

DÉTERMINATION DES MASSES DES PLANÈTES

(Invited Review Paper)

JEAN KOVALEVSKY
Bureau des Longitudes, Paris

(Presented at IAU Colloquium No. 9, 'The IAU System of
Astronomical Constants', Heidelberg, Germany, August 12-14, 1970.)

1. Introduction

La présente revue ne donne pas une liste complète des déterminations des masses planétaires. La liste la plus complète récemment publiée est due à Kozlovskaya (1963); elle contient toutes les déterminations effectuées entre 1826 (masse de Jupiter par Encke) et 1961.

Depuis, quelques autres listes ont été publiées. Elles sont incomplètes, car elles ont surtout pour but de proposer de valeurs des masses qui apparaissaient comme étant les plus probables à ces auteurs. Signalons ainsi les listes de Böhme et Fricke (1965) et de Kulikov (1965), préparées pour le colloque sur les constantes fondamentales de Paris (Symposium UAI N° 21). Une liste analogue a été préparée par Clemence (1966) pour l'UAI. Citons encore les revues préparées par le Jet Propulsion Laboratory (Mulholland, 1967) et une autre liste, rassemblée il y a deux ans, qui vient d'être publiée par l'auteur (Kovalevsky, 1970). La présente synthèse est une suite de ce premier travail, compte-tenu des nombreuses nouvelles déterminations qui ont été effectuées depuis deux ans.

Nous avons résumé notre discussion sous forme de tableaux se rapportant successivement à chacune des planètes. Ils sont constitués de la façon suivante.

(1°) *Nom de la planète* et valeur de l'inverse de la masse dans le système de constantes actuellement adopté dans les Ephémérides internationales.

(2°) *Liste des déterminations antérieures à 1964* qui nous ont paru être les plus significatives ou les plus précises. On s'est efforcé de donner le résultat d'au moins une détermination par chaque méthode (perturbations séculaires des planètes, mouvement d'une petite planète, mouvement d'un satellite ou d'une comète, etc.). Les erreurs données sont celles qui ont été publiées par les auteurs. Elles doivent être considérées avec la plus grande prudence. Il s'agit en effet d'erreurs internes et des erreurs systématiques peuvent être importantes; dans d'autres cas, il est difficile de se rendre compte de l'effet de la suppression des observations aberrantes. Nous ne les donnons donc qu'à titre indicatif et elles ne doivent pas servir à une pondération. Elles reflètent cependant en général (il y a des exceptions!) la précision des méthodes employées.

(3°) *Liste des déterminations récentes*. Malgré un effort pour être complet, cette liste peut présenter des lacunes. Elle pourra être complétée, si d'autres informations sont données au cours de ce colloque. Lorsque plusieurs déterminations consécutives ont

été basées sur le même matériel d'observation, seule la dernière en date est citée. C'est le cas en particulier des réductions successives des observations des sondes Mariner.

(4°) *Remarques et discussion.* Cette discussion a été facilitée par les discussions précédentes, comme celles de Clemence (1966), Mulholland (1967), Melbourne *et al.* (1968), Melbourne (1969) et Kovalevsky (1970). Mais elle est surtout inspirée par la lecture des travaux cités. A titre de conclusion, et plutôt que de suggérer une valeur précise, nous avons proposé une fourchette à l'intérieur de la quelle la vraie valeur nous semble devoir se trouver. Nous avons été volontairement prudent pour les valeurs tirées d'une seule technique.

2. Mercure

Newcomb: $1/m = 6000000$

$1/m$	Auteur	Méthode
6480000 ± 350000	Brouwer (1950)	Terre: perturb. sécul.
5970000 ± 450000	Duncombe (1958)	Vénus (1750-1949)
5890000 ± 170000	Makover et Bokhan (1961)	Comète Encke (1898-1911 et 1931-54)
6021000 ± 53000	Ash <i>et al.</i> (1967)	Planètes inférieures (radar et mérid. 1950-65)
5983000 ± 10000	Melbourne et O'Handley (1968)	Vénus: distances radar
5935000 ± 520000	Null et Lieske (1969) Lieske et Null (1969)	Icare (1949-68)
5941000 ± 9600	Null et Lieske (1969)	Icare et planètes inférieures (radar, photo et méridien)

