

ANALYSE PHOTOMÉTRIQUE DE L'OMBRE INTÉRIEURE PENDANT LES ÉCLIPSES DE LUNE

J. DUBOIS

Faculté des Sciences de Pau, France

et

F. LINK

Institut d'Astrophysique, Paris, France

(Reçu le 16 novembre, 1970)

Sommaire. On explique les sursauts de lumière observés à plusieurs reprises dans l'ombre intérieure par l'effet de la luminescence lunaire. On prend la position *vis-à-vis* de récents examens au laboratoire des échantillons lunaires en ce qui concerne la luminescence.

Abstract. The surge of light observed sometimes in the central parts of the umbra is explained by the lunar luminescence. The position is taken *vis-à-vis* of recent examinations in the laboratory of lunar samples in the relation with the lunar luminescence.

1. Intérêt présenté par l'ombre intérieure

L'ombre intérieure qui n'est que la continuation de l'ombre extérieure, présente, en principe, les mêmes possibilités d'exploration, quoique quelque peu modifiées par la marche différente des rayons solaires dans l'atmosphère terrestre. En considérant les courbes d'intégration qui donnent l'éclairement solaire dans le plan lunaire ainsi que les formes de l'image de réfraction du Soleil vue de la Lune (Link, 1969) on remarque que les couches atmosphériques basses entre la surface terrestre et l'altitude de 10 km (= la troposphère) sont traversées par les rayons solaires et que l'étendue de l'image de réfraction sur le terminateur est de 360° c'est-à-dire toute la circonférence terrestre de 40000 km.

Il en résulte à première vue que la densité de l'ombre intérieure devrait être très sensible aux conditions variables dans la troposphère (nuages) si ces influences locales n'étaient pas largement atténuées par la grande étendue de l'image solaire. Autrement dit, c'est l'état moyen de la troposphère et accessoirement celui des couches plus élevées, avec les nuages, la couche d'ozone et la pollution atmosphérique sur une longueur de 40000 km qui intervient dans les parties centrales de l'ombre.

Par contre, étant donné la densité élevée de l'ombre intérieure obtenue par le calcul à partir de l'atmosphère de Rayleigh, il est à attendre que toute lumière d'origine non comprise dans le théorie s'y manifestera visiblement.

2. Excès de lumière dans l'ombre

Dans notre travail précédent (Dubois et Link, 1970a) nous avons signalé l'excès de

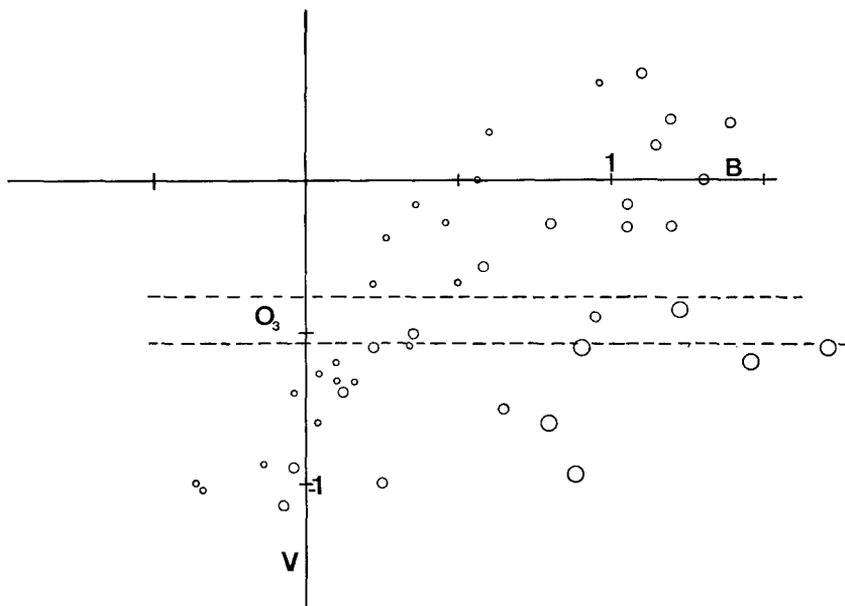


Fig. 1. Excès de lumière dans l'ombre. Corrélation de différences ΔB et ΔV en différentes parties de l'ombre: \bigcirc à $\gamma = 0''$, \circ à $\gamma = 600''$ et \circ à $\gamma = 1200''$. En droites interrompues les limites d'absorption par ozone pour les quantités verticales 2,6 et 3,6 mm.

