

Occultation et éclipse mutuelles des satellites de Jupiter J-1 et J-2 le 30 août 1973

J. E. Arlot

Bureau des Longitudes, Paris

H. Camichel

Observatoire du Pic-du-Midi, Toulouse

F. Link

Institut d'Astrophysique, Paris

Reçu le 6 mai 1974

Mutual Occultation and Eclipse of Jupiter Satellites J-1 and J-2 on August 30th 1973

Summary. The mutual occultation of Jupiter satellites J-2 by J-1 on August 30th 1973 gave us the opportunity to obtain the light curve of the phenomenon. We used the photoelectric photometer designed for planetary photometry attached to the 107 cm telescope at the Pic-du-Midi Observatory. The principal aim of our work was the determination of the radii of both satellites. As the photometrical values are dimensionless we need to introduce the angular scale. This can be done using the ephemeris or other angular values obtained from an independent method.

The ephemeris values based on several years of theoretical work at the Bureau des Longitudes is in agreement with observations giving the same length of the occultation. This means that the sum of radii $R_1 + R_2 = 1.076''$ is essentially correct within the limits of $\pm 0.01''$.

For the reduction of the light curve we used two methods. Both start from the above given sum $1.076''$. The first method uses the value of R_1 obtained with a high degree of precision by Taylor (1972) from the occultation of β Sco by J-1. By simple

difference we obtained then R_2 . No assumption of photometrical uniformity of J-2 is needed. In other words the moments of contacts determined by the photometry of both phenomena and their ephemeris enable us to get the values of R_1 and R_2 .

The second method assumes the uniformity of J-2. Trying different pairs of values of R_1 and R_2 which satisfy the condition $R_1 + R_2 = 1.076''$ we computed the light curves and the best fit with the observed curve was the adopted as the final solution, which is identical with the result of the first method, namely $R_1 = 1830 \pm 2$ km and $R_2 = 1457 \pm 60$ km. They are within the limits of errors of classical values (Dollfus, 1970).

In addition we observed on the same night the eclipse of J-2 by J-1. Both phenomena gave nearly the same correction of the ephemeris $O - C = -1^m$. The greatest part of it originates from the difference $ET - UT = +44^s$.

Key words: photometry of satellites — radii

1. Introduction

Les diamètres des petits corps tels que les satellites galiléens de Jupiter sont connus avec une précision assez faible. Les mesures récentes obtenues au micromètre à double image et au discomètre présentent entre elles des écarts de l'ordre de $1/10$ (Dollfus, 1970) dus aux erreurs systématiques entre les différents procédés de mesures.

Il est donc intéressant de contrôler ces résultats par des méthodes utilisant des principes différents. Lors de la dernière opposition de Jupiter en 1973, se sont

produites des occultations et éclipses mutuelles de ces satellites (Arlot, 1972). La mesure photométrique de ces phénomènes permet d'obtenir quelques résultats intéressants.

2. Ephéméride des phénomènes

La théorie utilisée pour le calcul des phénomènes mutuels des satellites galiléens, est la théorie de Sampson (1921). Cette théorie déjà ancienne a été très bien