Remarques

Il apparaît que la valeur de Newcomb est étonnamment bonne. Les deux dernières déterminations sont accompagnées d'erreurs sous-estimées. Ce fait est noté par Melbourne (1970) en ce qui concerne les distances radar. D'autre part, Null et Lieske (1969) trouvent des valeurs allant de 5865000 ± 48000 et 7652000 ± 211000 si on prend seulement les observations radar ou seulement les observations méridiennes. Ce fait fait craindre des erreurs systématiques dans l'évaluation relative des poids affectés à chaque type d'observation.

Valeur probable

$$5900000 < 1/m < 6100000$$

3. Vénus

Newcomb: $1/m = 408\,000$

$1/m$	Auteur	Méthode
$409\,300 \pm 1400$	Clemence (1943)	Perturbations périod de Mercure (1765–1937)
$408\,000 \pm 800$	Brouwer (1950)	Perturbations sécul. de Mercure et la Terre
$408\,945 \pm 300$	Duncombe (1965)	Mars (1751–1956)
$408\,250 \pm 120$	Ash <i>et al.</i> (1967)	Planètes inférieures (radar et mérid. 1950–65)
$408\,505 \pm 6$	Anderson (1967)	Mariner 2
$408\,523 \pm 0,3$	Anderson <i>et al.</i> (1968)	Mariner 5
$408\,521,8 \pm 1$	Anderson et Efron (1969)	Combinaison Mariner 2 et 5
408 735	Laubscher (1970, cité par Seidelmann pendant le Colloque)	Mars (1750–1969), radar et méridien.

Remarques

Les observations Doppler des sondes Mariner 2 et 5 ont permis de rétablir avec une précision de quelques 10^{-4} Hz la fréquence de réception de l'émission de la sonde sur environ 30 MHz. Ceci représente des observations de précision relative mille fois meilleure que celle des observations astronomiques classiques. La précision du résultat final est fonction de cette amélioration, surtout depuis que Anderson et Efron (1969) ont utilisé de meilleures éphémérides planétaires, améliorées grâce à des mesures radar effectuées à la même époque.

Valeur probable

$$408\,510 < 1/m < 408\,530$$

4. Terre et Lune

Newcomb: $1/m = 329\,390$

Système UAI 1964 $1/m = 328\,912 \pm 20$

Cette dernière valeur fait partie du nouveau système de constantes astronomiques de l'UAI. Les principales déterminations effectuées depuis sont les suivantes.

$1/m$	Auteur	Méthode
$328\,899 \pm 15$	Rabe et Francis (1967)	Rediscussion de Eros (1926–65)
$328\,894 \pm 30$	Zech (1968)	Rediscussion de Eros (1926–65)
$328\,915 \pm 4$	Lieske (1968)	Eros (1893–1966)
328927	Schubart (1969)	Amor (1932–64)
$328\,900 \pm 50$	Ash <i>et al.</i> (1967)	Planètes inférieures (radar et mérid. 1950–65)
$328\,900 \pm 1$	Sjogren <i>et al.</i> (1967)	Compilation: Mariner 2 Ranger et distances radar de Vénus
$328\,900,2 \pm 0,4$	Melbourne (1970)	Unité astronomique par radar; GE et GM par les sondes lunaires

Remarques

La remise en question de la valeur de la masse de la Terre adoptée en 1964 par l'UAI équivaldrait à changer complètement ce système. On devrait donc conserver la valeur $1/328\,912$ bien que les méthodes spatiales aient montré qu'elle est légèrement trop faible.

