

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 17 (1964)
Heft: 3

Artikel: Explication partielle de la divergence entre les mesures visuelles et les mesures photographiques d'altitudes relatives sur la lune
Autor: Riesen, Arthur
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739884>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

EXPLICATION PARTIELLE DE LA DIVERGENCE ENTRE LES MESURES VISUELLES ET LES MESURES PHOTOGRAPHIQUES D'ALTITUDES RELATIVES SUR LA LUNE.

PAR

Arthur RIESEN

AVANT-PROPOS

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. le professeur J.-P. BOREL, qui m'a fait généreusement l'honneur d'accepter la direction du présent travail et qui m'a fourni la possibilité matérielle de le mener à chef, en mettant à ma disposition le micro-densitomètre enregistreur Joyce du Laboratoire de Physique technique de l'EPUL, à M. le professeur M. GOLAY, directeur de l'Observatoire de Genève, qui a mis gracieusement un spectrocomparateur SIP à notre disposition et qui m'a ouvert les colonnes des *Publications de l'Observatoire de Genève*, à M. le professeur P. BOUVIER, qui a pris le soin d'examiner le manuscrit en question afin de pouvoir en insérer une version condensée dans les *P.O.G.*, à M. le professeur Ch. BLANC et à M. P. BANDERET, chef de travaux, qui à l'Institut de Mathématiques appliquées de l'EPUL, ont facilité nombre de mes calculs, à M. M. FLUCKIGER, chef des travaux à l'Observatoire universitaire de Lausanne, qui n'a jamais cessé ses encouragements précieux et ses suggestions multiples, à mes amis G. CHEVALIER et R. ESTOPPEY qui ont apporté leur collaboration pratique dans la confection et le perfectionnement de plusieurs instruments utilisés.

INTRODUCTION

Dans une allocution prononcée devant l'Assemblée générale annuelle de la Société astronomique de France en juin 1961, M. André Lallemand [1], président élu, fait une revue générale des progrès de l'Astronomie au cours de l'année écoulée. Dans un passage consacré à l'étude de la surface de notre satellite naturel, il souligne les travaux de cartographie de la Lune très avancés et relève l'importance qu'il y a à bien connaître la nature du sol lunaire.

Cette dernière remarque confirme l'impression que l'on a retirée de la lecture d'une publication de Gold consacrée à la surface lunaire six ans auparavant [2].

Selon Gold, la hauteur d'un cratère est susceptible d'être fonction du diamètre de ce cratère ainsi que le montrent les jeunes cratères. Dès lors, l'écart existant entre la hauteur effective d'un cratère et sa hauteur théorique constitue une indication sur son âge.

Par ailleurs il existe plusieurs théories pour expliquer la formation des cratères lunaires. Parmi celles-ci, l'une fait appel au mécanisme d'explosion, qui en fait se traduirait par l'expansion brutale de gaz sous hautes pressions. La cause de ces explosions repose sur l'hypothèse de bombardements météoritiques. Les projectiles arrivant sur la surface lunaire avec une vitesse de Mach 10 environ, produisent des explosions qui peuvent prendre naissance à de grandes profondeurs comme en surface. Elles engendrent une dépression peu profonde. Cette théorie estime à 10^5 le nombre des cratères lunaires de la face visible de la Lune, qui semblent avoir été engendrés par de telles explosions. En particulier lorsque la puissance de l'explosion est relativement faible, il en résulte la formation de trous en forme d'entonnoirs aux bords escarpés. Ces trous possèdent un pic central dont la pente atteint au maximum 15° .

Un autre problème concernant la surface lunaire est celui de l'origine des dômes. Ces dômes auraient un diamètre de l'ordre de la dizaine de kilomètres et une hauteur de quelques centaines de mètres [3].

Ces quelques considérations montrent qu'il est nécessaire d'avoir les possibilités d'établir au mieux, d'une part, la valeur des altitudes des formations lunaires, d'autre part, les valeurs que peuvent affecter les pentes de la surface lunaire.

Actuellement nous savons que d'importants travaux de cartographie de la surface lunaire sont entrepris à l'Observatoire Yerkes, aux U.S.A., sous la direction du professeur Kuiper, et à l'Observatoire du Pic du Midi, en France, sous la direction du professeur Kopal, de l'Université de Manchester [5].

Quant aux ouvrages déjà parus, ils nous fournissent des indications très sommaires sur la façon de procéder. De plus, il faut bien admettre pour l'instant que les différents types de mesures ne conduisent pas à des valeurs concordantes de ces altitudes relatives lunaires.

En conséquence, le but du présent travail se trouve être:

- 1) de montrer qu'il est impossible de traiter correctement le problème de la détermination des altitudes lunaires, sans tenir compte du diamètre apparent du Soleil;
- 2) de montrer que les procédés dits de contre-typage et les procédés d'agrandissement sur papiers photographiques, non seulement ont conduit à des interprétations erronées des résultats, mais nécessitent de nombreuses et importantes complications d'appareillages si l'on veut aboutir à une mesure correcte de la grandeur à déterminer. Qu'il est judicieux d'éviter ces complications;
- 3) de montrer que la seule voie raisonnable à suivre actuellement dans la détermination des altitudes lunaires est celle qui consiste à analyser microphotométriquement la structure des clichés photographiques de la Lune.

SOMMAIRE

Pour déterminer l'altitude relative d'une aspérité du sol lunaire, on commence généralement par mesurer la longueur de l'ombre portée par cette aspérité sur le sol lunaire. L'étude d'une série de clichés de la Lune, de leurs contretypes et de leurs agrandissements sur papier photographique, a montré que la longueur d'une « ombre » sur ces documents varie avec les conditions de reproduction photographique. Ces variations de longueurs « d'ombres » sur les documents peuvent s'expliquer en partie par la présence d'une zone de pénombre qui prolonge l'ombre pure. Il est alors nécessaire d'introduire la notion de pénombre dans la définition de la notion d'ombre. La notion de pénombre permet d'expliquer partiellement les divergences qui existent entre les mesures effectuées par voie visuelle et celles effectuées par voie photographique.

CHAPITRE PREMIER

MÉTHODE UTILISÉE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ALTITUDE RELATIVE DES ASPÉRITÉS DE LA SURFACE LUNAIRE

1. Bases théoriques

Examinons une formation lunaire éclairée par le Soleil et considérons un point A de la frontière qui sépare la zone éclairée de cette formation, de la zone non éclairée. Appelons B le pied de la verticale lunaire passant par A (figure 1).

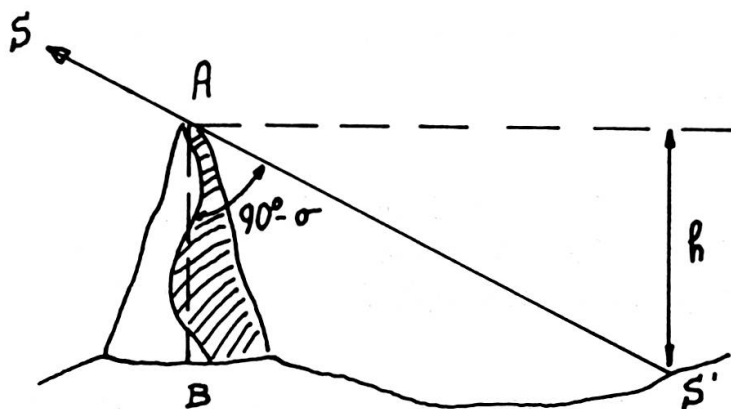


Fig. 1.

La projection S' du centre S du Soleil, à partir du point A , sur la surface lunaire voisine du pied B de la formation considérée, est appelée ombre portée du point A .

La connaissance de la longueur $\overline{AS'}$ et de l'angle $90^\circ - \sigma$ que forme la direction AS du centre du Soleil avec la verticale lunaire AB , permet la détermination de la hauteur h du point A au-dessus du point S' . σ est appelé la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon lunaire théorique relatif au point B .

Désignons par:

s'' la longueur $\overline{AS'}$ vue et mesurée en secondes d'arc par l'observateur terrestre O ;
 \overline{OB} la distance qui sépare l'observateur O du point B , avec le rayon terrestre r_T comme unité;

\emptyset l'angle de phase de la Lune.

On montre [4] qu'à chaque instant l'on a la relation (1.1):

$$s'' \cong \frac{56\,207 (1+h) \sin \emptyset}{\overline{OB}} \sin \sigma - \sqrt{\sin^2 \sigma - h(2-3h)} \quad (1.1)$$

La résolution, par rapport à h de l'équation (1.1), conduit, après avoir posé (1.2):

$$E \equiv \frac{56\,207 \sin \emptyset}{\overline{OB}} \quad (1.2)$$

au résultat cherché (1.3):

$$h \cong \frac{s''}{E} \left(\sin \sigma - \frac{s''}{2E} \right) \quad (1.3)$$

L'erreur maximum sur h est donnée par la relation (1.4):

$$(dh)_{\max} = \frac{\sin \sigma}{E} ds'' \quad (1.4)$$

Les éléments qui figurent dans le second membre de l'égalité (1.3) ont été calculés comme suit:

a) $\sin \sigma$.

λ et β étant les coordonnées sélénographiques du point B ;

ξ , η , ζ étant les coordonnées sélénocentriques du point B ;

λ_S et β_S étant respectivement la longitude et la latitude sélénographique du Soleil;

on a:

$$\sin \sigma = \sin \beta \cdot \sin \beta_S + \cos \beta \cdot \cos \beta_S \cdot \cos (\lambda_S - \lambda) \quad (1.5)$$

avec

$$\left| \begin{array}{l} \lambda = \arcsin \frac{\xi}{\sqrt{1 - \eta^2}} \\ \beta = \arcsin \eta \end{array} \right. \quad (1.6)$$

b) $\sin \emptyset$.

Le calcul de l'angle de phase \emptyset de la Lune exige la connaissance préalable des composantes en longitude sélénographique l et en latitude sélénographique b , de

la libration topocentrique. A cet effet nous avons utilisé la méthode imaginée par R. d'E. Atkinson [6].

Rappelons brièvement les étapes de ce calcul.

Désignons par :

- A_R l'ascension droite de la Lune;
- δ_0 la déclinaison de la Lune;
- δ la déclinaison apparente de la Lune pour l'observateur O ;
- H_γ l'heure sidérale;
- H l'angle horaire de la Lune;
- ω l'angle formé par la direction centre Terre-centre Lune TL avec la direction centre Terre-observateur TO ;
- p la parallaxe horizontale équatoriale de la Lune;
- p' la parallaxe pour l'observateur O ;
- q_0 l'angle de position du méridien central lunaire pour un observateur géocentrique;
- q l'angle de position du méridien central lunaire pour l'observateur O ;
- u l'angle parallactique de la Lune pour l'observateur O ;
- λ_T la longitude sélénographique de la Terre;
- β_T la latitude sélénographique de la Terre.

La valeur de chacun de ces paramètres étant déterminée par l'instant de prise des clichés, on calcule successivement :

$$H = H_\gamma - A_R \quad (1.7)$$

$$\cos \omega = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos H \quad (1.8)$$

φ étant la latitude géocentrique du point O .

$$p' = p (\sin \omega + 0,0084 \sin 2\omega) \quad (1.9)$$

$$\sin u = \sin H \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{cosec} \omega \quad (1.10)$$

$$\left| \begin{array}{l} \Delta l_i = -p' \cdot \sin (u - q_{i-1}) \cdot \sec b_i \\ \Delta b_i = p' \cdot \cos (u - q_{i-1}) \end{array} \right. \quad (1.11)$$

$$\left| \begin{array}{l} l_i = \lambda_T + \Delta l_i \\ b_i = \beta_T + \Delta b_i \end{array} \right. \quad (1.12)$$

$$\left| \begin{array}{l} \Delta \delta = -p' \cdot \cos u \\ \bar{\delta} = \delta_0 + \frac{1}{2} \Delta \delta \end{array} \right. \quad (1.13)$$

$$\left| \begin{array}{l} \Delta q_{i-1} = \Delta_1 q + \Delta_2 q_i \\ q_i = q_{i-1} + \Delta q_{i-1} \end{array} \right. \quad (1.14)$$

où les indices $i = 1, 2, 3, \dots$ désignent les approximations successives des librations topocentriques l et b .

Les valeurs l_i et b_i tendent respectivement vers les valeurs l et b , au bout d'un nombre petit d'itérations. Connaissant l et b , on peut alors calculer:

$$\cos \emptyset = \cos b \cdot \cos \beta_S (\sin l \cdot \sin \lambda_S + \cos l \cdot \cos \lambda_S) + \sin b \cdot \sin \beta_S \quad (1.15)$$

d'où l'on tire la valeur de $\sin \emptyset$.

c) *Longueur apparente de l'ombre s'' .*

ξ, η, ζ étant les coordonnées sélénocentriques d'un point de la surface lunaire, avec pour unité le rayon moyen lunaire r_L , on détermine pour commencer les coordonnées rectangulaires x, y, z ; l'axe Lz ayant pour direction la direction de visée OL de la Lune. On a:

$$\begin{cases} x = \xi \cos l - \zeta \sin l \\ y = -\xi \sin l \cdot \sin b + \eta \cos b - \zeta \cos l \cdot \sin b \\ z = \xi \sin l \cdot \cos b + \eta \sin b + \zeta \cos l \cdot \cos b \end{cases} \quad (1.16)$$

La troisième coordonnée z permet le contrôle suivant:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (1.17)$$

Vient ensuite le calcul des coordonnées standard qui font intervenir la correction de distance finie:

$$\begin{cases} x' = x + xz \sin s_L \\ y' = y + yz \sin s_L \end{cases} \quad (1.18)$$

s_L étant le demi-diamètre lunaire.

