sont vus dans une direction apparente, différente de leur direction réelle, et plus ou moins déformés. L'étude de ces phénomènes possède une longue et riche histoire, en particulier depuis le XVIII^e siècle, en lien non seulement avec les progrès de l'optique, mais également avec ceux des mathématiques, de la physique des gaz et de l'atmosphère, ainsi que de la géodésie. Ceci donna lieu à des modélisations et des approximations mathématiques successives, intéressantes à examiner dans leur déploiement historique. En effet, les calculs de réfraction astronomique progressèrent de pair avec ceux de la géométrie

différentielle, du calcul intégral et des développements en série, qu'ils stimulèrent et utilisèrent très tôt. L'obtention de bonnes tables de réfraction astronomique fut un enjeu majeur pour la navigation. À une époque de forte concurrence due à l'expansion des empires maritimes, l'intérêt scientifique rencontrait les intérêts géopolitiques. En parallèle, Newton soulignait le rôle fondamental de ces tables pour l'astronomie. De fait, la précision des mesures en astrométrie a longtemps dépendu de la prise en compte minutieuse de la réfraction astronomique et de sa modélisation, jusqu'à l'avènement des observations spatiales.

Le problème inverse, à savoir la détermination de propriétés de l'atmosphère de la Terre à partir d'observations de la réfraction, fut également l'objet de nombreux travaux, jusqu'à ce que soit reconnu ceci : le problème était en grande partie mal posé et n'avait pas de solution unique. La réfraction de la lumière dans les atmosphères d'autres corps du système solaire, perceptible notamment lors d'occultations stellaires ou de transits, conduisit dès le XVIII^e siècle à la découverte d'une atmosphère autour de la planète Vénus. Cette méthode n'a rien perdu de son importance : elle permet aujourd'hui encore de sonder à distance les atmosphères de corps du système solaire, même ténues, et de suivre leurs évolutions temporelles.

Par ailleurs, pour améliorer les calculs d'altitude de points géodésiques terrestres, il s'avéra nécessaire d'étudier ce que l'on qualifia habituellement de « réfraction terrestre » ou « atmosphérique ». De plus, celle-ci intervient pour la connaissance précise de la hauteur apparente de l'horizon marin, donc dans la pratique de la navigation astronomique. Ce second volet des effets de la réfraction dans l'atmosphère de la Terre, qui regroupe diverses catégories de phénomènes particuliers et spectaculaires, tels les mirages ou les *Fata Morgana*, suscita également la curiosité puis des explications quantitatives.

S'ajoutant aux propriétés réfractives à grande échelle de l'atmosphère, les propriétés très locales, de surcroît aléatoires et causées par la turbulence à petite échelle, ont été très longtemps un obstacle fondamental à la haute résolution angulaire des images astronomiques dans les domaines visible et infrarouge, jusqu'à ce que se développent les méthodes contemporaines de l'optique adaptative, qui équipe désormais tous les grands télescopes terrestres. Outre cette correction adaptative, la dispersion chromatique se produisant dans l'atmosphère doit être compensée afin que l'interférométrie optique multi-télescopes, aujourd'hui riche de découvertes, soit pleinement opératoire. L'importance majeure de ces deux méthodes dans l'astronomie contemporaine justifie de les aborder dans ce numéro thématique dominé par la réfraction.

Ces développements, partant de l'origine de l'étude des réfractions astronomique et atmosphérique, se poursuivant par l'exposé des propriétés théoriques et l'analyse d'observations variées, enfin se concluant par diverses conséquences sur les instruments actuels d'observation astronomique, donnent matière à une première partie de douze articles. La seconde partie de ce numéro spécial souhaite, en ce qui concerne notre sujet, mettre en lumière de façon originale divers travaux féconds de scientifiques des siècles passés, et jeter un pont avec la présentation actuelle des concepts étudiés. Elle comprend donc sept articles plus proprement historiques, dont six commentaires de textes majeurs, qui ouvrirent de fécondes voies d'étude. Ils sont resitués dans leur contexte historique et scientifique, avec leurs répercussions. De larges extraits des éditions originales mettent les lecteurs en contact direct avec la source de notions devenues incontournables. Pour pallier la difficulté d'entrer de plain-pied au cœur d'un texte ancien, un tableau de correspondances est proposé, reliant les anciennes notations aux actuelles, telles qu'utilisées dans les deux articles débutant la première partie. Il est recommandé de lire ceux-ci avant d'aborder ces commentaires historiques. Les deux parties, tant pour les notions que pour les notations, conservent ainsi une cohérence d'ensemble, au-delà de la diversité des articles.