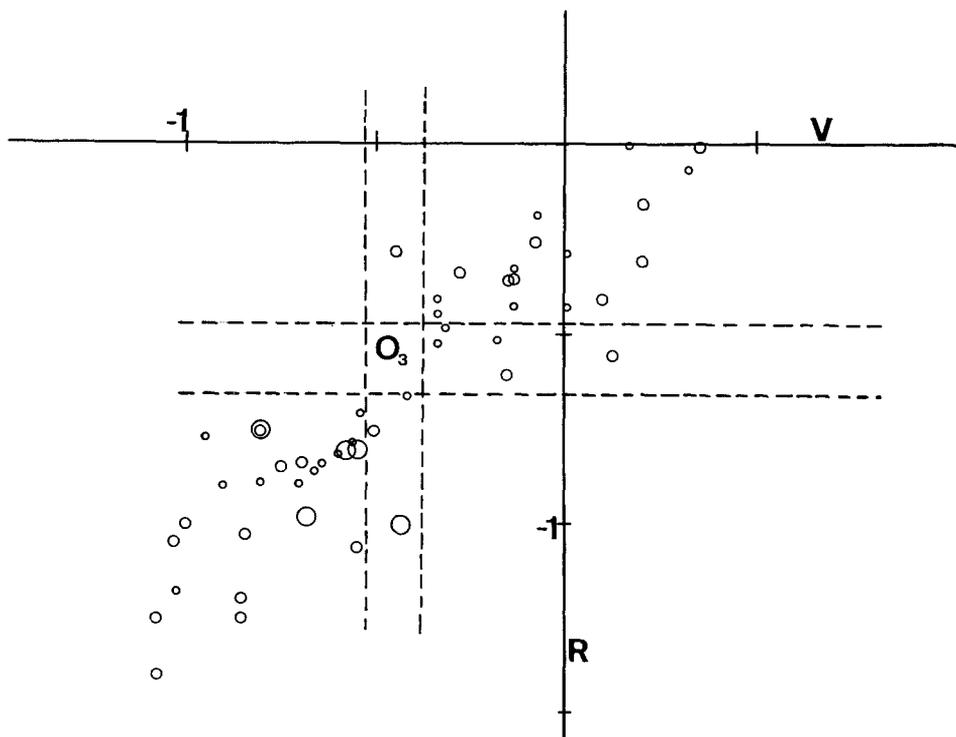


Fig. 2. Les mêmes corrélations pour ΔV et ΔR .

lumière dans les parties marginales de l'ombre. Cet excès se maintient aussi en allant vers le centre de l'ombre comme nous allons montrer dans la suite en formant les différences $\Delta = \text{densité calculée} - \text{densité observée}$. On peut alors discuter les variations et les corrélations de ces différences dans les trois couleurs bleue, vert, et rouge (B, V, R).

Sur la figure 1 est représentée la corrélation ΔB avec ΔV . Les deux limites à trait interrompu indiquent l'absorption de l'ozone dans le vert d'après les calculs de Hansen et Matsushima (1966). On constate d'abord que presque toutes les éclipses montrent l'excès de lumière dans le bleu et que sa valeur augmente en allant vers le centre de l'ombre. L'amplitude totale de la variation dépasse 2 environ. Dans le vert, compte tenu de l'absorption par l'ozone, une moitié environ des éclipses montre l'excès de lumière, mais sa valeur diminue en allant vers le centre de l'ombre. L'amplitude totale de la variation est environ de 1.5. En ce qui concerne la corrélation de ΔR avec ΔV (figure 2), les conclusions sont à peu près les mêmes que pour le vert.