Valeur probable

$$328\,895 < 1/m < 328\,905$$

5. Mars

Newcomb: $1/m = 3093\,500$

$1/m$	Auteur	Méthode
3110000 ± 7700	Rabe (1950)	Perturbations d'Eros
3094000 ± 3000	Wilkins (1967)	Deimos (1877–1928)
$3111\,200 \pm 9000$	Ash <i>et al.</i> (1967)	Planètes inférieures (radar et mérid. 1950–65)
3098714 ± 5	Null (1969)	Mariner 4
3098697 ± 72	Anderson <i>et al.</i> (1970)	Mariner 6

Remarques

La faiblesse de la masse de Mars et la difficulté d'observation des satellites font que les méthodes astronomiques ont toujours donné des résultats très incertains. On est donc conduit à ne retenir que la détermination provenant des observations des sondes Mariner. D'après Anderson *et al.* (1970), une fuite d'électrolyte dans la batterie a introduit de fortes forces non gravitationnelles qui ont rendu impossible la détermination de la masse de Mars avec Mariner 7. Même dans Mariner 6, il y avait des jets de gaz, ce qui explique que la meilleure détermination est celle qui utilise les observations de Mariner 4.

Valeur probable

$$3098\,650 < 1/m < 3098\,750$$

6. Petites Planètes

Les masses des petites planètes ne font pas partie du système des masses planétaires. Nous ne donnons que pour mémoire les deux seules déterminations qui ont été faites.

Vesta: par Hertz (1966): $1/m = 8\,300\,000\,000 \pm 400\,000\,000$

méthode: perturbations d'Aréthée.

Cérès: par Schubart (1970): $1/m = 1\,500\,000\,000 \pm 100\,000\,000$

méthode: perturbations de Pallas.

On notera que ces deux valeurs, obtenues pour deux planètes de dimensions voisines, sont incompatibles. Le calcul des densités semble montrer que la seconde détermination est plus vraisemblable.

7. Jupiter

Newcomb: $1/m = 1047,355$

$1/m$	Auteur	Méthode
$1047,378 \pm 0,121$	Hill (1898)	Saturne (1751–1888)
$1047,50 \pm 0,06$	De Sitter (1915)	Satellites galiléens
$1047,57 \pm 0,06$	Osten (1928)	Astéroïde Valentine
$1047,41 \pm 0,40$	Kulikov (1950)	8 ^e Satellite de Jupiter
$1047,39 \pm 0,03$	Clemence (1961)	Rediscussion des données de Newcomb
$1047,335 \pm 0,050$	Herget (1968)	8 ^e satellite de Jupiter
$1047,386 \pm 0,041$	Bec (1969)	9 ^e satellite de Jupiter
$1047,366 \pm 0,004$	Klepczynski (1969)	Astéroïdes 10, 24, 31, 48, 52, 57 et 65 (voir ci-dessous)
$1047,349 \pm 0,016$	Scholl (1971)	Astéroïdes 153, 279 et 334: moyenne des résultats avec les poids respectifs 1,1 et 2. avec la masse de Saturne égale à 3498,5.

Remarques

La détermination de Klepczynski a été précédée de déterminations obtenues en considérant séparément ces sept astéroïdes :

Astéroïde	$1/m$	Auteur
10 Hygeia	$1047,351 \pm 0,006$	Klepczynski (1969)
24 Thémis	$1047,359 \pm 0,010$	Klepczynski (1969)
31 Euphrosyne	$1047,372 \pm 0,006$	Klepczynski (1969)
52 Europa	$1047,337 \pm 0,027$	Klepczynski (1969)
48 Doris	$1047,340 \pm 0,016$	Zielenbach (1969)
57 Mnemosyne	$1047,356 \pm 0,004$	Fiala (1968)
65 Cybèle	$1047,387 \pm 0,004$	O'Handley (1967)

La dispersion assez grande de tous ces résultats indique que la détermination moyenne de Klepczynski a conduit à une erreur probable sous évaluée. Quoiqu'il en soit, la valeur de Newcomb est confirmée d'une façon remarquable par les travaux modernes.

Valeur probable

$$1047.34 < 1/m < 1047.39^*$$

* La discussion au cours du colloque a montré que cet intervalle devrait être élargi à $1047,31 < 1/m < 1047,42$.

