

LA LOI DE DANJON ET LES ERUPTIONS VOLCANIQUES

F. LINK

Institut d'Astrophysique, Paris, France

(Reçu le 26 mars 1974)

Résumé. La loi de Danjon qui décrit les variations de la luminosité des éclipses de Lune au cours du cycle solaire de 11 ans, a été vérifiée dans 7 cas des minima solaires entre 1900 et 1965, dont deux peuvent être attribués aussi à l'activité volcanique.

Abstract. Danjon's law describing the variations of the luminosity of lunar eclipses during the 11 year cycle of solar activity has been verified in 7 cases between 1900 and 1965 from which 2 cases may be also ascribed to the volcanic activity.

1. Introduction

La loi de Danjon (1920) peut être énoncée de la façon suivante:

(a) Dans les deux années qui suivent un minimum de l'activité solaire, l'ombre de la Terre lors des éclipses de Lune est très sombre, grise, ou peu colorée.

(b) Ensuite, à mesure que l'on s'éloigne du minimum, la Lune reste, au cours des éclipses, de plus en plus éclairée, et sa coloration est de plus en plus rouge, voire même orangée, peu avant le minimum solaire suivant.

Pour établir cette loi, Danjon a dû introduire une échelle arbitraire basée à la fois, sur la coloration et sur la luminosité des éclipses d'après leur description verbale. Les éclipses très sombres et peu colorées reçoivent la cote $L=0$, tandis que les éclipses à la fois très lumineuses et fortement colorées sont cotées de $L=4$. En représentant L en fonction de temps, on obtient alors une courbe en dents de scie (figures 2, 3) avec la chute très brusque au voisinage de chaque minimum solaire. C'est surtout entre 1823 et 1920 que Danjon a pu tracer ces courbes grâce au nombre suffisant d'observations, mais dès 1583, il a pu obtenir un certain nombre de chutes isolées signalant ainsi les minima probables de l'activité solaire (tableau I) qui peuvent être comparés à ceux obtenus d'après les statistiques de Zürich (Waldmeier, 1961). De plus, de Vaucouleurs (1944) a repris la discussion des éclipses 1894–1944 avec des conclusions sensiblement identiques.

La loi de Danjon fut à l'époque la cible des critiques, par Fisher (1924) et par Maunder (1921), mais il semble que ces critiques n'étaient pas justifiées, comme il ressort des conclusions de Danjon (1925) et des nôtres (1956). Si nous reprenons de nouveau le problème soulevé il y a un demi siècle par Danjon, c'est pour plusieurs raisons qui rendent ce travail utile, voire même nécessaire. D'abord, nous disposons d'un matériau d'observation augmenté de deux cycles solaires où les observations et les mesures sont particulièrement fréquentes. D'autre part, Danjon semble avoir ignoré la possibilité des influences volcaniques sauf pour le groupe des 3 éclipses 1884 X 4, 1885 III 30 et IX 24, après la fameuse éruption de Krakatoa en 1883. Dans sa

liste des éclipses, de Vaucouleurs (1944) signale déjà quelques éclipses susceptibles d'être influencées par les éruptions volcaniques sans toutefois décider si tel est le cas. Or les grandes éruptions volcaniques ont eu, au moins dans le passé, la fâcheuse tendance de se placer au voisinage des minima solaires où, en vertu de la loi de Danjon, les éclipses doivent devenir subitement sombres (tableau I). Il y a donc quelques risques de confondre l'effet présumé de l'activité solaire avec celui des éruptions volcaniques, c'est-à-dire un effet plutôt attendu (Link, 1961, 1969a) à la place d'un effet nouveau plus intéressant. Ce n'est qu'une discussion détaillée en comparant les dates des éclipses et des éruptions (à un jour près), ainsi que la propagation géographique des poussières volcaniques avec la position du déterminateur de l'ombre pendant chaque éclipse où l'on peut démêler les deux causes.

Dans cette entreprise nous étions grandement favorisés par la parution d'importants travaux de Lamb (1970) et tout récemment de Deirmendjian (1973) sur les éruptions volcaniques et leur rôle dans la transparence atmosphérique, mais les éclipses de Lune ne sont pas prises en considération dans ces études. Par la suite, nous étudierons les cycles solaires du 20^{ème} siècle, où le matériau d'observation de toutes sortes

TABLEAU I

Confrontation des minima de l'activité solaire d'après Danjon (1920) et Waldmeier (1961) avec les éruptions volcaniques d'après Lamb (1970)