Quant à l'origine de l'excès de lumière nous nous referrons d'abord aux calculs de

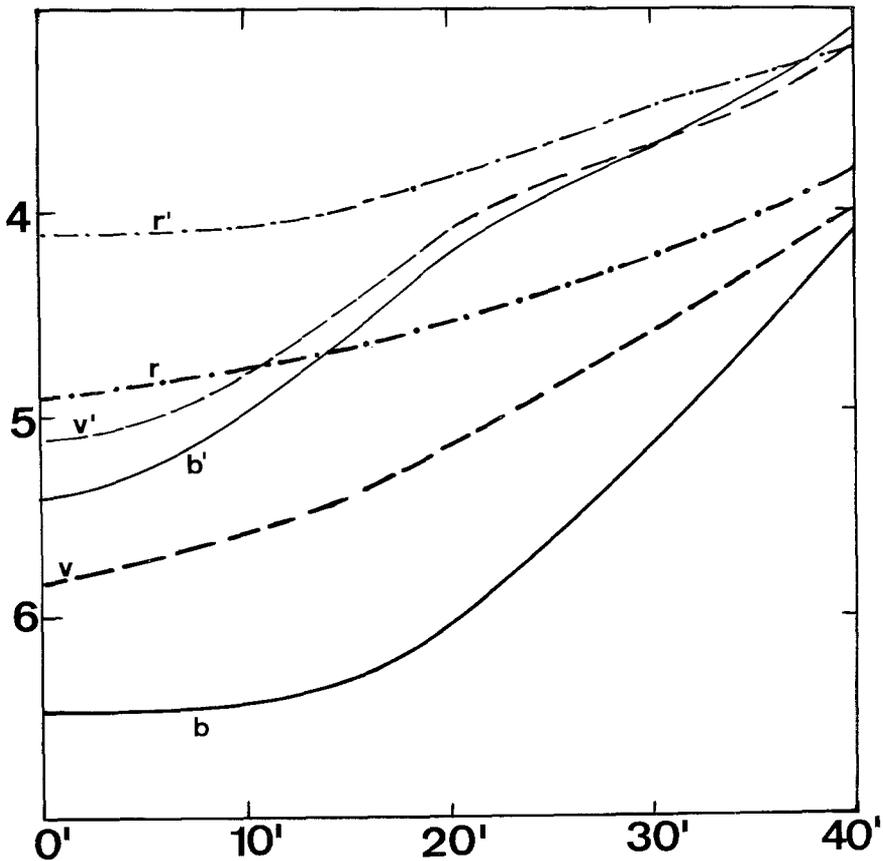


Fig. 3. Courbes de densité de l'ombre observées r' , v' et b' (1949 IV 13) et calculées r , v , et b dans une atmosphère fortement polluée.

Hansen et Matsushima (1966) relatifs à la lumière parasite provenant de la diffusion de la lumière par les aérosols. Ces calculs conduisent toujours (figure 3) à la diminution de la lumière dans l'ombre car si d'une part, les aérosols diffusent de la lumière vers l'ombre, d'autre part, les pertes subies par les rayons solaires directs sont prépondérantes. La diffusion dans l'atmosphère de Rayleigh à elle seule peut expliquer une faible partie de Δ dans le bleu et au centre de l'ombre. A $\gamma=600''$ cette contribution devient négligeable.

Sur la figure 3, sont représentées d'une part, les courbes de densité r' , v' , b' d'une éclipse claire (1949 IV 13) et d'autre part, les courbes de densité r , v , b , d'après les calculs de Hansen et Matsushima dans l'atmosphère de Rayleigh avec l'ozone et une couche polluée allant jusqu'à 20 km et ayant la densité optique au zénith de 0.028. Dans ces calculs, on tient compte aussi bien de l'absorption de ces agents que de leur diffusion de la lumière vers l'ombre. On voit de toute façon, que les influences atmosphériques ne peuvent guère expliquer l'excès de lumière dans l'ombre.