Dans ces conditions, la distance apparente de deux points B_1 et B_2 de la surface lunaire, respectivement de coordonnées standard $(x'_1; y'_1)$ et $(x'_2; y'_2)$, sera donnée par la relation (1.19):

$$\overline{B_1 B_2} = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2} \quad (1.19)$$

Si B''_1 et B''_2 sont les images, sur la plaque photographique, des points B_1 et B_2 , la mesure du segment $\overline{B''_1 B''_2}$ permet la détermination du diamètre d' de l'image du disque lunaire sur la plaque photographique. En effet:

$$d' = \frac{2 \overline{B''_1 B''_2}}{\overline{B_1 B_2}} \quad (1.20)$$

La relation (1.21) fournit enfin la mesure, en secondes d'arc, de la longueur apparente s' de l'ombre portée vue par l'observateur O .

$$s'' = \frac{2s_L}{d'} l' \quad (1.21)$$

l' étant la mesure, sur le cliché, de la longueur de l'ombre portée.

d) *Distance \overline{OB} .*

Une approximation largement suffisante permet d'écrire:

$$\overline{OB} = \overline{OL} - z \quad (1.22)$$

Or comme:

$$\overline{OB} = r_T \sin \omega \cdot \operatorname{coséc} p' \quad (1.23)$$

On peut écrire:

$$\overline{OL} = r_T \sin \omega \cdot \operatorname{coséc} p' - z \frac{r_L}{r_T} \quad (1.24)$$

En prenant le rayon terrestre moyen pour unité, il vient:

$$\overline{OB} = \sin \omega \cdot \operatorname{coséc} p' - z \cdot 0,2725 \quad (1.25)$$

2. Deux procédés de mesure employés

Le point le plus délicat de cette méthode de détermination des altitudes relatives consiste dans la mesure de la longueur de l'ombre portée. Actuellement on procède couramment des deux façons suivantes:

- 1° Visuellement à l'aide d'un micromètre oculaire adapté à l'instrument d'observation;
- 2° Photographiquement. A la prise des clichés originaux s'ajoutent le contre-typage et l'agrandissement de ces clichés sur papier photographique.

Le procédé visuel présente l'avantage de permettre des mesures sur des images pratiquement conformes à la réalité. En effet, la turbulence des images et les conditions d'utilisation des instruments d'observation n'altèrent pas les mesures dans des proportions gênantes. Malheureusement ce procédé ne permet que des mesures isolées.

En outre, les résultats ainsi obtenus sont susceptibles de varier avec l'état de l'observateur et à plus forte raison d'un observateur à un autre.

Le procédé photographique, lui, permet la répétition des mesures. De plus, il est possible d'étudier simultanément plusieurs régions de la surface lunaire sur un seul et même document. Mais ce deuxième procédé introduit plusieurs facteurs susceptibles d'altérer la mesure de la grandeur à déterminer. Ainsi la longueur de l'image d'une ombre portée peut varier de façon appréciable avec :

- a) la nature de l'émulsion photographique employée;
- b) La réaction de cette émulsion à la quantité de lumière reçue d'une part, au traitement chimique qui lui est infligé, d'autre part.

Vers 1955 il a été constaté [7] que les mesures visuelles et les mesures photographiques présentent des différences qui pourraient receler un caractère systématique. En général, la valeur des hauteurs calculées à partir d'observations, visuelles est les trois quarts environ de la valeur des mêmes hauteurs mesurées par voie photographique.

Il est donc permis de se demander si la notion traditionnelle de longueur d'ombre portée ne présente pas quelque imprécision.

CHAPITRE II

SITUATION DU PROBLÈME

1. *Réalisation des clichés originaux*

Notre première tâche fut donc de réaliser une série de clichés de la Lune, aptes à permettre des mesures aussi précises que possibles. Nous nous sommes efforcés de réunir les conditions suivantes :

- 1^o Photographier des régions voisines du méridien central lunaire, dans le but d'étudier des ombres portées se présentant sous une longueur apparente aussi grande que possible;
- 2^o Choisir une région située près du centre du disque lunaire, une autre située près du bord du disque lunaire, pour le cas où l'interprétation des résultats serait fonction de la région lunaire considérée;
- 3^o Choisir des régions contenant des formations lunaires connues aussi bien que possible, afin de permettre la comparaison de nos résultats avec la moyenne admise des résultats consignés dans les atlas lunaires récents.

La Lune, au premier quartier, étant particulièrement haute sur l'horizon durant le printemps 1957 (ce qui n'arrive que tous les dix-huit ans deux tiers environ), nous avons décidé de prendre plusieurs séries de clichés au printemps et en automne. Des

conditions atmosphériques peu favorables ajoutées aux conditions 1^o, 2^o, 3^o, mentionnées plus haut, ont singulièrement restreint le nombre des nuits satisfaisant aux exigences requises. Il nous a toutefois été possible de prendre 46 clichés réalisés avec le télescope à vision directe Cassegrain de 62 cm de diamètre de l'Observatoire universitaire de Lausanne, dont l'optique remarquable se prête parfaitement au genre d'étude entrepris ici. Ceux des séries I à IV ont été pris à travers l'oculaire Huygens; un obturateur « Contessa-Nettel » assurait l'exactitude des temps de pose. Ceux des séries V à X ont été pris au foyer Cassegrain de l'instrument. Un obturateur à rideau permettait une variation continue du temps de pose.

TABLEAU I

Cliché	Date	T. U.		Ciel	Atmosphère	Image	Galvanomètre
N ^o	1957	h	mn				Unités arbitr.
8	9 mars	19	30	Brume	Bise	Agitée	80
9	»	20	00	»	»	»	75
24	11 mars	19	00	Clair	Calme	Stable	115
25	»	19	20	»	»	»	115
27	»	19	59	»	»	»	113
31	»	21	20	»	»	»	135
34	»	22	20	»	»	Instable	110
				Brume	Brise		
43	17 septembre	04	00	Légère	Légère	Stable	107
44	»	04	01	»	»	»	107
45	»	04	02	»	»	»	107

Sur 69 clichés pris au total, nous en avons retenus 10 qui présentent des qualités de netteté et d'échelle que nous jugeons bonnes. Ce sont les clichés portant les numéros: 8, 9, 24, 25, 27, 31, 34, 43, 44, 45. Les clichés retenus ont tous été pris à l'oculaire du télescope. La perte de lumière, correspondant à une focale de 35,5 m environ, risquait de rendre les temps de pose prohibitifs. Pour cette raison nous avons porté notre choix sur l'émulsion Kodak Tri-X, particulièrement sensible, ce qui a permis de ramener les temps de pose à l'ordre de la seconde — temps de pose jugé encore tolérable dans les travaux de photographie lunaire.

Le tableau I indique les conditions initiales qui ont accompagné la prise des clichés retenus. En particulier la troisième colonne indique, convertie en temps

universel, l'heure de prise des clichés, lue avec une erreur négligeable sur le chronomètre de marine Ulysse Nardin de l'Observatoire de Genève, qui était alors en service dans notre observatoire. Dans la dernière colonne, sont consignées les indications d'un galvanomètre relié à une cellule photosensible, elle-même recevant la lumière envoyée par la portion éclairée du disque lunaire apparent; les valeurs qui ont été ainsi relevées permettent de conclure à une transparence de l'atmosphère quasi constante durant chaque intervalle de temps nécessaire à la prise des clichés de chacune des trois séries retenues.

Le tableau II indique les conditions de développement des clichés originaux.

TABLEAU II

Cliché	Emulsion	Temps de pose	Révélateur	Développement	
				Durée	Température
N°		s		mn	° C
8	Kodak Tri-X	1	G 201	6	21
9	»	1	+ agent mouillant	6	21
24	Kodak Tri-X	1		7	18
25	»	1	G 201	7	18
27	»	1	+ agent	7	18
31	»	1	mouillant	7	18
34	»	1		7	18
43	Kodak Tri-X	0,5	Continental	6	18
44	»	0,5	+ agent	4	18
45	»	2	mouillant	4	18

2. Essais de contre-typage

Les clichés originaux présentent en général un contraste peu élevé. Dans le but de renforcer ce contraste, on procède au contre-typage, c'est-à-dire à la copie du cliché original sur une plaque sensible à contraste plus élevé, qui constitue le premier contre-type ou contre-type *a*. Les zones d'ombres et de lumières sont ainsi délimitées de façon plus nette sur les contre-types qu'elles ne le sont sur les clichés originaux. Si nécessaire, un nouveau contre-typage conduit à un contre-type *b*, où l'on ne distingue pratiquement que des zones noires, séparées avec netteté des zones blanches par une gamme très restreinte de gris intermédiaires.

3. *Essais d'agrandissement sur papier photographique*

Une autre solution du problème de la mesure exacte des longueurs d'ombres portées, consiste à agrandir directement les clichés originaux sur papier photographique à fort contraste. Un nombre considérable de documents accumulés nous montre que la longueur d'une ombre portée est altérée par ce procédé de mesures. L'examen des agrandissements montre encore que les conditions d'agrandissement propres à assurer le meilleur contraste possible, varient avec la région du cliché original considérée. En conséquence, sur un seul et même agrandissement, la mesure d'une longueur d'ombre est entachée des erreurs systématiques suivantes :

dans les régions à fond clair, on aura tendance à donner des valeurs trop petites aux mesures de longueur d'ombre portée ; tandis que dans les régions à fond sombre, on aura tendance à donner des valeurs trop grandes aux mesures de longueur d'ombre portée. Pour toutes ces raisons, nous avons renoncé à utiliser ce procédé de mesure.

4. *Hypothèse de l'influence de la pénombre sur les mesures de longueur d'ombre portée ainsi effectuées*

Il nous reste désormais une dernière possibilité de mesure, à savoir la mesure des longueurs d'ombres portées, effectuée directement sur le négatif original. Mais avant d'entreprendre ces nouvelles mesures, essayons de tirer avantage de ce que nous avons observé jusqu'ici.

Le manque de netteté des images photographiques astronomiques peut avoir pour causes principales :

- 1^o Une inévitable limitation dans la précision de l'optique des instruments utilisés ;
- 2^o Des défauts de mise au point de l'image sur l'émulsion originale ;
- 3^o La diffusion de la lumière dans le milieu qui constitue l'émulsion photographique ;
- 4^o L'agitation atmosphérique incontrôlable, source de la turbulence des images observables à l'œil, au travers de l'instrument d'observation.

Dans notre cas, les effets des trois premières causes peuvent être tenus pour négligeables. La turbulence, par contre, joue un rôle néfaste dans l'étalement des fins détails que l'on pourrait certainement déceler sur les documents photographiques,

en son absence. Mais en plus de ceci, dans les questions relatives aux mesures de longueur d'ombre portée, il apparaît comme indispensable de tenir compte d'une cinquième cause, dont les effets sont probablement aussi importants que ceux de l'agitation atmosphérique. Il s'agit, en l'occurrence, de la zone de pénombre qui sépare la zone d'ombre portée pure de la zone de pleine lumière. La présence de cette zone de pénombre est simplement liée au fait que le Soleil constitue une source de lumière étendue qu'il n'est pas possible d'assimiler, dans notre étude, à une source de lumière ponctuelle.

5. Etude théorique du rôle joué par la pénombre

Complétons la figure 1 du début du chapitre I.

Sur la figure 2, considérons le plan défini par la verticale lunaire AB et le centre S du Soleil. Ce plan coupe le bord apparent du disque solaire en deux points C et D dont les projections, à partir du point A , sur la surface lunaire sont respectivement C' et D' . Chacun des rayons lumineux CA et DA forment avec la ligne SA un angle

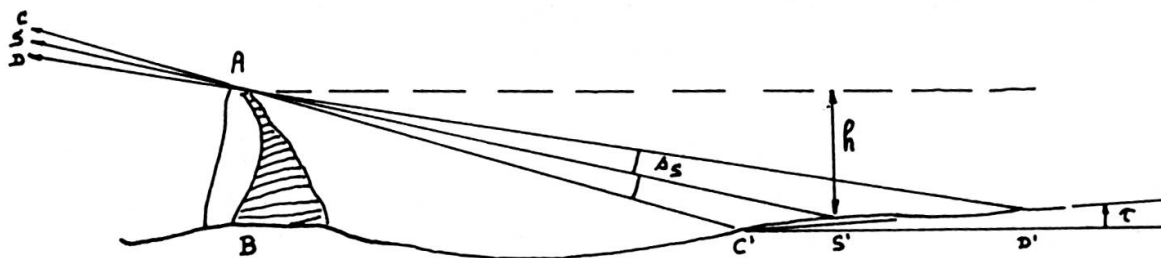


Fig. 2.