D	W	Eruptions volcaniques	Indice de poussières volcaniques (Lamb, 1970)
1606		Etna 1603-1610, max. 160-6	500-600
1672		Iles Molucca 1673	1000
1713	1712	Japan 1712	300
1725	1723	Island 1724 V 17	350
1760		Jorullo, Mexique 1759 IX 21 et Iles Molucca 1760	300 250
1782		Island 1783 V. Japan 1783 VIII 2-5	600
1812	1810, 6	Antilles 1812 VI 30; crépuscules colorés V-X à Celebes	300 300
1823	1823, 3	Java 1822 X 8-12, ciel coloré en Angleterre 500 XI, crépuscules colorés à Londres 1823 III-IX.	500
1834	1833, 9	Nicaragua 1835 I 20	4000
1844	1843, 5	Island 1845 IX 2, crépuscules colorés IV-XII	800
1855	1856, 0	Ecuador 1855-56, crépuscules colorés XI-XII	700
1868	1867, 2	Vesuve 1868 X 8, crépuscules colorés XII	-
1889	1889, 6	Japan 1888 Archipèle Bismarck	500 250
1901	1901, 7	Antilles 1902 IV 8-17 Guatemala 1902 X 24	400 600
1912	1913, 6	Alaska 1912 VI 6	500

Dans plusieurs cas ci-dessus, surtout avant 1900, il est difficile de trancher la question entre l'influence volcanique et celle de la loi de Danjon, car les minima de Danjon sont donnés à 1 année près, et, dans beaucoup de cas, il en est de même pour les éruptions volcaniques. En conséquence, le critère de la cause précédant l'effet ne peut être appliqué dans ces cas.

est abondant et relativement digne de confiance en contraste avec les siècles précédents. D'autre part, nous concentrons notre attention sur les passages d'un cycle solaire à l'autre où les phénomènes lunaires sont très prononcés et donc facilement observables.

2. Eclipses de Lune et activité volcanique 1900–1965

Dans la discussion des cycles solaires no.13–20, nous avons tracé les graphiques (figures 1–6) où en fonction de temps figurent :

(a) Dans la partie supérieure, les estimations de la luminosité des éclipses dans l'échelle de Danjon de $L=0$ à $L=4$. Ces estimations sont prises dans la liste de Vaucouleurs (1944), d'après les textes rassemblés par Fisher (1924) ou dans les différents périodiques astronomiques, en particulier dans l'Astronomie et 'Sky and Telescope'.

(b) Dans la partie centrale, est souvent donnée la courbe de la transparence atmosphérique d'après les mesures actinométriques et dans certains cas récents, la courbe de la densité de l'ombre.

(c) Les flèches délimitent les cycles solaires d'après les minima de taches et les éruptions volcaniques sont indiquées par des symboles correspondants.

Le dernier passage du 19ème au 20ème cycle très abondamment observé, est traité d'une façon différente.

Les données essentielles de ces graphiques sont résumées dans le tableau III, auxquelles nous ajouterons les remarques suivantes :

Passage du 13ème au 14ème cycle en 1902 (figure 1)

La chute de luminosité des éclipses a eu lieu peu après le minimum solaire en août 1901, mais avant la série d'éruptions volcaniques (Lamb, 1970), en mai, le 6 et le 17 aux Antilles, et le 24 octobre 1902, au Guatemala. L'éclipse de 1899 XII 17 fut très lumineuse et l'éclipse partielle 1901 X 27 n'était pas sombre, car, malgré la faible grandeur (0,23) de l'éclipse un observateur (Fisher, 1924) signale la visibilité de Tycho dans l'ombre. L'éclipse suivante, 1902 IV 22, donc avant l'éruption du 8 mai, était sombre, comparable à l'éclipse sombre de 1884 X 4 après l'éruption de Krakatoa (Fisher, 1924). Si la chute de luminosité est nettement due à la loi de Danjon, les éclipses suivantes, 1902 X 17, 1903 IV 11 et 1903 X 6 étaient déjà sombres grâce à l'action combinée de cette loi et des éruptions volcaniques en mai–octobre 1902.

Passage du 14ème au 15ème cycle, en 1913 (figure 2)

Cette action combinée de ces deux causes s'est encore manifestée pendant ce passage, mais de telle façon qu'il est impossible de les séparer l'une de l'autre. En effet, l'éclipse 1912 IV 1 fut très claire en accord avec la loi de Danjon, car elle tombe un peu avant le minimum de taches en juillet 1913. Mais, l'éclipse suivante, 1913 III 22, fut déjà assombrie par la grande éruption du Mt. Katmai en Alaska, survenue le 6 juin 1912. La courbe actinométrique de la transparence atmosphérique semble suivre fidèlement celle de la luminosité des éclipses.