En rassemblant ici une telle somme d'articles autour de la réfraction dans les atmosphères terrestre et célestes, nous souhaitons montrer au lecteur, qu'il soit chercheur, professeur ou étudiant, la richesse et la variété d'un sujet qui pourrait paraître banal aujourd'hui, et lui proposer

un outil qui pourra renouveler en profondeur sa vision d'un « simple » problème d'optique, géométrique le plus souvent. Nombre d'éminents scientifiques l'ont traité, tant il joua et joue encore un rôle majeur dans l'observation en astronomie et dans l'étude des atmosphères des corps célestes.

Les trois premiers textes de la première partie sont du même auteur. L'article 1 (« Panorama historique... » [1]) présente un historique détaillé de l'étude de la réfraction astronomique, sans se limiter aux idées générales. Il entre dans les détails techniques, comme cela se pratique aujourd'hui dans l'histoire des sciences mathématiques au sens large, et transcrit les formules marquantes obtenues jadis, en les accompagnant de nombreuses citations *verbatim* assorties. L'article suivant (« Propriétés remarquables de la réfraction astronomique... » [2]) expose les principaux résultats mathématiques, qu'ils prennent la forme de théorèmes rigoureux ou d'expressions plus ou moins approximatives, dans le cas d'une atmosphère idéalisée, à symétrie sphérique. Le dernier article de cette présentation méthodologique (« Phénomènes de réfraction atmosphérique terrestre » [3]) traite de la réfraction terrestre et ses diverses manifestations, dont il présente une tentative de classification raisonnée, mais non exhaustive – car certaines observations mystérieuses demeurent aujourd'hui encore inclassables.

Neuf articles déroulent ensuite une diversité de situations remarquables dans lesquelles l'interprétation ou la qualité de l'observation sont tributaires de la réfraction. Il en est ainsi dans l'article 4 (« Les tables de réfraction astronomique » [4]), qui expose l'élaboration des tables de réfraction astronomique. L'article 5 (« Relations among atmospheric structure... » [5]) explore les efforts cherchant à déduire de la réfraction les propriétés de l'atmosphère de la Terre. Avec l'article 6 (« Study of atmospheres in the solar system... » [6]), la richesse des méthodes utilisées se révèle dans l'étude contemporaine des atmosphères de corps du système solaire, comme elle le fut dans la découverte d'une atmosphère autour de la planète Vénus, présentée dans l'article 7 (« The Lomonossov arc... » [7]), aux intéressants prolongements modernes. Dans les articles 8 (« Les effets optiques de la turbulence atmosphérique... » [8]), 9 (« Optique adaptative... » [9]) et 10 (« Correction de la dispersion atmosphérique... » [10]), les développements contemporains de l'optique adaptative et de l'interférométrie optique, en présence de turbulence atmosphérique, sont analysés. La curiosité du lecteur se nourrira des articles 11 (« Novaya Zemlya effect and Fata Morgana » [11]) et 12 (« Images du Soleil et de la Lune... » [12]) qui explorent certaines conséquences de réfractions insolites : l'effet *Novaya Zemlya* (1597), où le Soleil est vu alors qu'il est significativement en dessous de l'horizon; la distorsion des aspects du Soleil et de la Lune à l'horizon, vus depuis le sol ou la Station spatiale internationale.

La seconde partie, comme annoncé, est constituée d'études historiques, sans toutefois délaissier les aspects théoriques et quantitatifs. Six courts articles du même auteur s'attachent chacun à un texte majeur d'un savant différent, dont ils donnent systématiquement le contexte, puis un résumé assorti de commentaires, enfin les démonstrations et résultats marquants en reproduisant certains passages originaux essentiels. La précision des analyses ainsi présentées, jointe au refus de se cantonner à une présentation superficielle de ces travaux, fait que cette seconde partie s'adresse autant à des physiciens qu'à des historiens des sciences. Trois textes sont dédiés au XVIII^e siècle. Les travaux fondateurs de Bouguer (« L'invariant de Bouguer et ses conséquences » [13]) explorent la courbure des rayons lumineux. Peu après, Lambert (« Les développements de Lambert » [14]) corrige les altitudes de sommets, calculées par les Cassini qui avaient négligé la réfraction terrestre et propose divers développements en série pour exprimer l'angle de réfraction astronomique. Le dernier texte (« Did Monge really explain inferior mirages? » [15]) montre que l'affirmation sur Monge, qui, après l'expédition d'Égypte, est souvent crédité d'avoir expliqué les mirages ordinaires, n'est ni historiquement ni scientifiquement recevable.