égal au demi-diamètre solaire s_s , les points de la ligne d'intersection du plan SAB avec la surface lunaire peuvent appartenir à trois zones distinctes:

- 1° zone d'ombre pure s'étendant de B à C' ;
- 2° zone de pénombre comprise entre les points C' et D' ;
- 3° zone de pleine lumière, située au-delà du point D' .

Le point S' appartient donc à la zone de pénombre et la réalité désignée habituellement par le terme « ombre portée » peut porter à confusion. Par la suite, nous appellerons les segments suivants:

$\overline{AC'} = m$, longueur d'ombre pure.

$\overline{AS'} = l_t$, longueur d'ombre théorique (parce que relative à un Soleil fictif ponctuel occupant le point S).

$\overline{AD'} = n$, longueur d'ombre augmentée de la pénombre.

Théoriquement, ces définitions sont délivrées de toute ambiguïté.

La connaissance de chacune des longueurs ainsi définie permet de calculer l'altitude du point A au-dessus des points C' , S' , D' , successivement. En effet, on a respectivement les relations simultanées (2.1):

$$\begin{aligned} h(m, \sigma + s_S) &= \frac{m''}{E} \left[\sin(\sigma + s_S) - \frac{m''}{2E} \right] \\ h(l_t, \sigma) &= \frac{l_t''}{E} \left[\sin \sigma - \frac{l_t''}{2E} \right] \\ h(n, \sigma - s_S) &= \frac{n''}{E} \left[\sin(\sigma - s_S) - \frac{n''}{2E} \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

qui sont des modifications convenables de la relation (1.3); m'' , l_t'' , n'' sont respectivement les longueurs m , l_t , n , vues et mesurées en secondes d'arc par l'observateur terrestre O .

La localisation, sur le cliché original, des points C' , S' , D' pose des problèmes délicats, que ni les procédés de mesures visuelles, ni les procédés de contre-typage, ni les procédés d'agrandissement direct ne sont à même de résoudre. Seule la connaissance du profil photométrique de la zone de pénombre peut nous secourir à ce sujet.

Du point de vue strictement géométrique, on constate que l'étendue de la zone de pénombre est loin d'être négligeable. Examinons, par exemple, ce qui se passe pour les formations lunaires portant ombre sur des portions étendues de surfaces horizontales et calculons la valeur du rapport de la longueur d'ombre augmentée de la pénombre à la longueur d'ombre pure. Si h est la hauteur du point A au-dessus de la portion de surface plane considérée, on a:

$$m \cdot \sin(\sigma + s_S) = n \cdot \sin(\sigma - s_S) = h \quad (2.2)$$

d'où le rapport

$$\frac{n}{m} = \frac{\sin(\sigma + s_S)}{\sin(\sigma - s_S)} \quad (2.3)$$

Ce rapport prend des valeurs d'autant plus grandes, que la hauteur σ du Soleil au-dessus de la surface plane considérée est petite. Nous indiquons, ci-dessous dans le tableau IVa, quelques valeurs de ce rapport pour des angles compris entre 2° et 16° et pour un demi-diamètre solaire $s_S = 16'$:

TABLEAU IVa

σ	$\frac{m}{n}$
°	
2	1,307
3	1,194
4	1,142
5	1,111
6	1,093
8	1,069
10	1,054
12	1,045
14	1,038
16	1,033

Ce tableau montre que l'étendue de la zone de pénombre peut représenter jusqu'à 30 % de la zone d'ombre pure.

Le rapport $\frac{n}{m}$ dépend encore de la pente τ de la portion de la ligne d'intersection de la surface lunaire avec le plan SAB , située dans la zone de pénombre. En effet, si l'on désigne par $h_{D'}$ l'altitude du point A relative au point D' et par $h_{C'}$ l'altitude du point A relative au point C' , on peut écrire que :

$$\frac{h_{D'} - h_{C'}}{h_{D'} \cotg (\sigma - s_s) - h_{C'} \cotg (\sigma + s_s)} = \tg \tau \quad (2.4)$$

où τ désigne l'angle orienté que forment la droite $C'D'$ avec l'horizontale lunaire située dans le plan SAB et passant par C' , (figure 5). Le dénominateur du premier membre de l'expression (2.4), étant pratiquement toujours positif, le signe de τ sera le même que celui de la quantité $h_{D'} - h_{C'}$. En conséquence les valeurs du rapport $\frac{n}{m}$ relatives à des angles de pentes positifs seront plus grandes que les valeurs du même rapport relatives à des angles de pentes négatifs.

Théoriquement, la mesure des longueurs m et n permet la détermination d'une pente de portion de surface lunaire, à l'aide d'un seul et même cliché. Nous verrons plus loin que la mesure des longueurs m et n présente des difficultés pratiques considérables.

Passons à l'examen photométrique de la zone de pénombre. Pour cela nous nous trouvons dans l'obligation de prolonger dans la fin de ce § 5, les théories déjà

existantes. Il s'agit en fait de calculer l'éclairement de la surface lunaire en un point quelconque d'une zone de pénombre. Bornons-nous à examiner les choses telles qu'elles se présentent, lorsque le disque solaire apparent est occulté par des obstacles à bord supérieur rectiligne horizontal.

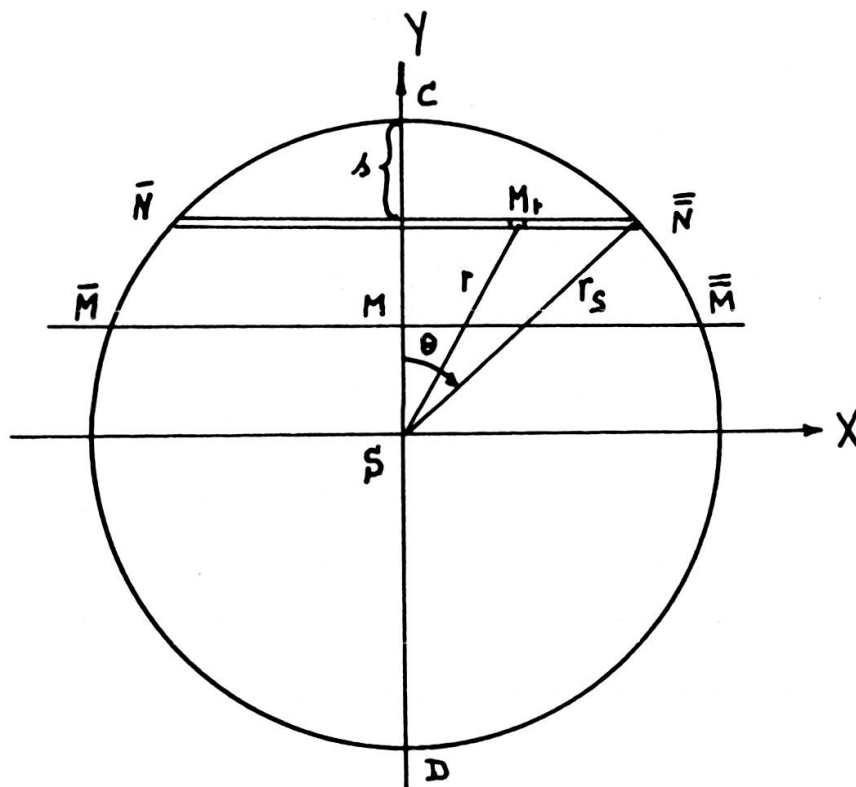


Fig. 3.

La brillance du disque solaire apparent n'étant pas constante [9], il faut tenir compte, dans nos calculs, de l'assombrissement du bord du disque solaire apparent.

Soient, sur la figure 3, les éléments suivants, attachés au disque solaire apparent, tel qu'il pourrait être vu par un observateur situé sur la Lune en un point M' et observant un lever ou un coucher de Soleil en direction d'un rempart rectiligne horizontal indéfini, de hauteur h au-dessus du sol lunaire;

le rempart rectiligne horizontal occulte la partie du disque solaire apparent située au-dessous de la ligne horizontale $\overline{M\overline{M}}$, \overline{M} et \overline{M} étant situés sur le bord apparent du disque solaire. L'observateur se trouve donc ainsi dans une zone de pénombre:

$SX \parallel \overline{M\overline{M}}$ un axe de référence horizontal, attaché au centre S du disque solaire;

$SY \perp \overline{M\overline{M}}$ un axe de référence vertical, attaché au centre S du disque solaire;

C et D les intersections de l'axe SY avec le bord apparent du disque solaire;

\overline{N} et \overline{N} les extrémités d'une bande horizontale, de hauteur infiniment petite dY , du disque solaire;

- M_r un point courant de la bande \overline{NN} ;
 r la distance du point M_r au centre S du disque solaire, exprimée en unités r_s , (r_s = rayon solaire);
 s la distance du point C à la bande horizontale \overline{NN} , exprimée en unités r_s ;
 θ l'angle formé par la direction $S\overline{N}$ avec la verticale SY , compté positivement de C vers \overline{N} .

Nous admettrons avec C. W. Allen, [10], que la brillance $B(r)$ en un point M_r du disque solaire est donnée par la relation approchée (2.5):

$$B(r) = B(0) \left[0,36 + 0,84 \sqrt{1 - \frac{r^2}{r_s^2}} - 0,20 \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

$B(0)$ étant la brillance au centre du disque solaire; tout cela pour la totalité des radiations visibles, auxquelles les émulsions employées dans ce travail sont pratiquement sensibles.

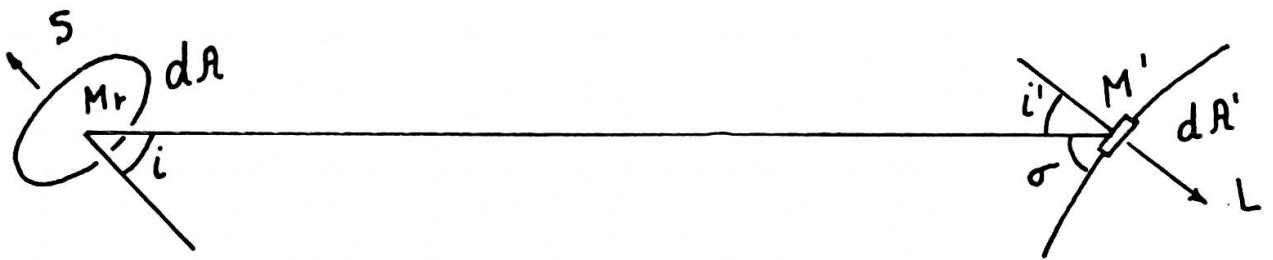


Fig. 4.

L'écart existant entre les valeurs de $B(r)$ calculées à l'aide de la relation (2.5) et les valeurs de $B(r)$ observées, n'excède pas 2% des valeurs observées.

Dans ces conditions nous pouvons calculer le flux $\phi(0)$ émis par la fraction \overline{NCN} considérée, du disque solaire:

$$\phi(\theta) = 2 \int_0^\theta B(r) dU \quad (2.6)$$

l'étendue élémentaire dU du faisceau lumineux porteur de ce flux étant définie par la relation (2.7):

$$dU = \frac{n^2 d\mathcal{A} \cdot d\mathcal{A}' \cdot \cos i \cdot \cos i'}{M_r M'^2} \quad (2.7)$$

Les éléments de la relation (2.7) sont à leur tour définis comme suit, sur la figure 4:

- n indice du vide;
 $d\mathcal{A}$ un élément d'aire du disque solaire apparent entourant le point M_r ;
 $d\mathcal{A}'$ un élément d'aire de la surface lunaire entourant le point M' ;

- \overline{LS} distance moyenne Lune-Soleil, exprimée en unités r_S ;
 i angle formé par la normale en M_r au disque solaire apparent, avec le rayon $M_r M'$;
 i' angle formé par la normale en M' à la surface lunaire avec le rayon $M_r M'$;
 σ la hauteur du centre du disque solaire au-dessus de l'horizon lunaire relatif au point M' ;

Compte tenu des approximations légitimes suivantes:

$$n \cong 1; i \cong 0; i' \cong \frac{\pi}{2} - \sigma; \overline{M_r M'} \cong \overline{LS}; \quad (2.8)$$

la formule (2.7) devient celle (2.9):

$$dU = \frac{d\mathcal{A}' \cdot \sin \sigma}{\overline{LS}^2} d\mathcal{A} \quad (2.9)$$

Prenons pour élément d'aire entourant le point M_r , (figure 6), l'élément de mesure $d\mathcal{A} = dx dy$, de la tranche horizontale NN du disque solaire, limité par deux segments verticaux infiniment voisins. Désignons par:

$$\left| \begin{array}{l} x = \rho r_S \text{ avec } 0 \leq \rho \leq 1 \\ y = r_S \cos \theta \end{array} \right. \quad (2.10)$$

les coordonnées du point M_r ,

Dans ces conditions, la brillance du disque solaire en un point M_r de la tranche \overline{NN} , sera donnée par l'expression (2.11):

$$B(\rho, \theta) = B(0) [0,36 + 0,84 \sqrt{\sin^2 \theta - \rho^2} - 0,20 (\sin^2 \theta - \rho^2)] \quad (2.11)$$

Le flux émis par l'élément d'aire $d\mathcal{A}$ vaudra:

$$d\mathcal{O}(\rho, \theta) = \frac{\sin \theta}{\overline{LS}^2} B(\rho, \theta) d\mathcal{A}' \cdot d\mathcal{A} \quad (2.12)$$

En tenant compte des relations (2.10), la valeur absolue du flux envoyé par la portion \overline{NCN} du disque solaire, aura pour mesure:

$$d\mathcal{O}(\rho, \theta) = C_1(\sigma) \cdot d\mathcal{A}' \cdot \int_0^\theta \sin \theta \cdot d\theta \cdot \int_0^{\sin \theta} [0,36 + 0,84 \sqrt{\sin^2 \theta - \rho^2} - 0,20 (\sin^2 \theta - \rho^2)] d\rho \quad (2.13)$$

avec

$$C_1(\sigma) = 2 \frac{\sin \sigma}{\overline{LS}^2} r_S^2 \cdot B(0)$$

Une première intégration conduit à l'expression (2.14):

$$d\varnothing(\theta) = C_1(\sigma) \cdot d\mathcal{A}' \int_0^\theta \left(0,36 \sin^2 \theta + 0,21 \pi \sin^3 \theta - \frac{0,4}{3} \sin^4 \theta \right) d\theta \quad (2.14)$$

Pour des raisons pratiques, il est préférable d'exprimer le flux $\varnothing(\theta)$ en fonction du paramètre s défini sur la figure 3.