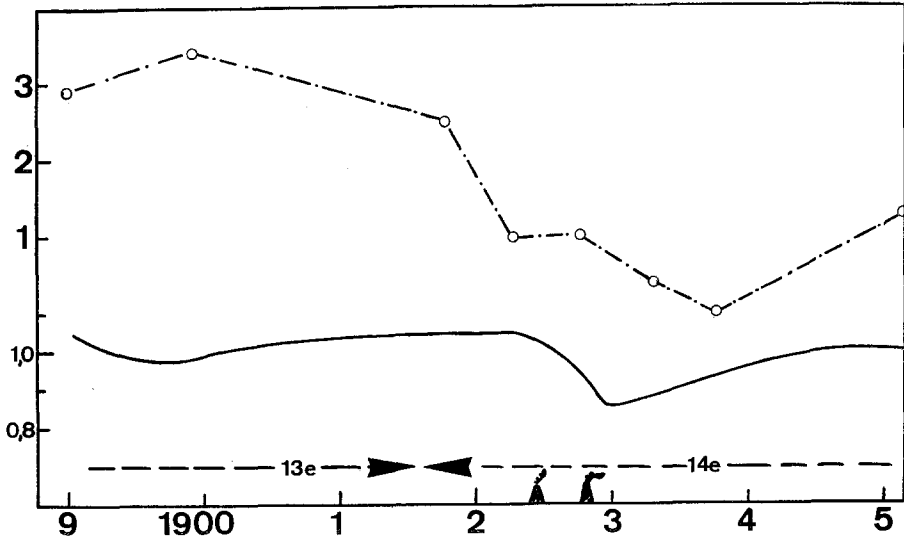


Fig. 1. Passage du 13e au 14e cycle en 1901: --- estimations dans l'échelle de Danjon, — courbe actinométrie d'après Kimball (1924).

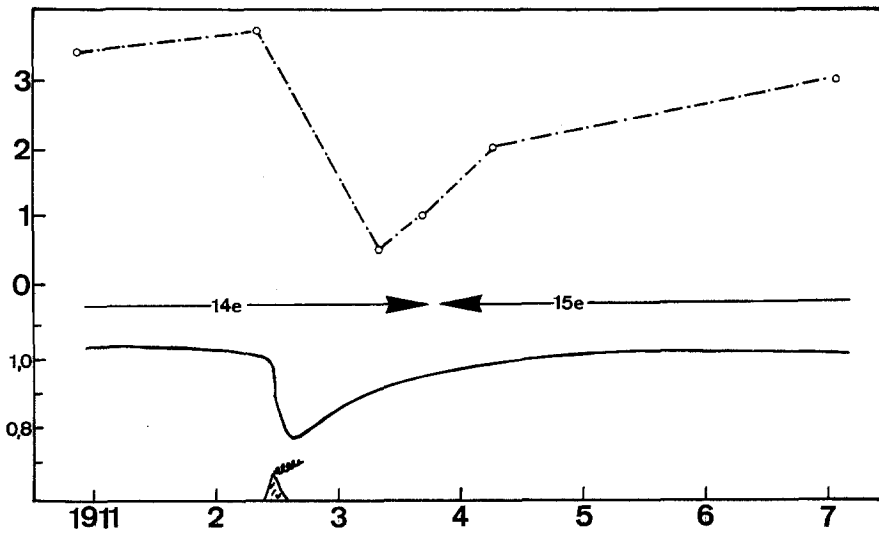


Fig. 2. Passage du 14e au 15e cycle en 1913: ---; estimations, — courbe actinométrie d'après Kimball (1924).

Passage du 15ème au 16ème cycle en 1923 (figure 3)

La courbe de luminosité des éclipses montre une chute rapide placée au voisinage du minimum solaire en juillet 1923. Lamb (1970) ne signale aucune iruption volcanique un peu importante, et la courbe actinométrique est relativement plate. C'est donc sans ambiguïté que la loi de Danjon décrit la chute de luminosité.

Passage du 16ème au 17ème cycle en 1933 (figure 4)

Un bel exemple de la nécessité de tenir compte, d'une part, de la position du terminateur de l'ombre, et, d'autre part, de la propagation géographique des poussières volcaniques. En effet, il y a eu une forte éruption volcanique le 10 avril 1932 dans les Andes (35°S) qui a fortement perturbé la courbe actinométrique en Australie, à Mt. Stromlo (35°S), (Rimmer, 1937), mais qui est restée sans conséquence sur la courbe actinométrique aux Etats Unis (Hand, 1939). L'éclipse 1932 IX 14, n'en fut pas affectée non plus, car le terminateur de l'ombre de cette éclipse passait sur l'hémisphère boréal. L'éclipse 1935 I 19 est encore sombre en vertu de la loi de Danjon, tandis que la transparence atmosphérique est revenue à son niveau normal.