3. Sursauts de lumière

Sur certaines courbes de densité, on trouve une perturbation de courte durée (< 25 mn) ayant un caractère de sursaut de lumière c'est-à-dire de diminution de la densité de l'ombre. Dans la suite, nous nous proposons de discuter l'origine de ces anomalies dont les spécimens les mieux marqués sont représentés dans les figures 4 et 5.

Examinons d'abord les origines instrumentales possibles de ces perturbations. Il faut d'abord exclure des erreurs grossières de mesure, car on trouve le même sursaut simultanément dans les différentes régions spectrales et les points de la courbe aux endroits critiques sont toujours définis par un nombre suffisant (2-5) des pointés photométriques. Un dépôt de buée sur les surfaces optiques du photomètre ne peut intervenir car l'appareil portait un tube antibuée de 12 cm d'ouverture dépassant de 50 cm l'optique et jamais dans les cas ci-dessus on n'a pu observer un tel dépôt. La correction de bord due à la variation de l'albédo le long du limbe lunaire n'a jamais dépassé 0.2 m (=0.08 en densité) et enfin les erreurs systématiques dues au changement des combinaisons des prismes sont négligeables.

Dans 3 cas sur 4 la plage de comparaison se trouvait sur la partie de la courbe dans la pénombre et l'on pourrait craindre à la rigueur que le fort gradient de densité ne cause d'erreurs systématiques d'appréciation, mais dans le quatrième cas cité plus haut, cette explication n'entre pas en ligne de compte. D'ailleurs, l'absence des sursauts sur la plupart des courbes mesurées dans les conditions analogues, c'est-à-dire avec la plage de comparaison sur la partie raide de la courbe pénombrale est contraire à cette explication.

Ayant épuisé les causes instrumentales dont aucune n'est en état d'expliquer les sursauts ainsi que leur grande amplitude, nous pourrions encore incriminer les perturbations troposphériques sur le terminateur de l'ombre. A ce propos, il faut d'abord remarquer que si l'augmentation de la densité de l'ombre était explicable par les formations nuageuses locales, l'influence numérique de celles-ci serait forcément es-

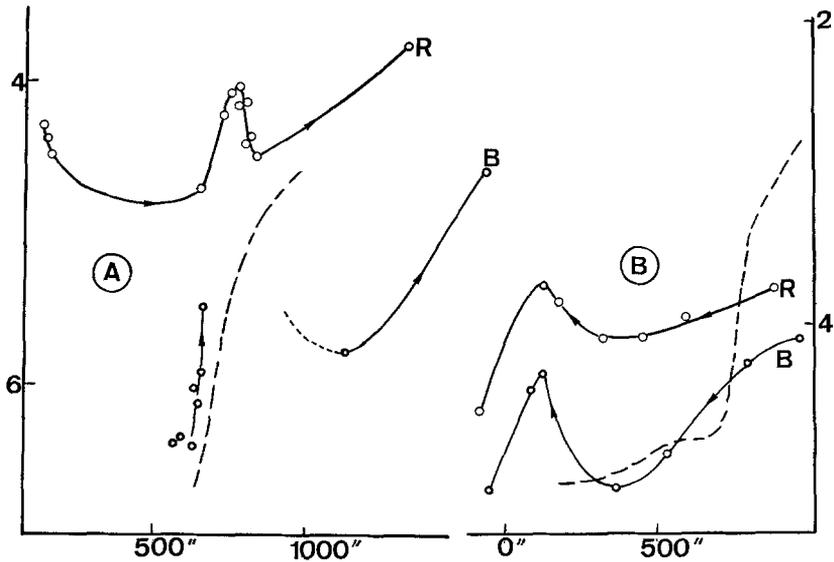


Fig. 4. Sursauts de lumière sur les courbes de densité: *A* (1942 III 2) et *B* (1949 IV 13). En trait interrompu les courbes de densité de la pénombre (décalées convenablement) qui ont servi de plages de comparaison.