Ayant:

$$\theta = \arccos(1-s) \quad (2.15)$$

On posera alors

$$d\varnothing(s) = C_1(\sigma) \cdot G(s) \cdot d\mathcal{A}' \quad (2.16)$$

où:

$$G(s) = 0,13 \arccos(1-s) - 0,096667(1-s) \sqrt{2s-s^2} - 0,033333(1-s)^3 \sqrt{2s-s^2} + 0,659733s^2 - 0,219911s^3 \quad (2.17)$$

La fonction $G(s)$ a été tabulée pour 33 valeurs de s comprises entre 0 et 2 avec un pas $\Delta s = \frac{1}{16}$, (voir tableau IV b).

Le calcul montre que $\frac{dG}{ds} = 0$ pour $s = 0$ et pour $s = 2$.

L'éclairement au point M' de la surface lunaire, dû à la lumière solaire directe, s'exprime finalement par:

$$E(s) = \frac{d\varnothing(s)}{d\mathcal{A}'} = C_1(\sigma) \cdot G(s) \quad (2.18)$$

$E(s)$ se mesure en lux lorsque $d\mathcal{A}'$ est indiqué en m^2 .

En réalité, en l'absence d'insolation directe, le point M' est doté d'un éclairement résiduel ξ , attribuable en grande partie à la diffusion par la Terre en direction de la Lune, d'une portion de la lumière émise par le Soleil; (clair de Terre sur la Lune).

L'éclairement total du point M' sera alors donné par la relation (2.21):

$$E_{\text{tot}} = E(s) + \xi \quad (2.19)$$

Si M'' est l'image sur la plaque photographique, du point M' considéré de la surface lunaire, la lumination \mathcal{L} du point M'' aura pour mesure:

$$\mathcal{L} = C_2 \cdot E_{\text{tot}} \cdot t \quad (2.20)$$

C_2 étant une constante qui dépend de l'albedo de la portion de surface lunaire en cause, de la distance Terre-Lune, de l'absorption atmosphérique et des caractéristiques optiques de l'instrument d'observation utilisé;

t , étant le temps de pose du cliché.

La densité optique \mathcal{D} du cliché au point M'' est alors donnée par la relation (2.21):

$$\mathcal{D} = \Gamma (\log \mathcal{L} - \log \mathcal{I}) \quad (2.21)$$

où Γ est le facteur de contraste de l'émulsion, \mathcal{I} son coefficient d'inertie selon Hurter et Driffield.

Si l'on travaille sur la partie rectiligne de la courbe sensitométrique de la plaque photographique, le profil photométrique de la zone de pénombre est reproduit fidèlement. Sur le graphique présenté dans la figure 5, on a reporté l'allure générale

TABLEAU IVb

$\Delta\sigma$	s	$G(s)$
16	0,0000	0,0000
15	0,0625	0,0076
14	0,1250	0,0238
13	0,1875	0,0464
12	0,2500	0,0745
11	0,3125	0,1073
10	0,3750	0,1441
9	0,4375	0,1845
8	0,5000	0,2281
7	0,5625	0,2743
6	0,6250	0,3230
5	0,6875	0,3735
4	0,7500	0,4257
3	0,8125	0,4792
2	0,8750	0,5336
1	0,9375	0,5887
0	1,0000	0,6440
— 1	1,0625	0,6993
— 2	1,1250	0,7544
— 3	1,1875	0,8088
— 4	1,2500	0,8623
— 5	1,3125	0,9145
— 6	1,3750	0,9650
— 7	1,4375	1,0137
— 8	1,5000	1,0599
— 9	1,5625	1,1035
— 10	1,6250	1,1440
— 11	1,6875	1,1807
— 12	1,7500	1,2136
— 13	1,8125	1,2416
— 14	1,8750	1,2642
— 15	1,9375	1,2804
— 16	2,0000	1,2881

de la courbe de la densité optique \mathcal{D} en fonction de la distance $\overline{A''M''}$ (A'' étant l'image sur la plaque photographique du point A de la formation lunaire, M'' étant celle de M').

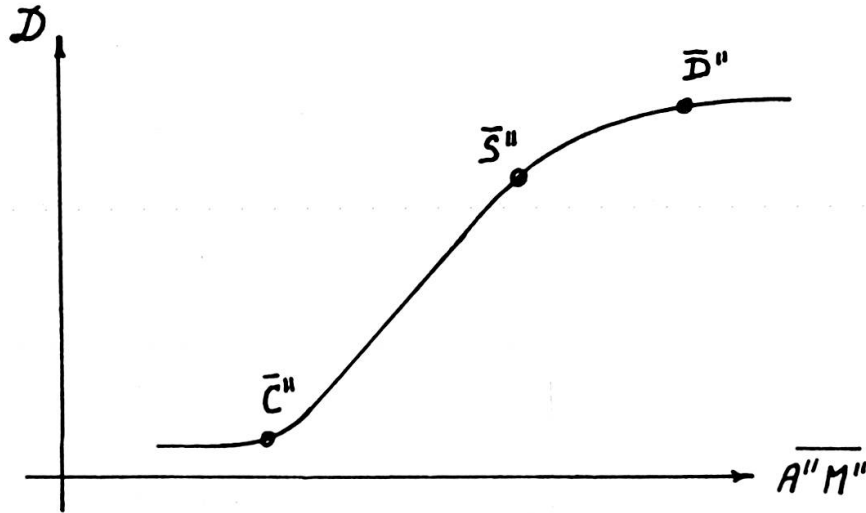


Fig. 5.

C'' , S'' , D'' étant les images photographiques respectives des points C' , S' , D' de la surface lunaire sur la courbe des densités \mathcal{D} , appelons \bar{C}'' , \bar{S}'' , \bar{D}'' les points représentatifs de la densité optique du cliché aux points C'' , S'' , D'' respectivement. La portion rectiligne horizontale de courbe située au voisinage gauche du point \bar{C}'' correspond à la zone d'ombre pure; la portion variable de courbe \bar{C}'' , \bar{S}'' , \bar{D}'' correspond à la zone de pénombre; la portion de courbe située au voisinage droite du point \bar{D}'' correspond à la zone de pleine lumière.

Théoriquement, les points \bar{C}'' et \bar{D}'' qui limitent « l'image photométrique » de la zone de pénombre à chacune de ses extrémités, sont accessibles directement sur le graphique, puisqu'il suffit de repérer le commencement de variation de densité optique au point \bar{C}'' et la fin de la variation de densité optique au point \bar{D}'' . Le point S'' n'est pas directement accessible, mais on peut le localiser de la façon suivante:

en effet, le calcul montre que la différence des densités optiques correspondant à deux valeurs s_1 et s_2 du paramètre s vaut:

$$\mathcal{D}_2 - \mathcal{D}_1 = \log \frac{C_1(\sigma) \cdot G(s_2) + \mathcal{E}}{C_1(\sigma) \cdot G(s_1) + \mathcal{E}} \quad (2.22)$$

La connaissance de C_1 , \mathcal{E} , Γ , s_1 , s_2 , \mathcal{D}_1 permet de calculer \mathcal{D}_2 et si l'on pose par exemple $s_1 = 0$ et $s_2 = 1$, on trouvera $\mathcal{D}(S'')$, d'où S'' .

Une possibilité de contrôle est fournie par les valeurs $s_1 = s_2 = 2$, ce qui permet de déterminer \bar{D}'' à partir de \bar{S}'' déterminé précédemment.

La connaissance de S'' fournit l'abscisse $\overline{A''S''}$ du point S'' . De la longueur $\overline{A''S''}$ on tire l'altitude du point A au-dessus du point S' .

La méthode ainsi décrite constitue, en quelque sorte, une méthode physique de détermination et de contrôle des altitudes relatives des aspérités de la surface lunaire. Nous tenons ce point pour particulièrement important.

Nous verrons plus loin que, dans l'état actuel de nos recherches, seul le repérage du point D'' est pratiquement accessible à nos investigations. Le repérage des points C'' et S'' pose des problèmes expérimentalement redoutables mais, à mon avis, non à priori insolubles.

6. *Une preuve expérimentale du rôle joué par la zone de pénombre*

La zone de pénombre n'étant pas suffisamment bien mise en évidence sur nos clichés de la Lune, nous avons réalisé des photographies d'ombres portées sur sol terrestre, par des objets opaques disposés en plein air à la lumière du Soleil. Il s'agit ici même de l'ombre portée par une planchette de bois, plane rectangulaire dont le grand côté supérieur horizontal se situait à une altitude de $1,297 \pm 0,001$ m au-dessus de la feuille de carton blanc, plan horizontal sur lequel se projetait l'ombre portée. La planchette était disposée perpendiculairement aux rayons solaires incidents. L'appareil photographique, fixé rigidement à environ 1,50 m du sol, avait un axe optique vertical.

Les conditions expérimentales étaient les suivantes:

Instant de pose des clichés: 6 novembre 1961 entre 11 h. 10 et 11 h. 15 (heure légale).

Ciel clair.

Température ambiante: 17°C .

Légère turbulence de l'air et de la zone de pénombre (observables à l'œil).

Hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon (mesurée avec un niveau à bulle):

$$\sigma = 25^\circ 20' \pm 2'$$

Emulsion utilisée: Kodak TRI-X, 200 ASA en film de 35 mm.

Appareil photographique: « Exa », objectif « Primotar » 2.8/50.

Dans le tableau IVc nous indiquons les conditions d'exposition:

TABLEAU IVc

Cliché	Ouverture de l'objectif	Temps de pose
N°		s
69 70	$f/5,6$	1/150
71 72	$f/8$	1/150
73 74	$f/11$	1/150
75 76	$f/16$	1/150
77 78	$f/22$	1/150

Révélateur: D 76 K.

Température du révélateur: 20° C.

Durée du développement: 15 minutes.

Dans le tableau IVd nous indiquons les mesures de longueur de pénombre effectuées sur les clichés 69 à 78 (mesures effectuées avec le microdensitomètre Joyce).

TABLEAU IVd

Cliché	Longueur sur cliché	Longueur au sol
N°	mm \pm 0,2	mm \pm 2
69	5,45	62,6
70	5,35	61,4
71	5,75	66,0
72	5,75	66,0
73	5,75	66,0
74	5,70	65,4
75	5,70	65,4
76	5,75	66,0
77	5,40	62,0
78	5,40	62,0

Dans la troisième colonne de ce tableau se trouvent consignées les différentes valeurs de la longueur de la pénombre au sol, c'est-à-dire à l'échelle 1/1, déduites de la longueur sur chaque cliché.

Or le calcul théorique conduit à la valeur 66 ± 1 mm pour la longueur de cette pénombre; la comparaison des valeurs expérimentales avec la valeur théorique de la pénombre montre que les clichés 71 à 76 ont été convenablement exposés. Les clichés 69 et 70 surexposés, ainsi que les clichés 77 et 78 sous-exposés, font croire à une longueur de pénombre trop petite. Cela peut s'expliquer de la façon suivante:

Représentons, sur la figure 9, une zone de pénombre au sol, limitée schématiquement par deux lignes parallèles indéfinies v et w :

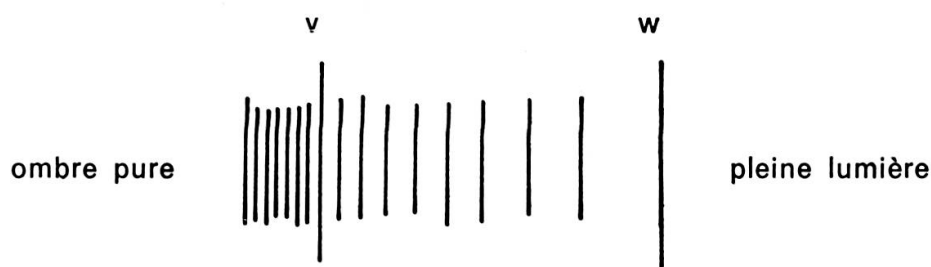


Fig. 6.