Tableau 1

30.VIII.1973	Début	Milieu	Fin
Occultation de J-2 par J-1			
Heure T.U.	21 ^h 11 ^m 20,7 ^s	21 ^h 15 ^m 40,5 ^s	21 ^h 20 ^m 0,2 ^s
Distance angulaire	1,082"	0,160"	1,070"
Satellite J-1			
Coordonnées équat. relatives au centre de Jupiter	x + 132,338"	+ 132,497"	+ 132,640"
	y - 36,209"	- 36,265"	- 36,317"
Diamètre apparent		1,1978"	
Distance à la Terre U.A.		4,2130	
Satellite J-2			
	x + 133,328"	+ 132,454"	+ 131,577"
	y - 36,647"	- 36,419"	- 36,191"
Diamètre apparent		0,9547"	
Distance à la Terre U.A.		4,2168	
Eclipse de J-2 par l'ombre de J-1			
Pénombre	22 ^h 37 ^m 56,0 ^s		22 ^h 49 ^m 44,5 ^s
Ombre	22 39 25,4	22 ^h 43 ^m 46,8 ^s	22 48 13,1
Rayon de la pénombre au niveau de J-2		2312 km	
Rayon de l'ombre au niveau de J-2		1351 km	
Surface de J-2 dans l'ombre		84,7 %	
Pendant l'occultation la distance des centres J-1 et J-2 est donnée, compte-tenu de la correction de l'éphéméride $O-C=1^m$ (§ 4) par:			
$\Delta = \sqrt{0,0256'' + 1,676'' \times 10^{-7} (t_s - 21^h 14^m 40^s 5)^2}$		pour la distance 4,215 U.A. à la Terre au milieu de l'occultation	
$\Delta = \sqrt{0,0168'' + 1,100'' \times 10^{-7} (t_s - 21^h 14^m 40^s 5)^2}$		pour la distance 5,203 U.A. à la Terre dans les conditions moyennes	

étudiée ces dernières années au Bureau des Longitudes, où l'on a corrigé certaines erreurs, amélioré la précision et programmé le calcul des coordonnées. Les résultats de ces calculs relatifs aux phénomènes mutuels du 30 août 1973 sont donnés dans le Tableau 1.

3. Courbes de lumière

Les mesures ont été faites à l'Observatoire du Pic-du-Midi avec un photomètre à photomultiplicateur Lallemand, adapté à la mesure de la luminance des petites surfaces planétaires. Grâce à une lame partiellement réfléchissante intercalée dans le faisceau lumineux, on peut maintenir l'image du satellite au centre du diaphragme de 20" de diamètre et en même temps surveiller l'évolution du phénomène observé. Le photomètre était monté sur le télescope de 107 cm de diamètre travaillant en Cassegrain avec une lentille de Barlow amenant la distance focale à 60 m.

On a utilisé le filtre jaune Schott BG 5 qui avec la courbe de sensibilité spectrale du photomultiplicateur donne le domaine spectral qui se situe entre 5300 Å et 6500 Å. L'emploi du filtre diminue en particulier la diffusion de Rayleigh. Le fond du ciel qui servait de zéro optique était dans les conditions ci-dessus $4,0 \pm 0,2$ divisions soit de $5\% \pm 0,3\%$ de la déviation maximale pendant l'occultation. Le centre du champ se trouvait à 6 rayons de Jupiter du centre de celui-ci.

La courbe moyenne de lumière d'après les observations est représentée sur la fig. 1 où nous avons superposé ses deux moitiés. Les différences sont dues, soit à l'existence de taches sur J-2, soit aux variations de la transparence pendant les mesures. Quant à la première possibilité, nous remarquerons que le satellite J-2 est le moins taché des quatre (Dollfus *et al.*, 1974) montrant une faible bande équatoriale sombre (Camichel *et al.*, 1943).

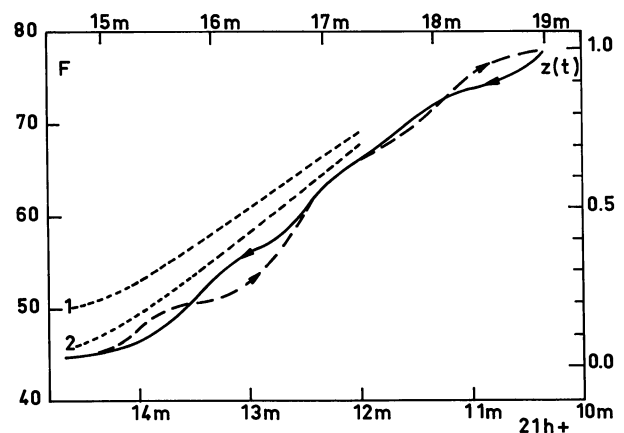


Fig. 1. Courbes de lumière observées lors de l'occultation de J-2 par J-1 le 30 août 1973. Sur l'axe vertical le flux lumineux: F en déviations et $z(t)$ normalisé à $F=1$ en dehors de l'occultation; 1 et 2 sont les courbes de lumière théoriques de la méthode II