Passage du 17ème au 18ème cycle, en 1944 (figure 5)

Lamb (1970) ne signale aucune éruption importante. La courbe de la luminosité, ainsi que la courbe de la densité de l'ombre, montrent l'allure caractéristique due à la loi de Danjon (figure 5). Deirmendjian (1973) signale l'éruption de Paracutín sans pouvoir donner d'autres détails (Deirmendjian, 1974) que le début d'explosion en février 1943.

Passage du 18ème au 19ème cycle en 1954 (figure 6)

Après les éclipses très claires en 1950, où la densité de l'ombre était inférieure à la densité théorique dans l'atmosphère pure (Link, 1960) l'éclipse 1952 II 10 (Dubois, 1952) mesurée au bord de l'ombre seulement, semble indiquer que la descente de luminosité était déjà amorcée à cette époque, donc en avance sur le minimum solaire en avril 1954.

L'éruption du Mt. Spur en Alaska (61°N) a eu lieu le 9 juillet 1953, et ses poussières ont fait le tour de l'hémisphère nord en causant des effets optiques de courte durée (Lamb, 1970). D'après nos connaissances de la circulation méridionale de l'atmosphère (Lamb, 1970, p. 454), les poussières ne devraient pas atteindre la zone équatoriale de l'atmosphère qui interessait l'éclipse 1953 VII 26, estimée sombre $L=2$ par de Vaucouleurs (1954). La même conclusion est a fortiori valable pour l'éclipse 1954 I 18, où les couches atmosphériques australes entraient en jeu. Cette éclipse fut également sombre.

On peut alors conclure que l'éruption du Mt. Spur n'était pas la cause de la chute de luminosité pendant ce passage des cycles. La forte dissymétrie de l'éclipse 1953 I 29 sombre dans sa première moitié, et plus claire dans sa seconde partie, pourrait être due à la répartition géographique de l'ozone.

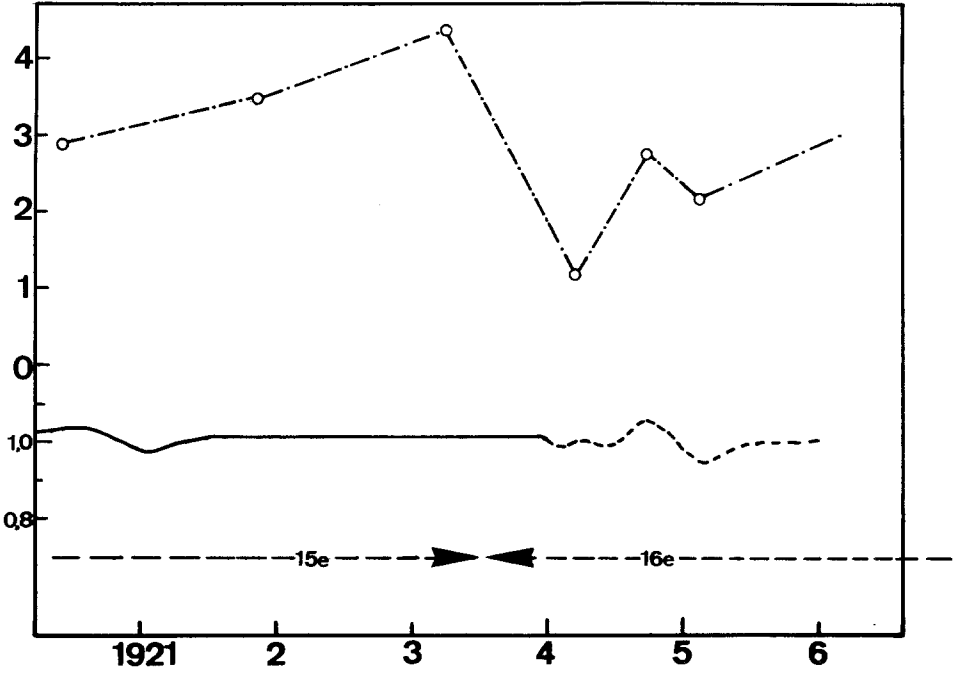


Fig. 3. Passage du 15e au 16e cycle en 1923: --- estimations, — courbe actinométrique d'après Kimball (1924) - - - - et d'après Hand (1939).