En cas de sous-exposition, une partie de la zone de pénombre voisine de la ligne idéale v se trouve amputée sur le cliché, tandis que la partie de la zone de pénombre voisine de la ligne idéale w demeure intacte.

En cas de surexposition, ce sera une partie de la zone de pénombre voisine de la ligne idéale w , qui sera amputée sur le cliché, tandis que la partie de la zone de pénombre voisine de la ligne v demeurera intacte.

Nous constatons donc que la mesure de l'étendue d'une zone de pénombre est une chose possible sur des clichés correctement exposés et sur lesquels les effets de turbulence atmosphérique sont très réduits. C'est le cas des clichés 71 à 76.

Notons en passant que les inconvénients relatifs aux procédés d'agrandissement doivent se retrouver ici. Prenons, par exemple, comme témoins les agrandissements n^{os} 77A1, 77A2, 77A3, 77A4 du seul et même cliché n^o 77 (voir figure 7). Citons les conditions d'agrandissement de ce cliché:

Type d'agrandisseur:	« Varioscop 60 » Agfa
Ouverture:	f/22
Emulsion:	papier Telko BV1
Temps de pose successifs en secondes:	5, 10, 15, 20
Révéléateur:	MH1
Température du révélateur:	18° C
Durée du développement:	5 minutes.

Le déplacement de la zone de pénombre, « vue » par le papier sensible, est bien visible sur le document présenté sur la figure 7.

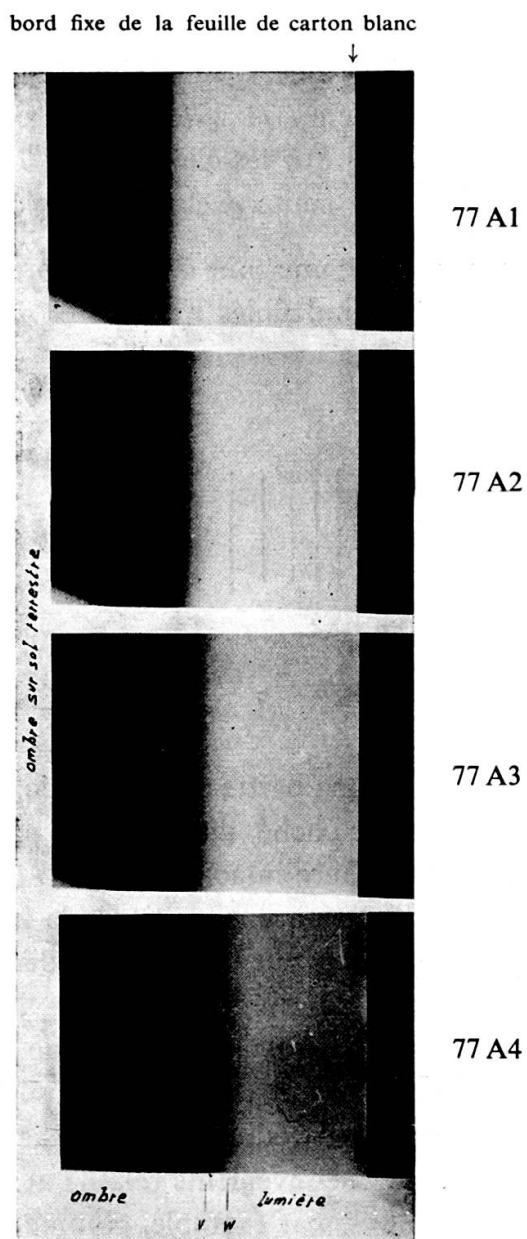


Fig. 7.

Envahissement progressif de la zone de pénombre par la lumière.

7. Comparaison directe d'un profil photométrique expérimental de zone de pénombre avec son profil photométrique théorique

Avant de passer à la mesure des clichés proprement dite, nous allons confronter la théorie avec l'expérience.

Pour un instant, appliquons à la Terre les notions relatives à la Lune. Dans la formule (2.22) prenons $s_1 = 0$ et $s_2 = s$; il vient:

$$\mathcal{D} - \mathcal{D}_1 = \log \left[1 + \frac{C_1(\sigma)}{\mathcal{E}} G(s) \right] \quad (2.23)$$

Sur le cliché, \mathcal{D}_1 représente alors la densité optique relative à l'ombre pure, \mathcal{D} la densité optique variable du point courant M'' de la zone de pénombre. Reportons sur un graphique la différence des densités optiques $\mathcal{D} - \mathcal{D}_1$ calculées selon la formule (2.23), en fonction de la distance $\overline{C''M''}$ mesurée à un facteur constant près sur le cliché n° 73, par exemple.

Calculons la constante $C_1(\sigma)$ en prenant:

$$\left| \begin{array}{l} \overline{TS} = 1,495 \cdot 10'' m \\ r_s = 6,960 \cdot 10^8 m \\ B(0) = 2,62 \cdot 10^9 \frac{cd}{m^2} \\ \sigma = 25^\circ 20' \end{array} \right. \quad (2.24)$$

On obtient:

$$C_1 = 4,858 \cdot 10^4 \quad (2.25)$$

L'éclairement résiduel \mathcal{E} de la zone d'ombre pure, dû cette fois-ci à la lumière de notre jour, a été estimé avec le luxmètre Gossen n° 610 du Laboratoire de physique technique de l'EPUL qui « indiquait »:

$$\mathcal{E} = 5000 \pm 50 \text{ lux} \quad (2.26)$$

L'éclairement maximum indiqué sur le cadran de cet instrument étant 3000 lux, on a effectué la mesure de \mathcal{E} en masquant la moitié du filtre circulaire recouvrant la cellule réceptrice de dimensions étendues, avec un cache opaque; puis on a doublé l'indication. Nous avons toléré cette façon de faire après plusieurs essais convenables concluants.

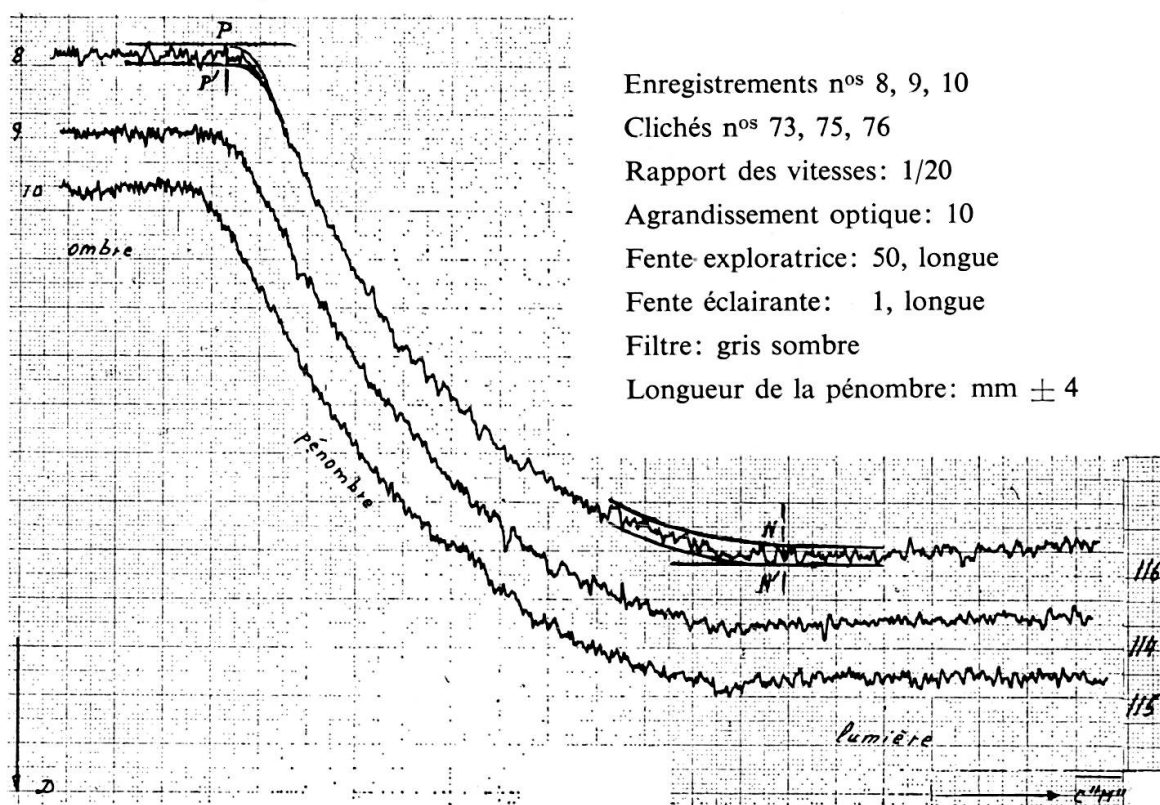
D'où la valeur du rapport:

$$\frac{C_1}{\mathcal{E}} = 9,72 \pm 0,1 \quad (2.27)$$

La troisième colonne du tableau IVe indique, à la constante Γ près, les valeurs ainsi calculées de la différence $\mathcal{D} - \mathcal{D}_1$ pour diverses valeurs du paramètre s .

TABLEAU IVe

s	$1 + \frac{C_1}{\varepsilon} G(s)$	$\log \left[1 + \frac{C_1}{\varepsilon} G(s) \right]$	$\frac{C_3 \log \left[1 + \frac{C_1}{\varepsilon} G(s) \right]}{\text{mm} \pm 0,5}$
0,000	1,00	0,000	0,0
0,125	1,23	0,090	8,1
0,250	1,72	0,235	21,2
0,375	2,40	0,380	34,2
0,500	3,22	0,508	45,7
0,750	5,14	0,711	64,0
1,000	7,30	0,863	77,7
1,250	9,38	0,972	87,5
1,500	11,30	1,053	94,8
1,750	12,80	1,107	99,6
2,000	13,50	1,130	102,0



Microdensitomètre Joyce

17 janvier 1962

Fig. 8.

La courbe des densités optiques $\mathcal{D}(C''M'')$ est comprise entre deux courbes limites régulières, dont les deux branches extrêmes sont rectilignes horizontales. Les points de raccord P , N , respectivement P' , N' , des branches rectilignes avec la branche variable sur chaque courbe limite régulière déterminent les extrémités de la zone de pénombre sur le graphique.

Dans la quatrième colonne du tableau IVe apparaît une constante C_3 dont le seul but est de permettre la comparaison directe entre la courbe d'enregistrement du profil photométrique n° 8 de la zone de pénombre figurant sur le cliché n° 73 (courbe fournie par le microdensitomètre Joyce, voir figure 8) et la courbe théorique. En effet, appelons

$$\overline{\mathcal{D}} - \overline{\mathcal{D}}_1 = C_3 \log \left[1 + \frac{C_1}{\mathcal{E}} G(s) \right]$$

les valeurs de $\overline{\mathcal{D}} - \overline{\mathcal{D}}_1$ ainsi modifiées. La comparaison de la variation totale de $\log \left[1 + \frac{1}{\mathcal{E}} G(s) \right]$ avec la variation totale, mesurée en millimètres, de la courbe expérimentale n° 8 conduit à la valeur $C_3 = 90$ mm.

D'où la courbe théorique des valeurs $\overline{\mathcal{D}} - \overline{\mathcal{D}}_1$, en fonction des distances $\overline{C''M''}$ reproduites à un facteur constant près sur les enregistrements photométriques. Dans ce cas précis, le calcul a montré que les longueurs $\overline{C''M''}$ sont pratiquement proportionnelles aux valeurs du paramètre s .