4. Données de base lues sur les courbes

Sur les enregistrements, nous avons lu certaines données de base qui nous serviront dans la suite. Ce sont:

La somme des flux lumineux des deux satellites sur la courbe d'occultation en moyenne avant et après l'occultation $F_1 + F_2 = 77,7$ de divisions de la feuille d'enregistrement.

Les flux séparés mesurés environ $1^h 1/2$ après l'occultation, quand les deux satellites se sont suffisamment séparés:

$$F'_1 = 84,8 \quad F'_2 = 66,8 \quad \text{donc} \quad F'_1 + F'_2 = 151,6. \quad (1)$$

La différence entre les deux sommes 77,7 et 151,6 est due pour la plus grande part au changement de sensibilité de l'appareil de mesure introduit par l'observateur et aussi à la modification des conditions atmosphériques entre les deux mesures. De toute façon, pour obtenir les flux séparés des deux satellites dans les conditions de l'occultation, il faut multiplier les valeurs de F'_1 et F'_2 par le rapport $77,7 : 151,6 = 0,512$. On obtient ainsi:

$$F_1 = 43,5 \quad \text{et} \quad F_2 = 34,2. \quad (2)$$

Dans toutes ces déterminations, nous estimons la précision de $\pm 1^d$ en pleine déviation, vu la qualité des enregistrements. On l'a déterminée en traçant plusieurs fois et indépendamment la courbe moyenne à travers les fluctuations de la courbe enregistrée avec une faible constante de temps.

Les instants principaux des phénomènes lus sur les courbes sont contenus dans le Tableau 2.

Nous estimons que tous ces instants sont lus avec une erreur inférieure ± 5 s. La correction de l'éphéméride O-C est donc très voisine de -1 min.

A ce propos, nous pouvons citer les résultats d'une étude (Arlot, 1974) basée sur les positions photographiques des satellites obtenues en USA, lors de l'opposition 1968 qui nous a permis de déterminer, à cette date, l'avance de chaque satellite sur l'éphéméride. Nous en donnons ici les valeurs à titre indicatif:

	J-1	J-2	J-3
O-C	$-1^m 15^s \pm 50^s$	$-0^m 25^s \pm 15^s$	$-1^m 35^s \pm 1^m$
	J-4		
	$-1^m 55^s \pm 1^m 10^s$		

Une part importante de ce décalage provient de la différence des temps $TE - TU 2$ qui atteignait 40^s en 1968 et près de 44^s en 1973.

Tableau 2

		Observation	Calcul	O - C
Occultation	Début	$21^h 10^m 20^s$	$21^h 11^m 21^s$	$-01^m 01^s$
	Milieu	14 40	15 41	$-01 01$
	Fin	19 00	20 00	$-01 00$
Eclipse	Milieu	22 42 45	22 43 47	$-01 02$

5. Discussion des mesures

Etant relatives, nos mesures photométriques ne permettent pas à elles seules d'obtenir les valeurs des rayons R_1 et R_2 . Pour cela, il faut introduire dans le problème une échelle angulaire, donnée par ex. par l'éphéméride ou toute autre indication angulaire. Dans cet ordre d'idées, nous avons essayé deux méthodes:

I. La première méthode est basée uniquement sur la détermination photoélectrique des contacts, soit pendant l'occultation mutuelle de J-2 par J-1, soit pendant l'occultation de β Sco-C par J-1, le 14 mai 1971 (Taylor, 1972). On s'abstient de toute hypothèse sur l'uniformité photométrique de la surface de J-2 et de toute utilisation des mesures classiques des satellites.