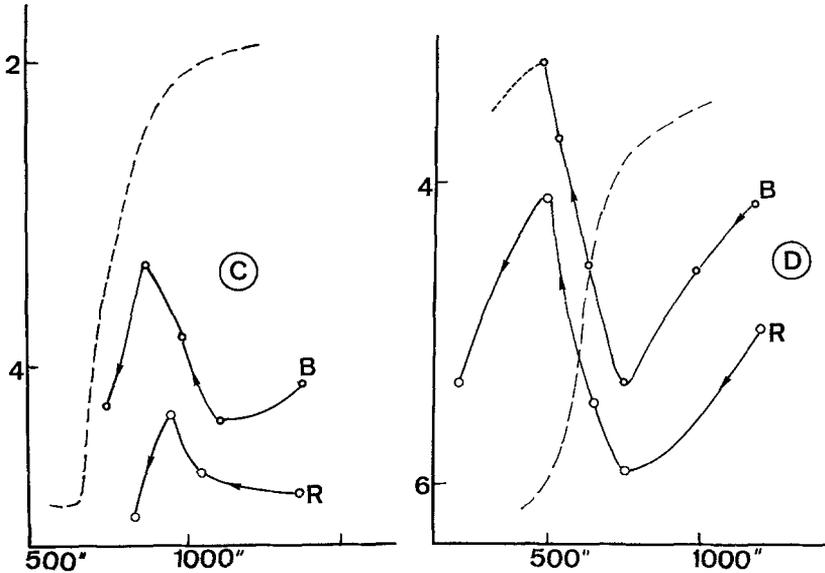


Fig. 5. Sursauts de lumière sur les courbes de densité: *C* (1956 XI 18) et *D* (1964 VI 24).

tompée dans la moyenne le long du terminateur de 40000 km. Mais il s'agit dans notre cas, de la diminution de densité déjà difficilement explicable par la même cause. Si donc la cause des sursauts ne peut-être ni instrumentale ni atmosphérique, il faut encore chercher du côté de la Lune.

On peut expliquer les sursauts dans l'ombre par la luminescence lunaire qui subit des excitations temporaires par des faisceaux corpusculaires non affaiblis dans l'ombre, en différence avec le flux solaire visible, considérablement atténué. En dehors de l'éclipse, le même phénomène passerait alors inaperçu grâce à la grande intensité de l'éclairement solaire.

Pour analyser le côté quantitatif de cette explication, considérons une plage lunaire dont l'albédo est égal à a et le pouvoir luminescent à α . En absence du faisceau excitateur, la luminance de la plage sera

$$b = ea,$$

où e est l'éclairement solaire dans le visible.

À l'arrivée du faisceau corpusculaire d'intensité ε la luminance de la plage sera accrue et vaudra

$$b' = ea + \varepsilon\alpha,$$

de façon que la diminution de la densité de l'ombre devienne

$$\Delta D = \log b - \log b' = \log \left(1 + \frac{\varepsilon\alpha}{ea} \right).$$

Avec $\Delta D = 1$ dans l'ombre où $e = 10^{-5}$ on obtient pour

$$\varepsilon \frac{\alpha}{a} = 9 \times 10^{-5}.$$

Le même accident arrivé en dehors de l'éclipse où $e = 1$ donnerait alors la variation

$$\Delta D_0 = \log (1 + 9 \times 10^{-5}),$$

qui passerait totalement inaperçue.

Nous possédons un assez grand nombre d'indications sur les phénomènes dits transitoires qui se manifestent comme une augmentation limitée temporairement et localement de la luminance du sol lunaire en dehors des éclipses (Middlehurst *et al.*, 1968). À part un très gros phénomène, plutôt exceptionnel, signalé par Kopal et Rackham (1964), nous avons une série de mesures photoélectriques par Roberts (1968) portant sur la région de Ptolémée et d'Aristarce. Les mesures simultanées en vert, rouge et infrarouge effectuées dans d'excellentes conditions atmosphériques au Pic-du-Midi sur 21 600 points, accusent dans environ 50% des cas les variations entre 5 et 15% avec des périodes pour la plupart inférieures à 1 mn. mais pouvant atteindre aussi 1 heure. La limite inférieure de 5% est considérée par Roberts comme étant due aux erreurs instrumentales et aux fluctuations atmosphériques. De toute façon, les sursauts de lumière observés pendant les éclipses rentrent dans la même catégorie des phénomènes observés par Roberts ayant toutefois l'amplitude d'excitation beaucoup plus faible.