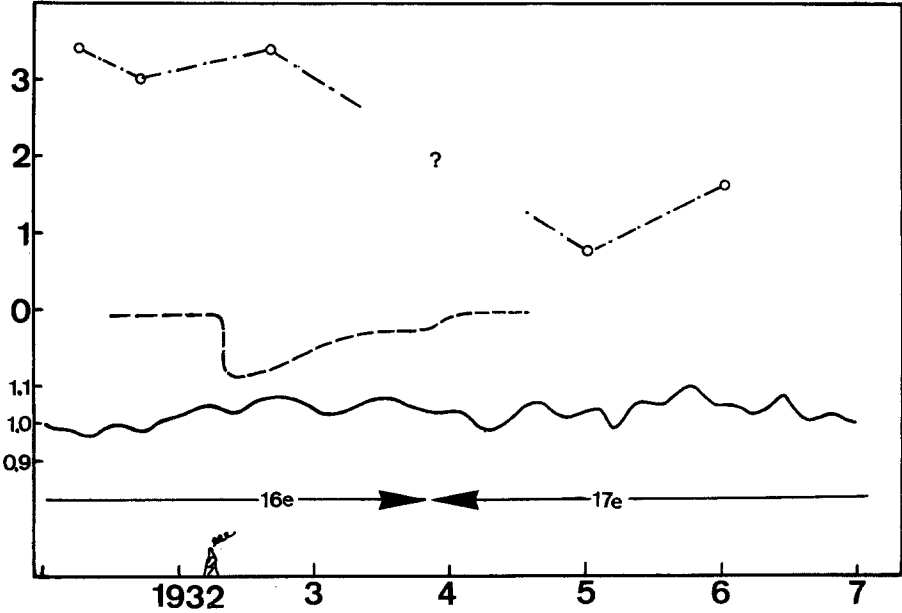


Fig. 4. Passage du 16e au 17e cycle en 1933: --- estimations, — courbe actinométrique d'après Hand (1939) et - - - d'après Rimmer (1937).

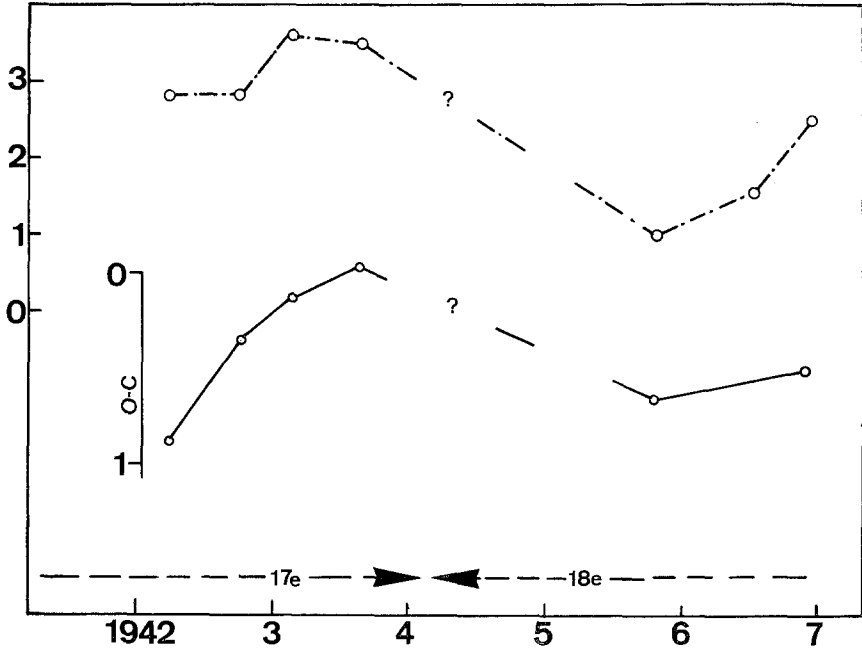


Fig. 5. Passage du 17e au 18e cycle en 1944: --- estimations, — O-C de densité de l'ombre en vert et à 15' du centre (Link, 1960)

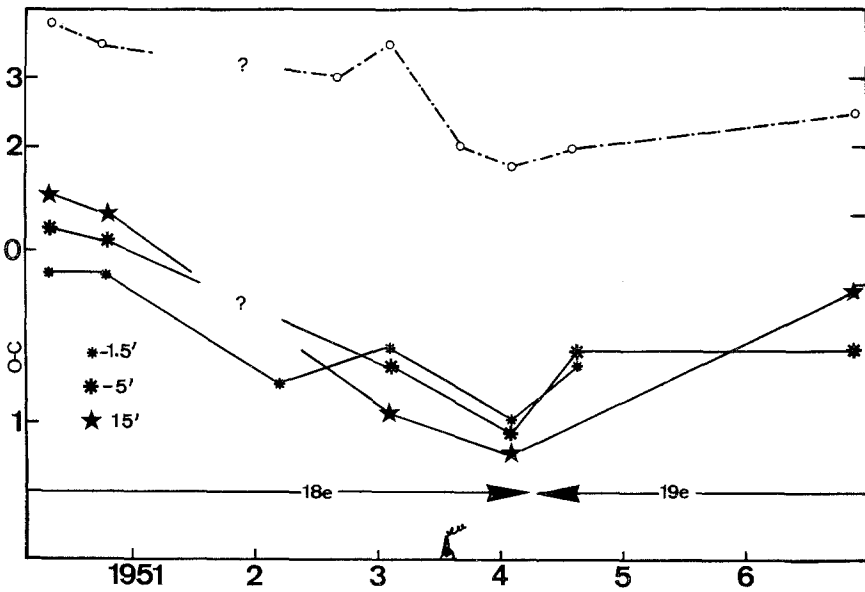


Fig. 6. Passage du 18e au 19e cycle en 1954: --- estimations, — O-C de densité de l'ombre en vert dans la partie périphérique à 1,5' et 5' du bord et dans la partie centrale à 15' du centre de l'ombre (Link, 1960).