Comme le montre l'accord entre les durées observée et calculée de l'occultation (Tableau 2), la distance moyenne d'après l'éphéméride $(1,082'' + 1,070'') : 2 = 1,076''$ des satellites J-1 et J-2 au moment de leur contact, est essentiellement correcte et correspond à la somme des rayons apparents $R_1 + R_2 = 1,076''$.

On peut alors utiliser les résultats obtenus par Taylor pour R_1 , à savoir: $R_1 = 0,599'' \pm 0,001''$ à la distance au moment de l'occultation de 4,215 U.A., ce qui avec:

$$R_1 + R_2 = 1,076'' \pm 0,02 \quad (3)$$

conduit à:

$$R_2 = 0,477'' \pm 0,02''. \quad (4)$$

L'erreur de l'éphéméride sur la distance minimale Δ_0 influe relativement peu sur la durée de l'occultation qui est importante dans l'application de cette méthode. En effet, la durée de l'occultation est proportionnelle à $2\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - \Delta_0^2}$ et si au lieu de $\Delta_0 = 0,160''$ donnée par l'éphéméride, on avait la valeur $\Delta'_0 = 0,216''$, la quantité ci-dessus serait diminuée de $2,128''$ à $2,108''$, donc de 1% ce qui se traduit par 5^s d'erreur dans la durée de l'occultation — erreur encore compatible avec la précision de lecture sur la bande d'enregistrement. Cette erreur de lecture donne d'autre part l'estimation de l'erreur sur la somme $R_1 + R_2$ égale à $\pm 0,02''$ donnée plus haut.

II. Dans la seconde méthode, on utilise toute la courbe de lumière. Ce procédé permet de trouver les valeurs de R_1 et de R_2 indépendamment de toute hypothèse sur la valeur de R_1 , mais en revanche, il suppose une luminance uniforme pour le disque de J-1 et comme avant la connaissance de l'éphéméride.

Calculons pour divers couples de valeurs R_1 et R_2 une série de courbes de lumière théoriques donnant le flux lumineux émis par J-2 en fonction du temps au cours de son occultation. Celle de ces courbes qui se rapproche le plus de la courbe expérimentale donne les valeurs correctes de R_1 et R_2 .

Les lectures sur la courbe d'enregistrement nous font connaître les flux F_1 et F_2 pour chaque satellite

séparément et, [§ 4] le flux à l'instant t quelconque pendant l'occultation correspondant à la surface totale de J-1 plus la surface visible de J-2.

Si s désigne la surface de J-2 cachée par J-1, la surface de J-2 qui envoie de la lumière dans le photomètre est égale à $\pi R_2^2 - s$, cette lumière est donc proportionnelle à la différence $F - F_1$, et on peut écrire:

$$\frac{F - F_1}{F_2} = \frac{\pi R_2^2 - s}{\pi R_2^2} = 1 - \frac{s}{\pi R_2^2}. \quad (5)$$

Dans la suite, la courbe expérimentale sera donc:

$$z(t) = \frac{F - F_1}{F_2} \quad (6)$$

et la courbe théorique

$$z'(t) = 1 - \frac{s}{\pi R_2^2} \quad (7)$$

qui nécessite le calcul de s en fonction du temps.

La surface s commune à deux cercles, se calcule par des formules de trigonométrie élémentaire; elles font intervenir la distance (Δ) des centres durant toute la durée de l'occultation, calculée à partir de l'éphéméride (§ 2).

La somme des rayons $R_1 + R_2$ étant connue à 1/1000 par les instants du début ou de la fin de l'occultation¹⁾, il suffit d'essayer des couples de valeur R_1 et R_2 , tel $R_1 + R_2 = 0,872''$ c'est-à-dire $2R_2 = 1,744 - 2R_1$.