4. Conclusions

Dans le présent travail, comme dans les deux précédents (Dubois et Link, 1969, 1970a), nous avons discuté une longue série (1921–1968) de mesures photométriques de la Lune éclip­sée. Nous y avons confirmé, et définitivement établi, un certain nombre de particularités concernant la luminosité de la Lune dans la pénombre et dans l'ombre. Nous avons comparé la valeur de cette luminosité à celle calculée théoriquement, en considérant une atmosphère de Rayleigh.

Ces particularités sont:

(1°) L'excès notable de lumière dans la pénombre intérieure et un faible défaut dans la pénombre extérieure.

(2°) L'excès de lumière dans l'ombre.

(3°) Les sursauts de lumière dans les parties centrales de l'ombre.

Ces phénomènes semblent suivre les fluctuations des radiations solaires. Dans la pénombre, l'excès et le défaut de lumière varient en fonction de la partie de l'atmosphère solaire non occultée par la Terre. De plus, les fluctuations momentanées correspondent bien à l'occultation par la Terre des plages K-3 du Soleil. Tout se passe comme si les radiations de courte longueur d'onde émises par ces sources étaient à l'origine des particularités de la pénombre.

Dans l'ombre, les fluctuations de l'excès de lumière suivent les variations du cycle undécennal et annuel du bombardement corpusculaire de la Terre. Finalement, les sursauts de lumière dans l'ombre montrent, de nouveau, l'influence plausible des radiations solaires corpusculaires.

Les phénomènes ci-dessus trouvent une explication très probable dans l'existence d'une luminescence lunaire. D'ailleurs, cette luminescence permet d'interpréter un certain nombre d'autres phénomènes en dehors des éclipses: par exemple, les fluctuations de la lumière globale de la Lune et les variations de la profondeur des raies de Fraunhofer dans le spectre lunaire.

Kopal (1970) passe en revue tous les phénomènes au moins justiciables d'une explication par l'existence de la luminescence lunaire. Mais, dans l'état actuel des choses, il existe un désaccord dans le bilan énergétique entre l'intensité de la luminescence observée depuis la Terre et celle admise pour les radiations excitatrices, du moins si on les considère agissant séparément, produisant des effets simplement additifs, et si on admet que le matériau lunaire est, sur la Lune, dans un état identique à celui connu lors de nos expériences de laboratoire. En effet, les échantillons lunaires rapportés à la suite du vol d'Apollo XI, et étudiés en laboratoire, ne présentent qu'une très faible luminescence, ne pouvant, sous l'action de l'irradiation solaire, produire une luminance supplémentaire du même ordre que celle déduite des observations de la Lune depuis la Terre.

On se trouve alors dans la situation suivante:

(1°) Un large faisceau de phénomènes lunaires, observés de la Terre et mis en évidence par des méthodes et des expérimentateurs différents, montre un *excès de lumière* qualitativement explicable par une cause commune qui est la luminescence

lunaire. L'article précité de Kopal fait le point sur tous les travaux de ce genre et dont les résultats sont tous bien concordants.

(2°) Par contre, il y a désaccord quantitatif entre l'intensité de la luminescence attribuée à la surface lunaire, et l'intensité admise pour les radiations excitatrices si les conditions et hypothèses implicitement admises restent valables. Nous pensons, quant à nous, que les morceaux ou poussières de roches lunaires considérées en laboratoire ne sont plus *in situ*, et que leur structure physique n'est plus ce qu'elle était sur notre satellite. De plus, lors de la collecte, il y a eu mélange de matériau. Toutes ces remarques ont peut-être leur importance. Certes, et c'est intéressant, les roches lunaires *peuvent* être luminescentes et donner plusieurs bandes : seule l'intensité de cette luminescence est insuffisante.