Passage du 19ème au 20ème cycle en 1964

Nous possédons dans cette période une série de mesures relatives aux éclipses dans le tableau suivant:

TABLEAU II

No. Opolzer	Date	L	Mesures
4904	1961 VIII 26	3	Dubois (1962)
4905	1963 VII 6	2	Marin (1963)
4906	1963 XII 30	0	Matsushima et Zink (1964)
4907	1964 VI 25	0	Bouška <i>et al.</i> (1965)
4908	1964 XII 19	1	Matsushima <i>et al.</i> (1966)

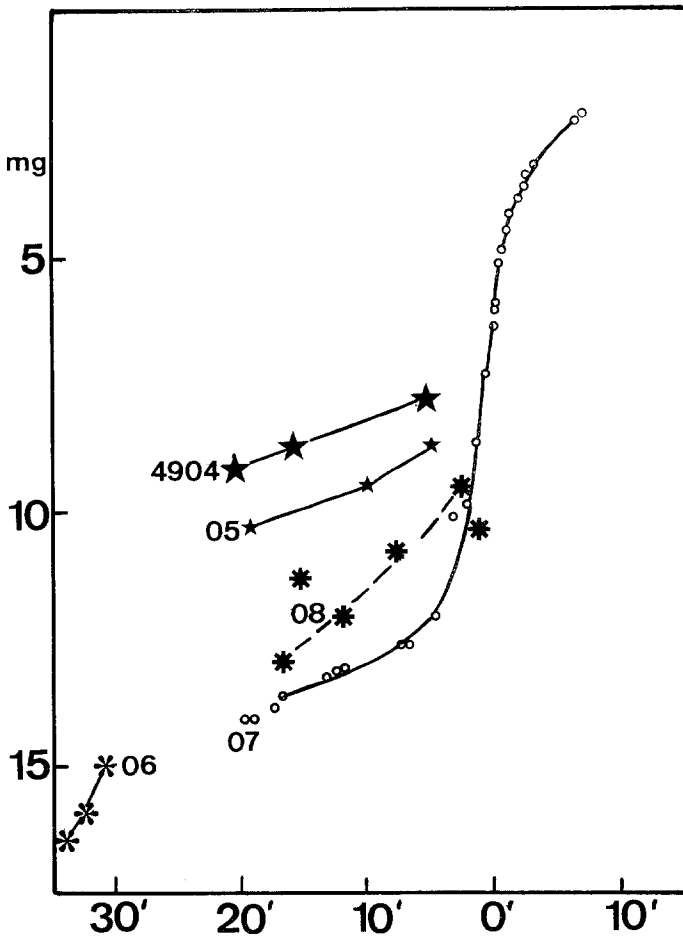


Fig. 7. Passage du 19e au 20 en cycle en 1964: Courbes de densité de l'ombre en vert en fonction de la distance au bord de l'ombre (tableau II).

Les courbes de la densité de l'ombre en fonction de la distance au centre sont données sur la figure 7.

Le 17-18 mars 1963 a eu lieu l'éruption du Mt. Agung (8°S) en Indonésie, dont l'importance suivant Lamb (1970) était d'environ 80% de celle de Krakatoa en 1883 ou 30% seulement d'après Deirmendjian (1973). Le minimum de taches se place en avril 1964. Ce qui est très intéressant pour notre discussion, c'est une étude de Dyer et Hicks (1968) sur la propagation géographique des poussières effectuée sur la base des mesures actinométriques en 46 stations entre le pôle sud et la latitude 75°N . A partir de ces mesures, ils sont arrivés à obtenir l'indice de contamination qui est directement proportionnel à la quantité des poussières contenue dans la colonne verticale de l'atmosphère et cela dans les différentes zones de latitudes en fonction de temps entre 1961 et 1966 (figure 8). Nous avons indiqué dans le même graphique la position du terminateur (flèches) intéressant chaque éclipse du tableau II.