Nous avons choisi:

$2R_1 = 0,870''$	$2R_2 = 0,874''$	courbe 1
0,930	0,814	courbe 2
0,950	0,794	courbe 3
0,970	0,774	courbe 4
0,990	0,754	courbe 5

La valeur $2R_1 = 0,870''$ est le résultat des mesures faites au discomètre et la valeur $2R_1 = 0,930''$ est celle des mesures au micromètre à double image (Dollfus, 1970). Ni l'une ni l'autre de ces valeurs ne peuvent convenir, les courbes correspondantes ayant des minima trop élevés comme il est indiqué sur la fig. 1 par les chiffres 1 et 2. Seuls les couples 3, 4 et 5 montrent des valeurs acceptables comme l'indiquent les différences O-C (Fig. 2), calculées par rapport à la courbe 4 correspondant à $2R_1 = 0,970''$ (valeur de Taylor) et $2R_2 = 0,774$. On retrouve ainsi le diamètre de Taylor et, par suite la solution précédente I à condition d'accepter les prémisses formulées au début.

En résumé, les méthodes d'observations photoélectriques d'occultations ont permis d'obtenir de nouvelles valeurs des rayons:

$\bar{R}_1 = 1830 \text{ km} \pm 2 \text{ km}$	
$\bar{R}_2 = 1457 \text{ km} \pm 60 \text{ km}$	en comparaison avec les résultats classiques (Dollfus, 1970).
$R_1 = 1750 \text{ km} \pm 75 \text{ km}$	
$R_2 = 1550 \text{ km} \pm 75 \text{ km}$	

¹⁾ Toutes les valeurs angulaires sont réduites à la distance 5,203 U.A.

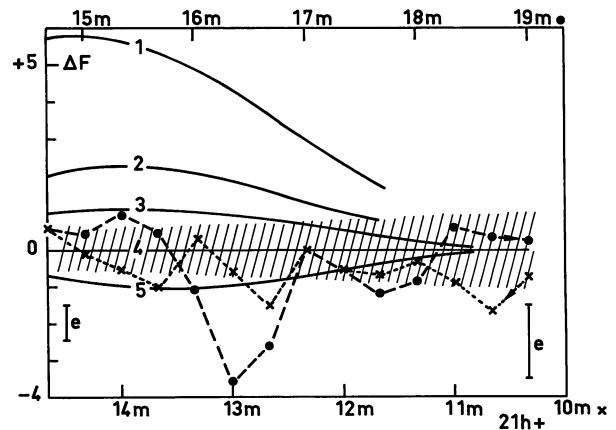


Fig. 2. Différence ΔF des cas 1, 2, 3 et 5 par rapport au cas 4 (= méthode I); les croix et les cercles représentent les mesures et la surface hachurée indique la fourchette estimée des erreurs de mesures (e)

Notons à ce propos que nos valeurs se placent très approximativement à quelques kilomètres près dans les fourchettes des mesures classiques.

Les occultations d'une étoile brillante par un des satellites de Jupiter sont très rares, peut-être une par mille ans, tandis que les occultations mutuelles des satellites se produisent tous les 6 ans (Arlot, 1973). On peut donc espérer, dans les années à venir (1979, 1985, etc...) pouvoir observer d'autres occultations mutuelles et en déduire les rayons des satellites exempts des erreurs systématiques dont sont entachées les méthodes classiques.

6. Eclipse de J-2 par l'ombre de J-1

La courbe de lumière de l'éclipse est au début perturbée par les défauts de guidage dûs au mauvais fonctionnement des mouvements lents du télescope, mais environ 3/4 de la courbe sont utilisables. Le milieu de l'éclipse a pu ainsi être déterminé (Tableau 2) et la correction $O-C = -01^m02^s$ est en bon accord avec celle trouvée pendant l'occultation. Le début et la fin de l'éclipse sont en principe très mal définis du fait qu'en ce moment le disque de J-2 entre ou sort de la partie périphérique de la pénombre où la variation de l'éclairement solaire est très lente.