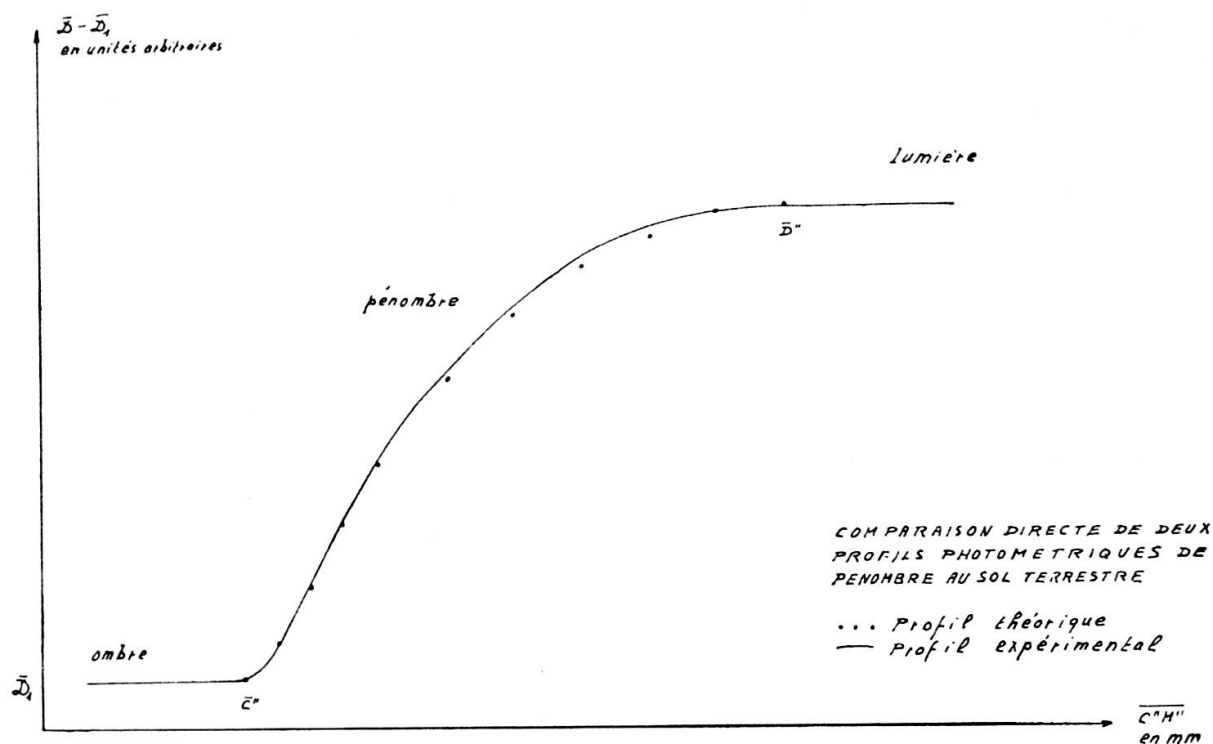


Fig. 9.

La comparaison directe des deux dernières courbes illustrées par la figure 9, montre que l'accord entre la théorie et l'expérience est satisfaisant.

Le caractère remarquable de cet accord nous a surpris et nous oblige à souligner l'importance capitale de ce septième paragraphe du chapitre II.

Avant de clore ce chapitre II, il nous faut encore préciser et justifier aux points de vues stricts de la théorie et de la technique photographique, la manière dont ont été conduites les mesures. C'est ce que nous allons faire dans le paragraphe 8.

8. *Aspect strictement photographique du problème*

La commodité manifeste de l'usage de la plaque photographique se double d'une vaste complexité de la réaction de celle-ci lors de son exposition à la lumière et lors de son traitement ultérieur. Le grand nombre de facteurs qui interagissent dans la formation de ce qu'on appelle « image photographique » ne permet de se tirer d'affaire que par le biais de l'approximation et si, d'une part, les analyses du processus photographique à l'aide de l'atomistique depuis les travaux de Guernsey et Mott [11] ont fait bon chemin, d'autre part les problèmes de normalisation des propriétés des émulsions et du traitement de ces émulsions sont loin d'être résolus pour les chercheurs à l'heure actuelle, ainsi que le montrent Wilmet et Belliot [12].

Les aspects importants de cette question peuvent se résumer dans les trois points suivants :

- A) Problème de la reproductibilité des propriétés photographiques des émulsions;
- B) Définition du complexe « sensibilité » d'une émulsion photographique;
- C) Etendue du domaine des luminations utilisables.

Les émulsions ont été utilisées pratiquement dès leur réception.

Les propriétés sensitométriques d'une émulsion étant principalement fonction :
de la composition spectrale du faisceau lumineux tombant sur la plaque,
de la nature du révélateur utilisé,
de la durée du développement;

il faudrait pour décrire ces propriétés dans une large mesure, connaître le faisceau des courbes caractéristiques.

Une description aussi complète, quoique souhaitable, n'est heureusement pas toujours indispensable.

Chromatisme. — L'étude de la courbe de sensibilité pour diverses longueurs d'ondes montre que toutes choses étant égales par ailleurs, ces courbes peuvent se déduire les unes les autres, en première approximation, par une simple translation parallèle à l'axe des luminations comme l'indique E. H. W. Selwyn [13].

Type de révélateur. — L'allure générale des courbes caractéristiques dépend du type de révélateur employé, un révélateur « dur » ayant tendance à augmenter la valeur moyenne de la pente quasi rectiligne de la caractéristique.

Notre cas.

Dans notre cas il eût fallu déterminer les courbes sensitométriques en bordure de chaque cliché *pendant la prise de vue* au télescope. Cela serait indispensable si l'on voulait exploiter la méthode de contrôle physique des altitudes lunaires évoquées à la fin du paragraphe 5 du chapitre II. Pourtant cela n'a pas été fait pour les raisons qui suivent :

D'abord parce que cela nécessitait un important montage, que nous ne pouvions réaliser financièrement ;

ensuite parce que notre travail visant l'application pratique de la notion de longueur d'ombre augmentée de celle de la pénombre, à la détermination des altitudes lunaires, il nous suffisait de déceler simplement sur le cliché :

- a) le commencement de variation de la densité photographique dans une région de passage de la zone de pleine lumière à la zone d'ombre pure ;
- b) la fin de cette variation dans une région de passage de la zone de pénombre à la zone de pleine lumière.

Or ceci ne suppose que la constance des propriétés sensitométriques sur la plaque utilisée, ce qui constitue un gros avantage.

Choix de la portion de caractéristique pour effectuer les mesures.

Limités étroitement dans le choix des temps de pose par le faible éclaircissement de la plaque photographique, d'une part (environ 0,1 lux), et par la turbulence atmosphérique, d'autre part, nous ne pouvions guère descendre au-dessous de la demi-seconde, guère dépasser la seconde. Ceci excluait tout simplement l'emploi de filtres colorés, exigeait l'emploi d'une émulsion aussi rapide que possible.

En conséquence nous avons choisi l'émulsion Kodak Tri-X panchromatique sensible aux radiations solaires de longueur d'onde s'étendant de $0,40 \mu$ à $0,64 \mu$.

Cette émulsion présente l'inconvénient d'être peu contrastée. Raison pour laquelle nous avons utilisé un révélateur dur. Mais elle présente l'avantage de posséder des courbes caractéristiques dont la courbure varie régulièrement dans la région de faible densité photographique, ce qui est favorable aux études photométriques.

Clichés concernant la surface lunaire.

Toutes nos mesures photométriques relatives aux formations lunaires étudiées se situent dans la région de sous-exposition. Nous tenons cela pour fort heureux, car cette région est en réalité à tous les points de vues et contrairement à l'opinion la plus répandue, la région la plus favorable pour la photométrie photographique,

ainsi que le signalent G. de Vaucouleurs et H. Faraggi [14]. En particulier dans cette région ($0,2 < \mathcal{D} < 1$):

les fluctuations dues à la granulation,
l'effet Eberhard,
l'effet d'irradiation,
l'effet Schwarzschild-Villinger

sont faibles.

Montrons sur les figures 10 et 11 respectivement, la courbe de sensibilité spectrale relative et deux courbes sensitométriques, pour la production moyenne et le traitement moyen de l'émulsion Kodak Tri-X en feuilles, exposés à la lumière du Soleil, selon le catalogue Kodak [15] valable pour l'année 1957:

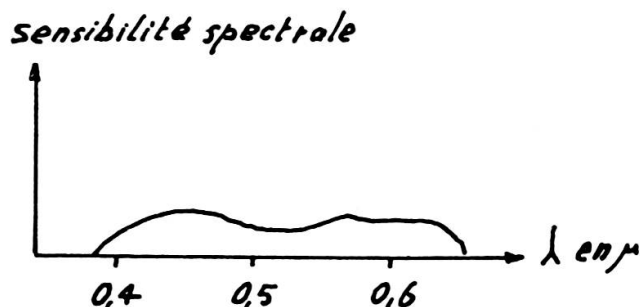


Fig. 10.

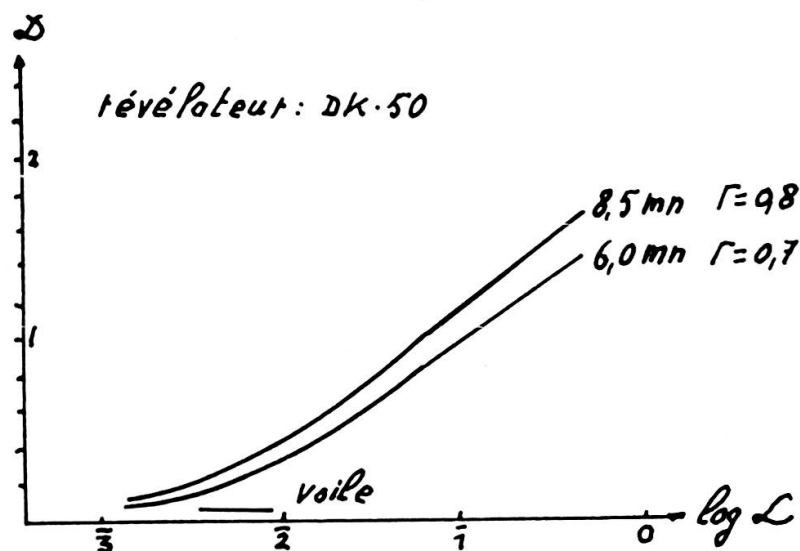


Fig. 11.

Les densités des zones d'ombre se situaient régulièrement à 0,1 unité de densité au moins au-dessus de la densité du voile de fond.

Clichés concernant les ombres au sol terrestre.

Ainsi que nous l'avons signalé au paragraphe 5 du chapitre II, fig. 5, ces mesures mettent à contribution la partie quasi rectiligne de la caractéristique de l'émulsion. Les figures 12 et 13 mettent en évidence les propriétés de l'émulsion Kodak Tri-X en film, telles qu'elles sont décrites, pour la lumière solaire, par le catalogue Kodak [16]:



Fig. 12.

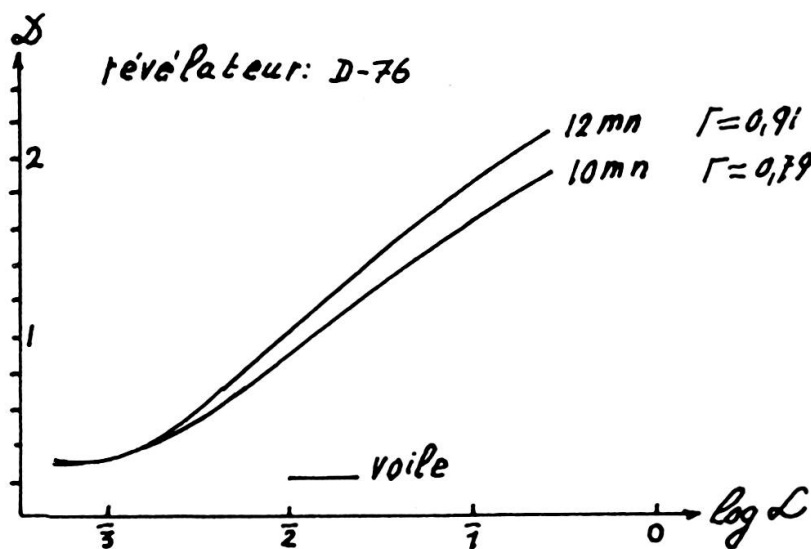


Fig. 13.

Nos conditions d'utilisation et de traitement de cette émulsion étaient identiques à celles prescrites dans le catalogue Kodak. Les densités photographiques sur ces clichés étaient comprises entre 0,5 et 1,3 unités au-dessus de celle du voile photographique.

Type de densité mesuré.

Les densités \mathcal{D} indiquées sont en fait des densités \mathcal{D}_x mesurées par le micro-densitomètre en lumière dirigée. Elles correspondent aux conditions usuelles du tirage

par projection et sont intermédiaires entre les densités \mathcal{D}_{11} en lumière parallèle et les densités \mathcal{D}_H en lumière diffuse. Pour ne pas trop charger l'écriture, nous nous sommes permis de remplacer \mathcal{D}_x par \mathcal{D} .

Influence du défaut de réciprocité.

En 1933 Webb a montré que les erreurs de réciprocité sont indépendantes de la longueur d'onde. Ce qui simplifie déjà le problème.

Au paragraphe 5 de ce même chapitre II, nous avons traité le problème relatif à la variation de la densité photographique dans la zone de pénombre comme si la loi de Bunsen et Roscoe était rigoureusement valable, cela en posant dans la formule (2.22):

$$\mathcal{L} = C_2 E_{\text{tot}} \cdot t$$

En fait, il faudrait remplacer le produit $E \cdot t$ par $E_{\text{tot}} \cdot t^a$ où a est un exposant voisin de 1 qu'il faut déterminer expérimentalement [17], ainsi que l'a proposé Schwarzschild. Comme la formule (2.29) est indépendante du temps, nous avons agi comme si la loi de réciprocité était valable.