Considérons les conditions générales de ces recherches. Les rapports les concernant ont paru dans *Science* (1970). Nous y voyons que les roches ont été irradiées par des sources particulières, souvent puissantes. Mais on n'a pas reproduit pour autant le rayonnement *global* du Soleil. Un seul groupe d'auteurs (Nash *et al.*, 1970) a irradié les échantillons avec un rayonnement composite de protons et d'ultra-violet. Mais le Soleil envoie aussi des radiations X, des électrons, du rayonnement visible et infra-rouge. Il y a peut-être un effet de renforcement dû à l'action simultanée de toutes ces radiations solaires. On sait qu'un phénomène de cet ordre est au moins possible (Garlick, 1958) en ce qui concerne la luminescence. Il peut avoir lieu dans le cas de la Lune.

Nous ne saurions donc trop souhaiter des mesures et des vérifications sur la Lune elle-même, en opérant suffisamment loin de la zone d'atterrissage où les gaz des rétro-fusées peuvent perturber l'ordonnance de la surface lunaire. Si la réponse n'était pas favorable pour notre hypothèse, au moins aurions-nous la certitude qu'il faut chercher une autre explication, ou vérifier, s'il y a eu des erreurs de faites dans l'exécution des méthodes dont les résultats nous ont conduit à admettre l'existence d'une forte et variable luminescence lunaire.

Revenons aux roches lunaires dont on a disposé pour les mesures en laboratoire. On a utilisé des roches broyées ou des poussières qui se sont trouvées mélangées par la force des choses. Or, les analyses ont montré que les roches considérées contenaient du fer, élément qui tend à éteindre la luminescence. Sur la Lune, les roches ont été plus ou moins désagrégées par des causes diverses. Ce genre de fragmentation a pu amener la séparation des parties ferrugineuses et des plagioclases fortement luminescentes qui, elles, seraient restées sur la croûte superficielle de la Lune. Il y aurait ainsi, sur la Lune, la possibilité d'avoir une luminescence très supérieure à celle mise en évidence dans les laboratoires. C'est une hypothèse explicative que nous émettons et qui pourrait inciter à des recherches ultérieures.

Si la luminescence de la surface lunaire ne peut être mise en doute, on doit s'efforcer de rechercher la cause du désaccord quantitatif dont nous avons parlé. Nous pensons que ces difficultés ne pourront être levées que par des mesures *in situ*. Nous les avons déjà suggérées par ailleurs. (Dubois et Link, 1970b; Link, 1970).

Bibliographie

- Dubois, J. et Link, F.: 1969, *The Moon* **1**, 85.
Dubois, J. et Link, F.: 1970a, *The Moon* **1**, 462.
Dubois, J. et Link, F.: 1970b, dans Kopal, 1970, p. 105.
Garlick, G. F.: 1958, dans *Handbuch der Physik* (ed. par S. Flügge) **XXVI**, 78.
Hansen, J. E. et Matsushima, S.: 1966, *J. Geoph. Res.* **71**, 1073.
Kopal, Z. et Rackham, T. W.: 1964, *Nature* **201**, 239.
Kopal, Z.: 1970, dans *Space Applications of Solid State Luminescent Phenomena* (ed. par Weber et White), Pennsylvania State University, M.R.L. Space Publ. 70-101, p. 6.
Link, F.: 1969, dans *Eclipse Phenomena*, Springer, Berlin, p. 31.
Link, F. 1970, *The Moon*, **1**, 338.
Middlehurst, B. M., Burley, J. M., Moore, P., and Welther, L. B.: 1968, NASA TR R-277.
Nash, B. D., Conel, J. E., and Greer, R. T.: 1970, *Science* **167**, 721.
Roberts, G. L.: 1968, *Icarus* **9**, 253.
Science: 1970, **167**, No. 3918.