Le flux au milieu de l'éclipse étant $5,8 \pm 0,2$ divisions, ce qui donne avec le flux $F'_2 = 66,8 \pm 2,0$, la fraction $8,7\% \pm 0,4\%$. D'après l'éphéméride (Tableau 1) 15,3% du disque de J-2 restaient en ce moment émergés de l'ombre tout en restant entièrement plongés dans la pénombre. C'est à celle-ci qu'il faut attribuer sans doute la différence entre 8,7% et 15,3% trouvée plus haut.

7. Quelques implications

En adoptant les nouvelles valeurs des rayons $\bar{R}_1$ et $\bar{R}_2$, on est naturellement amené à modifier tous les autres

Tableau 3

	Harris (1961)			Masses de Sitter (1931)	$\bar{\delta}$
	R	p	$\bar{p}$		
J-1	1625	0,92	0,72	$7,23 \times 10^{25}$ g	$2,83 \text{ g cm}^{-3}$
J-2	1440	0,83	0,81	$4,71 \times 10^{25}$ g	$3,63 \text{ g cm}^{-3}$

paramètres des satellites où interviennent ces rayons. C'est en premier lieu le cas de la densité et de l'albédo.

C'est ainsi si la densité δ a été calculée à partir d'un rayon R la nouvelle valeur de la densité sera :

$$\bar{\delta} = \delta \left(\frac{R}{\bar{R}} \right)^3$$

et de même pour l'albédo géométrique :

$$\bar{p} = p \left(\frac{R}{\bar{R}} \right)^2.$$

Autrement dit, les faibles écarts en R se traduisent par des corrections assez importantes de δ et de p . Nous avons alors calculé ces nouvelles valeurs contenues dans le Tableau 3.

On note en particulier la réduction appréciable de l'albédo de J-1. Les nouvelles masses obtenues par la sonde Pioneer 10 pourront encore modifier les $\bar{\delta}$ ci-dessus.

Conclusions

1°) La photométrie photoélectrique des occultations mutuelles des satellites de Jupiter permet d'obtenir les valeurs de leurs rayons exemptes des erreurs systématiques inhérentes aux mesures classiques.

2°) Dans la mesure où l'on peut admettre l'uniformité photométrique de J-2, le rayon de J-1 obtenu par Taylor se trouve confirmé.

3°) Nos résultats relatifs aux rayons de J-1 et de J-2 se placent respectivement à la limite supérieure et inférieure de la fourchette des mesures classiques.

4°) La correction de l'éphéméride est voisine de $O-C = -1^m$.

5°) Nous n'avons pu observer qu'une seule occultation, et il nous paraît donc souhaitable, que lors des prochaines occultations en 1979, cette méthode photométrique soit reprise et utilisée de manière à saisir le plus grand nombre possible de ces phénomènes.

Bibliographie

- Arlot, J.E. 1973, *L'Astronomie* **87**, 287
 Arlot, J.E. 1974, en manuscrit
 Camichel, H., Gentili, M., Lyot, B. 1943, *L'Astronomie* **57**, 58
 Dollfus, A. 1970, *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*, Ed. Dollfus, Academic Press, London, p. 126
 Dollfus, A., Murray, J.B. 1974, *Exploration of the Planetary System*, IAU Symposium No. 65, Ed. A. Woszczyk et C. Iwaniszewski, Reidel p. 409 (sous presse)
 Harris, D.L. 1961, *Planet and Satellites III*, Ed. Kuiper, University Press Chicago, p. 310
 Sampson, R.A. 1921, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **63**
 Sitter, W. de 1931, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **91**, 706
 Taylor, G.E. 1972, *Icarus* **17**, 202

J. E. Arlot
 Bureau des Longitudes
 3 rue Mazarine
 F-75006 Paris, France

H. Camichel
 Observatoire du Pic-du-Midi
 F-65200 Bagnères-de-Bigorre, France

F. Link
 I.A.P.
 98 bis, Bd. Arago
 F-75014 Paris, France