Au cas où la formule de Schwarzschild ne suffirait pas, il serait bon d'employer la formule plus générale de Kron:

$$\frac{Et}{E_0 t_0} = \frac{1}{a + b} \left[a \left(\frac{E}{E_0} \right)^b + b \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-a} \right] \quad (2.31)$$

où E_0 est l'éclairement qui correspond à la plus petite lumination $E_0 t_0$ susceptible de produire une densité donnée et a, b deux constantes empiriques.

CHAPITRE III

MESURE DES CLICHÉS ORIGINAUX

1. Mesures effectuées à l'aide du niveau de précision Wild

Il s'agissait de viser, avec l'appareil, successivement les points origine et extrémité de l'ombre portée. Le contraste de l'image du cliché vu à travers l'instrument était suffisant pour que l'œil parvienne à localiser nettement les extrémités de la zone d'ombre portée (cela du moins en apparence). Cependant ce même œil n'étant pas capable de séparer les points C'' , S'' , D'' , nous admettrons en première approximation (qui peut être grossière), qu'il vise le point S'' . De toute manière, chaque œil voit l'extrémité de l'ombre portée à sa façon. Façon qui est susceptible de varier avec

l'état de fatigue de l'observateur. Pour cette raison, nous avons désigné par $l'_t = \overline{A''S''}$ les longueurs d'ombres mesurées ainsi (voir tableau VIII, 4^e colonne).

A titre d'exemple, nous extrayons de notre cahier de mesures un passage contenant des valeurs relatives au cliché n° 25:

i	Abscisse de A'' mm	Abscisse de S'' mm	Longueur $(l'_t)_i$
1	4,16	6,23	2,07
2	3,92	6,07	2,15
3	4,12	6,22	2,10
4	4,04	6,01	1,97
5	4,18	6,21	2,03
6	3,92	5,90	1,98
7	4,12	6,25	2,13
8	3,97	6,03	2,06
9	4,13	6,22	2,09
10	3,98	6,03	2,05
			$\Sigma = 20,63$

Valeur adoptée:

$$l'_t = \frac{\sum (l'_t)_i}{10} = 2,06$$

Erreur absolue estimée à:

$$\pm 0,04 \text{ mm}$$

L'ensemble des mesures effectuées avec cet appareil a montré que la précision que l'on peut atteindre est de l'ordre de 2%.

2. Mesures effectuées avec le microdensitomètre enregistreur Joyce

Le centrage et l'orientation du cliché à mesurer peuvent se faire avec une grande précision.

Toutes les mesures ont été faites avec le coin densitométrique portant le n° 3242 et avec un objectif qui projetait sur l'écran de contrôle une image du cliché agrandie environ vingt fois (en effet, des conditions géométriques de formation de l'image du cliché conduisent à multiplier par deux le facteur « agrandissement optique » fourni par l'objectif, appelé ainsi et indiqué dans la notice relative à l'appareil).

Sur chacun des enregistrements se trouvent indiqués, en outre:

le rapport des vitesses d'entraînement de la platine porte-objet et de la table d'enregistrement;

en millimètres, la largeur de l'image sur l'écran de contrôle, de la fente éclairante;
 en centièmes de millimètres, la largeur de la fente exploratrice;
 le type de filtre utilisé;
 en millimètres et mesurés sur l'enregistrement, la longueur n' de l'ombre portée
 augmentée de la pénombre.

Sur les enregistrements, l'axe des densités est vertical, dirigé de haut en bas;
 l'axe des abscisses des points \bar{M}'' est horizontal, dirigé de gauche à droite.

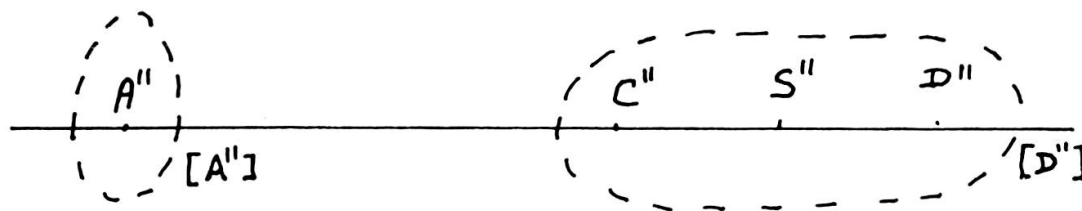


Fig. 14.

La plupart des clichés ont été analysés ainsi avec des fentes exploratrices de largeur effective comprises entre 0,010 et 0,025 mm. Les courbes de densité optique présentent un « bruit de fond » dû au fait que la largeur effective de la fente exploratrice est de l'ordre de grandeur des dimensions moyennes des associations denses de grains de la plaque photographique. Ce « bruit de fond » est d'autant plus marqué que les dimensions effectives de la fente exploratrice sont plus petites. Ce bruit de fond n'a jamais rendu impossible le repérage des points \bar{A}'' et \bar{D}'' qui marquent respectivement le début de la constance de la densité optique du cliché caractérisant l'ombre pure le long du tracé $A'' D''$, et la fin de la variation de la densité optique du cliché caractérisant la zone de pénombre le long du même tracé $A'' D''$. Il a été possible d'effectuer des enregistrements densitométriques avec des fentes étroites et courtes affectant pratiquement la forme d'un carré de 0,01 mm de côté. Plus d'une centaine d'enregistrements ont été réalisés, en variant les conditions dans lesquelles l'appareil peut fonctionner. Tous conduisent à des résultats concordants. Il a chaque fois été possible de repérer les abscisses des points \bar{A}'' et \bar{D}'' avec une incertitude de l'ordre de 2 mm sur les enregistrements, ce qui conduit à une erreur absolue de 4 mm sur la différence des abscisses du tracé $A'' D''$ sur le cliché. Cela est malheureusement impossible sur nos clichés. En effet, la zone de pénombre comme la zone de transition lumière-ombre entourant le point A'' sont étalées sur le cliché en raison de la turbulence atmosphérique.

Sur la figure 14, schématisons ces étalements par des courbes frontières fermées (en pointillé) représentant les limites d'étalement maximum.

Le point \bar{C}'' de l'enregistrement, figuratif du point C'' du cliché, est mal défini. Nous avons renoncé à le localiser.

En fait, les seuls points repérables avec sûreté sont les points $[A'']$ et $[D'']$ situés à la fois sur le tracé $A'' C'' S'' D''$ et sur les frontières en pointillé comme l'indique la figure 14. Nous avons implicitement supposé que :

$$\overline{[A'']} \overline{[D'']} = \overline{A'' D''} \quad (3.1)$$

Toute la partie expérimentale de ce travail repose sur cette fragile hypothèse. Néanmoins la comparaison directe des profils densitométriques théoriques et expérimentaux effectuée à la fin du chapitre II d'une part, et, d'autre part, la confrontation de nos déterminations d'altitudes lunaires relatives avec les valeurs récentes des atlas lunaires, semblent justifier une telle hypothèse.

Pour ne pas compliquer la notation, nous avons traité le problème comme si nous avions les identités :

$$\left| \begin{array}{l} A'' \equiv [A''] \\ D'' \equiv [D''] \end{array} \right. \quad (3.2)$$

3. Comparaison des mesures

Le tableau VIII permet la comparaison des mesures relatives aux clichés n^{os} 24, 25, 27, 31, 34. Nous constatons que les mesures effectuées avec le niveau de précision Wild sont en moyenne supérieures de 0,03 mm aux mesures effectuées avec le microdensitomètre Joyce. Nous voyons apparaître ici une différence systématique entre les appréciations subjectives de l'œil et les déterminations objectives d'un appareil de mesure approprié. Nous pensons qu'il convient d'attribuer une plus grande valeur aux mesures effectuées avec un microdensitomètre.

4. Influence des conditions de réalisation (voir chapitre II, 1) des clichés originaux sur la mesure de la longueur de l'ombre portée

Les valeurs des longueurs d'ombre + pénombre relatives aux clichés n^{os} 43, 44, 45 (voir tableau VIII, 5^e colonne, deux dernières lignes) montrent :

- 1^o qu'une faible variation de la durée de développement n'influence pas les mesures de façon décelable;
- 2^o qu'un temps de pose prolongé (2 secondes dans notre cas) a pour effet de faire croire à des longueurs d'ombres portées augmentées de la pénombre, légèrement trop petites. La diminution observée dans le cas du cliché n^o 45 est de l'ordre de 4%. Cela peut s'expliquer par l'envahissement, sur le cliché, de la zone de pénombre, voir d'ombre, par une lumination parasite attribuable à l'agitation atmosphérique.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS

1. *Calcul de quelques altitudes relatives de formations lunaires*

La suite des calculs numériques, nécessaires à la détermination des altitudes relatives des aspérités de la surface lunaire, est longue. Dans l'introduction d'une thèse [19], présentée à Paris en 1954, on peut lire ceci: « Le calcul des coordonnées sélénographiques est assez laborieux pour rebuter la plupart des astronomes. »

Pour donner une idée, résumons brièvement les étapes du calcul fournissant les distances apparentes, en unités r_L , des couples de formations lunaires choisies, distances nécessaires à la détermination du diamètre des images photographiques du disque lunaire:

A partir des coordonnées sélénographiques (ξ, η) des formations lunaires, avec:

$$\zeta = \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2} \quad (4.0)$$

calculer leurs coordonnées rectangulaires selon la formule (1.16), puis vérifier la relation (1.17) de la même page à 10^{-9} près. Ensuite calculer leurs coordonnées standard selon la formule (1.18).

Cela pour 31 formations lunaires réparties sur 10 clichés.

Ensuite il s'agissait de calculer à l'aide d'un autre programme 60 valeurs $\overline{B_i B_j}$ selon la formule (1.19).

Aussi, pour ne pas décourager le lecteur, nous nous bornerons à reproduire quelques résultats intermédiaires, extraits de notre cahier de calculs, illustrant ainsi les passages essentiels de la méthode utilisée et décrite au chapitre I. La majeure partie de ces calculs a été exécutée par la calculatrice électronique Zébra de l'Institut de Mathématiques appliquées de l'Université de Lausanne. Ceci pour notre soulagement.

Rappelons les données relatives à la position de l'Observatoire universitaire de Lausanne:

Latitude nord:	46° 32' 00,7''	
Longitude est:	6° 37' 27,0''	sur ellipsoïde de Hayford
Altitude:	595,45 m	
Latitude géocentrique:	46° 20' 26''.	

Le tableau V indique les valeurs des librations totales topocentriques l et b , ainsi que la valeur du sinus de l'angle de phase \emptyset de la Lune.

La détermination du diamètre d' de l'image du disque lunaire apparent présente quelque difficulté. En effet, par suite de la grande focale utilisée, le champ visible

TABLEAU V

Cliché	l	b	$\sin \varnothing$
N°	Radians	Radians	
8	— 0,134 22	0,047 74	0,998 383
9	— 0,135 48	0,048 08	0,998 204
24	— 0,076 04	0,106 62	0,861 321
25	— 0,086 10	0,106 93	0,864 995
27	— 0,104 92	0,107 47	0,871 697
31	— 0,141 21	0,109 34	0,883 748
34	— 0,165 16	0,110 92	0,890 979
43	— 0,112 67	0,092 51	0,972 733
44	— 0,113 18	0,092 52	0,972 574
45	— 0,113 69	0,092 54	0,972 435

sur les clichés ne représente que la centième partie environ de la surface de l'image du disque lunaire entier. Il fallait donc repérer le plus grand nombre possible de formations lunaires aptes à permettre la détermination désirée avec une précision honorable.

Le tableau VI indique :

Colonne 1: Les noms de 25 formations caractéristiques, facilement repérables sur les clichés, et destinées à la détermination de d' . Au bas de cette colonne, les noms de 6 formations dont on déterminera la hauteur relative.

Colonnes 2 et 3: Les coordonnées sélénocentriques ξ et η des formations en question. Ces coordonnées sont tirées de l'atlas lunaire de Wilkins [20].

Colonne 4: Le numéro des cartes de l'atlas de Wilkins sur lesquelles se trouvent les formations citées.

Colonne 5: Le numéro des clichés sur lesquels on observe ces formations.

Le nombre des distances mutuelles de formations lunaires qu'il a été possible de mesurer, à la règle graduée, avec une incertitude absolue de $\pm 0,5$ mm est de:

- 9 pour chacun des clichés n°s 8 et 9;
- 6 pour le cliché n° 24;
- 5 pour chacun des clichés n°s 25 et 27;
- 5 pour le cliché n° 31;
- 6 pour le cliché n° 34;
- 6 pour chacun des clichés n°s 43, 44, 45.

Citons un extrait de notre cahier de mesures dans le tableau VII.

Or, l'examen des moyennes arithmétiques d'_j des valeurs de d' relatives à chacun des clichés, montre que l'on a pratiquement:

$$\left| \begin{array}{l} d'_8 = d'_9 \\ d'_{24} = d'_{25} = d'_{27} = d'_{31} = d'_{34} \\ d'_{43} = d'_{44} = d'_{45} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

l'indice (j) étant ici le numéro du cliché considéré.