Suivent trois savants du XIX^e siècle : Biot, auteur d'un théorème et d'une méthode de calcul remarquables concernant l'intégrale de réfraction (« Le théorème de Biot... » [16]) ; Kummer, appliquant une méthode de discussion classique en mécanique à l'étude de la vision de l'horizon, ce qui permet d'exposer l'ensemble des corrections requises lors du point astronomique en mer (« La discussion par Kummer d'une quadrature... » [17]) ; et enfin, Radau, synthétisant les études de l'époque, largement basées sur des développements en série, dont la divergence était alors peu connue (« Les développements de Radau et leur divergence » [18]).

Au XX^e siècle, nous avons retenu la personnalité de Link, posant les bases d'une étude photométrique théorique des éclipses totales de Lune et montrant qu'elles permettent de sonder la haute atmosphère terrestre (« La photométrie des éclipses de Lune... » [19]).

Nous espérons que ce numéro, par la richesse de ses références historiques et par le talent de ses auteurs, contribuera au travail des chercheurs comme des historiens et engendrera de nombreuses vocations chez les professeurs, afin qu'au-delà d'enseigner les sciences, ils en racontent la merveilleuse histoire !

References / Références

- [1] L. Dettwiller, "Panorama historique de l'étude de la réfraction astronomique : une histoire méconnue entre optique, mathématiques et géodésie", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 13-62.
- [2] L. Dettwiller, "Propriétés remarquables de la réfraction astronomique dans une atmosphère à symétrie sphérique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 63-102.
- [3] L. Dettwiller, "Phénomènes de réfraction atmosphérique terrestre", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 103-132.
- [4] F. Mignard, "Les tables de réfraction astronomique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 133-178.
- [5] A. T. Young, "Relations among atmospheric structure, refraction, and extinction", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 179-212.
- [6] B. Sicardy, "Study of atmospheres in the solar system, from stellar occultation or planetary transit", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 213-241.
- [7] S. Koutchmy, "The Lomonosov arc: refraction and scattering in Venus atmosphere during solar transits", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 243-268.
- [8] D. Bonneau, "Les effets optiques de la turbulence atmosphérique dans les images astronomiques", *Comptes Rendus. Physique* **23** (2022), no. S1, p. 269-291.
- [9] G. Rousset, T. Fusco, "Optique adaptative : correction des effets de la turbulence atmosphérique sur les images astronomiques", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 293-344.
- [10] L. Koechlin, L. Dettwiller, "Correction de la dispersion atmosphérique dans l'imagerie par les grands télescopes et les interféromètres astronomiques", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 345-364.
- [11] S. Van Der Werf, "Novaya Zemlya effect and Fata Morgana. Raytracing in a spherically non-symmetric atmosphere", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 365-389.
- [12] F. Mignard, "Images du Soleil et de la Lune, depuis le sol ou la Station spatiale internationale", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 391-414.
- [13] L. Dettwiller, "L'invariant de Bouguer et ses conséquences : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 415-452.
- [14] L. Dettwiller, "Les développements de Lambert : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 453-465.
- [15] A. T. Young, "Did Monge really explain inferior mirages?", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 467-481.
- [16] L. Dettwiller, "Le théorème de Biot et le changement de variable de Biot-Auer-Standish : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 483-501.
- [17] L. Dettwiller, "La discussion par Kummer d'une quadrature sur la réfraction astronomique : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 503-525.
- [18] L. Dettwiller, "Les développements de Radau et leur divergence : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 527-536.
- [19] L. Dettwiller, "La photométrie des éclipses de Lune, vue par František Link : commentaire historique", *C. R. Phys.* **23** (2022), no. S1, p. 537-555.