D'autre part, nous avons les observations des phénomènes crépusculaires très sensibles à la pollution de l'atmosphère. C'est ainsi que Volz (1964) signale les premières perturbations observées en Allemagne (48°) fin juin 1963, et les Meinel (1963) ont remarqué des crépuscules fortement colorés au Texas dès le début de septembre 1963. Il semble donc que l'éclipse 1963 VII 6 (No. 4905) ait pu déjà être influencée, comme le montre d'ailleurs sa courbe de densité de l'ombre (figure 7). Quant aux courbes des éclipses suivantes, leur position sur la figure 7 est en rapport avec la position du terminateur sur la figure 8.

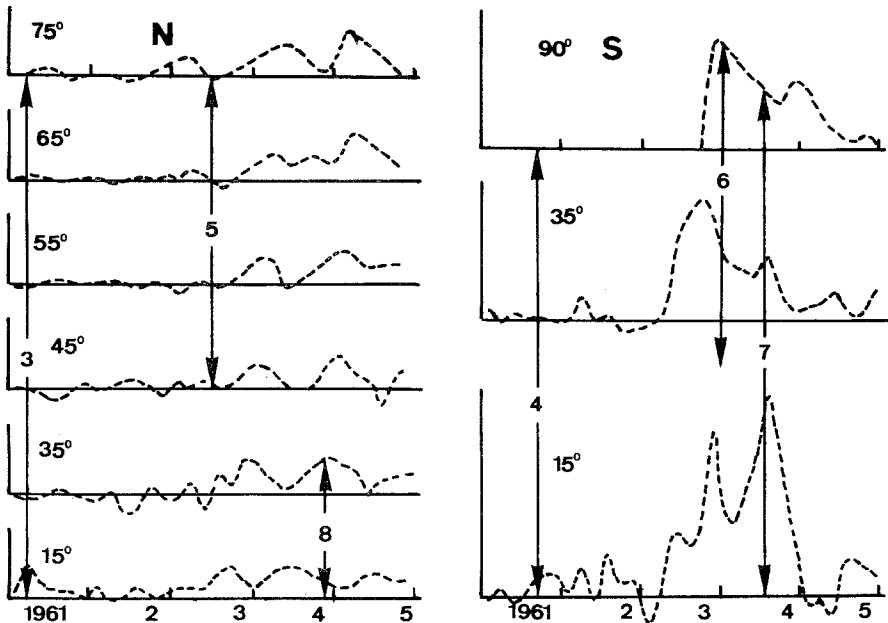


Fig. 8. Indice de contamination de l'atmosphère dans les différentes zones géographiques de 1961 à 1965 d'après Dyer et Hicks (1968). Les flèches indiquent la position du terminateur de l'ombre des éclipses de la figure 7 et du tableau II (chiffres terminour).

TABLEAU III
 Activité solaire, éclipses de Lune et activité volcanique 1900-1964

Cas	Passage des cycles solaires	Premières taches du nouveau cycle	Minimum des taches	Première éclipse sombre	Première éruption volcanique	Causes plausibles de la première éclipse sombre	Loi de Danjon	Eruption volcan
1	13→14	1900 IX	1900 VIII	1902 IV 22	1902 V 8	+		
2	14→15	1912 XII	1913 VII	1913 III 22	1912 VI 6	+		+
3	15→16	1923 VII	1923 VII	1924 II 20	∅	+		
4	16→17	1934 II	1933 IX	1935 I 19	∅	+		
5	17→18	1944 III	1944 II	1946 XII 18		+		
6	18→19	1954 IV	1954 IV	1952 II 10	1953 VII 9	+		
7	19→20	1963 VIII	1964 IV	1963 VII 6	1963 III 17	+		+

En conclusion, il est impossible de séparer les deux causes possibles de l'affaiblissement de la Lune éclipsée qui se sont combinées de façon à donner les éclipses à la limite de visibilité (tableau II). Les éclipses totalement invisibles sont d'ailleurs assez rares. (Link, 1961).

Matsushima (1967) a discuté les mesures photométriques des trois dernières éclipses (tableau II) en vue de chiffrer l'influence des poussières volcaniques. Un modèle de l'atmosphère normale contenant en plus une couche homogène de poussières jusqu'à 25 km d'altitude a permis d'obtenir les coefficients d'extinction qui s'insèrent bien dans les séries de mesures classiques de l'extinction par la photométrie des étoiles obtenues au Chili (Moreno et Stock, 1964) et en Australie (Przybylski, 1964) et qui indiquent clairement l'influence de l'éruption en mars 1963.

3. Conclusions

Les résultats de notre discussion sont résumés dans le tableau III. On peut en tirer les conclusions suivantes :

(1) Dans les cas examinés, on a trouvé 7 cas de diminution brusque de la luminosité des éclipses au voisinage du minimum de l'activité solaire.

(2) Dans 2 cas (no. 2 et 7), cette diminution s'explique au moins en partie par la pollution atmosphérique due à une forte éruption volcanique.