TABLEAU VI

Formation	ζ	η	Carte n°	Clichés n°s	
A	0,142	— 0,131	I	8, 9	
Lyot	— 0,014	— 0,148	I	8, 9	
Birt	— 0,137	— 0,380	VIII	8, 9	
Thebit	— 0,078	— 0,360	VIII	8, 9	
Purbach, A . .	— 0,033	— 0,436	VIII	8, 9	
Apianus	0,139	— 0,458	VIII	8, 9	
Fontenelle . . .	— 0,135	0,900	XV	24	43, 44, 45
Bianchini	— 0,383	0,746	XVI	24, 25, 27	43, 44, 45
Cap Heraclides .	— 0,418	0,656	XVI	24, 25, 27	43, 44, 45
Caroline Hershel	— 0,427	0,566	V	24	31, 34
Carlini	— 0,339	0,555	V	24	31
Helicon	— 0,298	0,648	XVI	24, 25, 27	43, 44, 45
De Bergerac . .	— 0,231	0,544	V	24	31
S	— 0,136	0,955	XVI	25, 27	
Cap Laplace . .	— 0,300	0,725	XVI	25, 27	43, 44, 45
A	— 0,324	0,694	XVI	25, 27	43, 44, 45
Leverrier	— 0,268	0,647	XVI	25, 27	43, 44, 45
A	— 0,140	0,800	XV		31, 34
Delisle	— 0,492	0,500	V		31
Heis	— 0,446	0,536	V		31, 34
D	— 0,443	0,512	V		34
Porthouse	— 0,307	0,505	V		31
La Hire	— 0,379	0,463	V		34
Lambert	— 0,322	0,435	V		34
Timocharis . . .	— 0,202	0,448	V		34
Werner	0,060	— 0,470	VIII	8, 9	
Purbach	— 0,012	— 0,430	VIII	8, 9	
Mur droit	— 0,130	— 0,360	VIII	8, 9	
Arzachel	— 0,035	— 0,316	VIII	8, 9	
Petit pic	— 0,205	0,755	XV		43, 44, 45
Grand pic	— 0,165	0,755	XV		43, 44, 45

TABLEAU VII

Clichés	Segment		Distance
N ^{os}	Origine	Extrémité	mm
34	A (XV)	Caroline Hershel	64,5
34	A (XV)	Heis	70,8
34	A (XV)	D (V)	71,2
34	A (XV)	La Hire	74,0
34	A (XV)	Lambert	75,5
34	A (XV)	Timocharis	68,0
43, 44, 45	Fontenelle	Bianchini	50,5
43, 44, 45	Fontenelle	Cap Heraclides	67,0
43, 44, 45	Fontenelle	Cap Laplace	43,4
43, 44, 45	Fontenelle	A (XVI)	50,0
43, 44, 45	Fontenelle	Helicon	54,0
43, 44, 45	Fontenelle	Leverrier	52,2

TABLEAU VIIbis

Clichés	Diamètre d'
N ^{os}	mm
8, 9	349
24, 25, 27, 31, 34	353
43, 44, 45	356

Les égalités (5.1) nous autorisent à considérer d' comme résultant de la moyenne arithmétique de :

- 18 mesures pour l'ensemble des clichés n^{os} 8 et 9;
- 27 mesures pour l'ensemble des clichés n^{os} 24, 25, 27, 31, 34;
- 18 mesures pour l'ensemble des clichés n^{os} 43, 44, 45.

D'où la possibilité de fournir une valeur du diamètre d' de l'image du disque lunaire, avec une incertitude relative réduite à 0,3 %. Les valeurs admises pour d' sont indiquées dans le tableau VIIbis.

Le tableau VIII renferme, enfin, les résultats finaux.

TABLEAU VIII

Cli- ché	Lune	Formation	l'_t ?	n'	$\sin \sigma$	$\sin (\sigma - s_S)$	$h (l'_t, \sigma)$	$h (n', \sigma - s_S)$
N°			mm	mm			m	m
8	Croissante	Arzachel		1,16	0,141 17	0,136 53		1510
8	»	Werner		2,60	0,190 97	0,186 33		4550
8	»	Purbach		1,76	0,154 19	0,149 82		2500
8	»	Mur droit		1,04	0,041 68	0,036 38		340
9	»	Arzachel		1,12	0,145 26	0,140 57		1510
9	»	Werner		2,54	0,194 72	0,190 10		4550
9	»	Purbach		1,72	0,158 06	0,153 42		2500
9	»	Mur droit		0,98	0,045 74	0,041 05		300
24	»	Cap Laplace	2,11	2,06	0,129 38	0,124 71	2906	2726
25	»	» »	2,06	2,02	0,131 42	0,126 73	2876	2712
27	»	» »	1,98	1,92	0,135 30	0,130 63	2835	2648
31	»	» »	1,88	1,82	0,143 42	0,138 74	2829	2650
34	»	» »	1,79	1,74	0,149 38	0,144 74	2800	2630
43	Décroissante	Petit pic		2,04	0,110 70	0,106 07		2025
43	»	Grand pic		3,06	0,069 56	0,064 92		1702
44	»	Petit pic		2,04	0,110 59	0,105 98		2023
44	»	Grand pic		3,06	0,069 44	0,064 82		1702
45	»	Petit pic		1,96	0,110 48	0,105 83		1947
45	»	Grand pic		2,96	0,069 33	0,064 68		1648

En particulier dans la colonne 8, on indique les hauteurs du cap Laplace basées sur les mesures effectuées avec le niveau de précision Wild; dans la colonne 9 figurent les hauteurs des formations citées dans la colonne 3, basées sur les mesures effectuées avec le microdensitomètre enregistreur Joyce.

La calcul montre que l'incertitude moyenne sur une détermination d'altitude lunaire relative, basée sur les mesures effectuées avec le microdensitomètre enregistreur est de l'ordre de ± 50 m.

2. Comparaison de nos résultats avec les résultats admis dans les atlas lunaires

Les hauteurs du cap Laplace relatives au *Sinus Iridum*, fonctions de l'angle et de la longueur l'_t mesurée à l'œil, sont supérieures de 175 m environ aux hauteurs relatives correspondantes, fonctions de l'angle $\sigma - s_S$ et de la longueur n' mesurée objectivement.

Les hauteurs relatives indiquées par l'atlas lunaire de Wilkins pour les formations étudiées sont :

- 1490 m pour le pic central du cratère Arzachel,
- 4570 m pour les remparts du cratère Werner,
- 2440 m pour les remparts du cratère Purbach,
- 240 m pour le Mur droit,
- 2740 m pour l'altitude du cap Laplace au-dessus du *Sinus Iridum*.

La comparaison de ces derniers résultats avec les résultats correspondants de la colonne 9 du tableau VIII montre leur concordance satisfaisante.

La plus grande différence constatée concerne le Mur droit. Nous trouvons une altitude relative de 300 m au lieu de celle de 200 m, indiquée par Wilkins. Nous gardons cependant confiance dans notre mesure, qui correspond à une hauteur σ du Soleil de 2° environ, ce qui a pour effet de rendre prépondérants les phénomènes liés à l'existence de la zone de pénombre, qui prolonge la zone d'ombre pure.

CONCLUSION

Nous avons conscience de tous les développements que l'on pourrait encore apporter à ce travail. Il faudrait en particulier avoir la possibilité d'étudier de manière aussi complète que possible les propriétés sensitométriques des émulsions photographiques employées et cela dans les conditions mêmes de leur utilisation.

Par ailleurs, nous avons traité le problème des ombres portées comme si la surface lunaire était lisse. Or, selon Van Diggelen [21], la surface du sol lunaire serait pour les deux tiers constituée par des cavités en moyenne semi-ellipsoïdales, le grand axe étant perpendiculaire à la surface. Les dimensions de ces cavités seraient de l'ordre de plusieurs millimètres. Selon Barabashov [22], la surface du sol lunaire consisterait en fragments de tuf en forme de grains dont le diamètre atteindrait quelques millimètres également. Cela induit une forte variation de la brillance d'une région lunaire selon l'angle d'incidence du faisceau qui l'éclaire. Toutefois cette variation de brillance est négligeable dans la zone de pénombre et nous n'avons pas à en tenir compte dans la présente étude.

Il serait intéressant d'effectuer des mesures avec des clichés de haute qualité pris en altitude, afin de tester partiellement l'hypothèse qui consiste à identifier les points $[A'']$ et A'' , d'une part, et les points $[D'']$ et D'' , d'autre part (voir fig. 14).

Toutefois il semble désormais acquis que les différences constatées entre les mesures purement visuelles d'altitudes relatives des aspérités de la surface lunaire et les mesures effectuées sur des agrandissements sur papier photographique soient attribuables en partie à l'existence de zone de pénombre qui prolonge la zone d'ombre portée.

L'examen des clichés n^{os} 43, 44, 45 montre qu'il serait peut-être nécessaire de standardiser les conditions de prises des clichés et de développement de ces clichés, cela afin de permettre des comparaisons plus efficaces entre les valeurs attribuées aux altitudes lunaires relatives par différents auteurs.

Pour l'instant il est impossible de donner raison de façon absolue aux mesures effectuées dans ce domaine par tel ou tel auteur. Seuls les documents pris, soit en dehors de l'atmosphère terrestre, soit à une distance proche de la Lune, soit sur la Lune même, puisque la chose paraît désormais possible dans les années à venir, permettront de trancher la question. Outre des surprises possibles, la comparaison d'une altitude relative lunaire mesurée « de près », avec sa valeur vue « de loin » et à travers l'atmosphère terrestre par la plaque photographique, risque d'apporter des précisions nouvelles sur le comportement de cette dernière.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. LALLEMAND, *L'Astronomie*, juillet-août 1961, pp. 295-302.
- [2] T. GOLD, The lunar surface. *M.N.*, vol. 115, n^o 6, juin 1955, pp. 585-604.
- [3] J. W. SALISBURY, The origin of lunar domes. *Ap. J.*, vol. 134, n^o 1, July 1961, pp. 126-129.
- [4] G. FIELDER, Measurement of the profile of a lunar wrinkle ridge. *M.N.*, vol. 118, n^o 6, June 1958, pp. 547-550.
- [5] A. DOLLFUSS, Nouvelles recherches sur la Lune. *L'Astronomie*, octobre 1961, pp. 375-392.
- [6] R. d'E. ATKINSON, The computation of topocentric libration. *M. N.*, vol. 111, n^o 5, July 1951, pp. 448-454.
- [7] G. SCHRUTKA-RECHTENSTAMM, Relative Höhenbestimmungen auf dem Monde mittels des Pariser Mondatlases und visueller Messungen am Fernrohr. *Mitteilungen der Universitätssternwarte Wien*, Band 7, Wien 1955, pp. 127-161.
- [8] G. SCHWEITZER et P. SELME, *Théorie et pratique de l'agrandissement*. Publication photo-revue, Paris 1955, 5^e édition, pp. 14 et 15.
- [9] PECKER et SCHATZMAN, *Astrophysique générale*, 1^{re} édition, Paris 1959, p. 629.
- [10] C. W. ALLEN, *Astrophysical Quantities*. The Athlone Press, London 1955, pp. 138-139.
- [11] N. P. MOTT and R. W. GUERNEY, *Electronic processes in ionic crystals*. Clarendon Press, Oxford 1948, pp. 227-248.
- [12] WILMET et BELLIOT, Normalisation photographique. *Laboratoire central de l'armement*, France, septembre 1953, étude n^o 43-3, note n^o 3.
- [13] E. W. H. SELWYN, *Photography in astronomy*. Eastman Kodak Company, Rochester, New-York 1950.
- [14] G. DE VAUCOULEURS et H. FARAGGI, Techniques générales du laboratoire de physique. *C.N.R.S.*, Paris 1951, volume III, pp. 13 à 63.
- [15] KODAK data book, *Films for black-and-white photography*, 7th edition, 1956, first 1958 printing, pp. 50 et 51.
- [16] KODAK data book, *Films in rolls for black-and-white photography*, 1962, p. 11.
- [17] M. FLUCKIGER, *Essai sur l'emploi des grilles pour la photométrie des champs stellaires*. Thèse, Lausanne 1953, pp. 38-44.
- [18] JOYCE-LOEBL, *Automatic recording microdensitometer*. Instruction manual for model MK III B, April 1960.
- [19] Th. WEIMER, *Recherches sélénographiques, allongement du sélénoïde, libration physique, profils lunaires*. Thèse, Paris 1954, p. 2.

- [20] H. P. WILKINS et P. MOORE, *The Moon*. Faber and Faber Limited, London 1948.
- [21] A. DOLLFUS, La nature de la surface des planètes et de la Lune. *Handbuch der Physik*, Band LIV, Astrophysik V: verschiedenes, Berlin 1962, pp. 180 à 205.
- [22] N. P. BARABASHOV and V. I. GARAZHA, The microstructure of the lunar surface. *Soviet Astronomy AJ*, vol. 6, n° 2, September-October 1962, pp. 237 à 243.

A translation of the *Astronomical Journal of the Academy of Sciences of the USSR*. (Russian Original vol. 39, n° 2, pp. 185-392, March-April, 1962.) Published by the American Institute of Physics.

*École Polytechnique
de l'Université de Lausanne*

Manuscrit reçu le 19 novembre 1963