(3) Dans 2 autres cas (no. 1 et 6), on a pu séparer l'action volcanique de celle de l'activité solaire en faveur de cette dernière.

(4) Dans ces conditions, nous pouvons accepter la relation de cause à effet entre l'activité solaire et la luminosité des éclipses connue sous le nom de la loi de Danjon.

L'examen de nos figures permet d'y ajouter en plus, les points suivants:

(5) La diminution de la luminosité des éclipses n'est pas accompagnée de la diminution simultanée de la transparence atmosphérique dans les cas (figure 3 et 4) où cette dernière a été mesurée.

(6) Les maxima de la luminosité où ceux-ci ont été mesurés (figures 5 et 6) dépassent les valeurs théoriques calculées dans l'atmosphère de Rayleigh (pure) et a fortiori, celles dans l'atmosphère réelle contenant de l'ozone (Link, 1960, 1969b).

Quant au mécanisme interne de la loi de Danjon, il semble, en accord avec les (5) et (6) points, que c'est une lumière supplémentaire à la lumière solaire transmise par l'atmosphère terrestre qui varie au cours du cycle solaire. Aucune des explications proposées, c'est-à-dire la diffusion dans l'atmosphère terrestre (Link, 1969c) de la lumière solaire ou la diffusion dans une couche élevée proposée par Vassy (1956), ne sont suffisantes du point de vue quantitatif (Link, 1974). Il en est de même pour la luminescence de la surface lunaire excitée par les radiations solaires (Link, 1972), à moins de supposer les différences drastiques entre les conditions lunaires et celles des laboratoires terrestres où l'on a pu examiner les échantillons lunaires.

La question reste donc ouverte, à savoir quelle est l'origine des variations décrites par loi de Danjon, ainsi que d'autres phénomènes similaires observés sur la Lune éclipsée (Link, 1972).

Bibliographie

- Bouška, J. et Mayer, P.: 1965, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **16**, 252
Danjon, A.: 1920, *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* **171**, 1127, 1207.
Danjon, A.: 1925, *L'Astronomie* **39**, 272.
Deirmendjian, D.: 1973, *Adv. Geophys.* **16**, 267.
Deirmendjian, D.: 1974, communication privée.
de Vaucouleurs, G.: 1944, *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* **218**, 655.
de Vaucouleurs, G.: 1954, *Doc. Observ.* **7**, No. 1.
Dubois, J.: 1953, *L'Astronomie* **67**, 44.
Dubois, J.: 1962, *L'Astronomie* **76**, 190.
Dubois, J. et Poumeyrol, F.: 1952, *L'Astronomie* **66**, 105.
Dyer, A. J. et Hicks, S. B.: 1968, *Quart. J. Meteorol. Soc. London* **94**, 545.
Fisher, W.: 1924, *Smiths. Misc. Coll.* **76**, No. 9.
Hand, J. F.: 1939, *Monthly Weather Rev.* **67**, 338.
Kimball, H. H.: 1924, *Monthly Weather Rev.* **52**, 527.
Lamb, H. H.: 1970, *Phil. Trans. Roy Soc. London A* **266**, No. 1178.
Link, F.: 1956, *Die Mondfinsternisse*, Akad. Verlagsges., Leipzig, p. 100.
Link, F.: 1960, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* **11**, 13.
Link, F.: 1961, *Studia Geophys. Geodaet.* **5**, 64.
Link, F.: 1969a, *Eclipse Phenomena*, Springer, Berlin, p. 81.
Link, F.: 1969b, *Eclipse Phenomena*, Springer, Berlin, p. 98.
Link, F.: 1969c, *Eclipse Phenomena*, Springer, Berlin, p. 42.
Link, F.: 1972, *The Moon* **5**, 265
Link, F.: 1974, *The Moon* **11**, 137.
Marin, M.: 1963, *L'Astronomie* **77**, 453.
Matsushima, S.: 1967, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **79**, 178.
Matsushima S. et Zink, J. R.: 1964, *Astron. J.* **69**, 481.
Matsushima, S., Zink, J. R., et Hansen, J. E.: 1966, *Astron. J.* **71**, 103.
Maunder, E. W.: 1921, *J. Brit. Astron. Assoc.* **31**, 346.
Meinel, M. P. et Meinel A. B.: 1963, *Science* **142**, 582.
Moreno, H. et Stock, J.: 1964, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **76**, 55.
Przybylski, A.: 1964, *Acta Astron.* **14**, 285.
Rimmer, W. B.: 1937, *Gerlands Beitr. Geophys.* **50**, 388.
Vassy, E.: 1956, *La Météorologie* **8**, 1.
Volz, F. E.: 1964, *Science* **144**, 1121.
Waldmeier, M.: 1961, *The Sunspot Activity*, Schulthess, Zürich.