8. Saturne*Newcomb*: $1/m = 3501,6$

<i>1/m</i>	Auteur	Méthode
3499,9 ± 1,2	Gaillot (1913)	Jupiter (1750–1907)
3497,64 ± 0,27	Hertz (1953)	Jupiter (1884–1948)
3494,8 ± 2,0	Jeffreys (1954)	Satellites (1924–37)
3499,7 ± 0,4	Clemence (1960)	Jupiter (1779–1941)
3498,7 ± 0,2	Klepczynski <i>et al.</i> (1970)	Jupiter (1913–68)
3498,5	Marsden (1970)	Hidalgo
3497,6 (provisoire)	Carr et Herget, cités par Marsden (1970)	Comète Schwassmann – Wachmann I

Remarques

On constate une amélioration certaine par rapport aux déterminations anciennes, le progrès étant dû essentiellement à une meilleure discussion des observations. La masse adoptée par Newcomb, due à Bessel (1833), est certainement trop faible. L'incertitude du résultat est encore assez grande.

Valeur probable

$$3497 < 1/m < 3500$$

9. Uranus

Newcomb: $1/m = 22869$

$1/m$	Auteur	Méthode
$23\,239 \pm 89$	Hill (1898)	Saturne (1751–1888)
$22\,802 \pm 101$	Van den Bosch, 1927 (1)	Satellites
$22\,934 \pm 6$	Harris, 1950 (2)	Satellites
$22\,692 \pm 33$	Klepczynski <i>et al.</i> (1970)	Saturne (1913–68)

Remarques

Les travaux (1) et (2) effectués à l'aide de satellites, ne sont pas publiés et il est impossible de discuter ces déterminations. Les erreurs probables publiées par chacun des auteurs sont irréconciliables entre elles. La masse d'Uranus reste donc toujours relativement indéterminée.

Valeur probable

$$22\,600 < 1/m < 23\,000$$

(1) 1927, dissertation non publiée, Université d'Utrecht.

(2) 1950, dissertation non publiée, Université de Chicago.

10. Neptune

Newcomb: $1/m = 19\,314$

$1/m$	Auteur	Méthode
$19\,094 \pm 22$	Gaillot (1910)	Uranus (1690–1903)
$18\,889 \pm 62$	Van Biesbroeck (1957)	Néréide (1949–55)
$19\,296 \pm 9$	Gill et Gault (1968)	Triton (1887–1958)
$19\,349 \pm 28$	Seidelmann <i>et al.</i> (1969)	Uranus (1781–1968)

Remarques

Les dernières déterminations, basées sur un matériel supérieur à celui de Van Biesbroeck, attribuent à Neptune une masse tout à fait comparable à celle qui avait été choisie par Newcomb.

Valeur probable

$$19\,200 < 1/m < 19\,400$$

11. Pluton

Valeur des éphémérides: $1/m = 360000$
(Wylie, 1942, d'après le mouvement de Neptune)

$1/m$	Auteur	Méthode
450000 ± 90000	Brouwer (1955)	Longitudes d'Uranus et de Neptune
400000 ± 40000	Brouwer (1955)	Perturbations d'Uranus et de Neptune
1812000	Duncombe <i>et al.</i> (1968)	Neptune (1846–1968)

Remarques

Cette dernière valeur a encore été récemment améliorée par ses auteurs qui ont trouvé $1/m = 1900000$. Une valeur définitive ne pourra être trouvée qu'après une rediscussion systématique des observations de Neptune qui est en cours à l'Observatoire Naval de Washington.

Cette nouvelle valeur est la seule qui soit compatible avec les mesures de diamètre de Pluton (Kuiper, 1950 ou Halliday *et al.*, 1965) donnant une valeur de l'ordre de 6000 km. Bien que toujours un peu supérieure à celle de la Terre, la densité de Pluton est désormais acceptable.

Valeur probable

$$1\ 500\ 000 < 1/m < 2\ 500\ 000 *$$

12. Conclusion

La discussion des tableaux précédents ne peut qu'être subjective. Il est possible de donner des interprétations divergentes selon la foi que l'on accorde aux erreurs aléatoires publiées et l'estimation des erreurs systématiques. Aussi ne ferons-nous pas de discussion détaillée et nous nous contenterons de faire quelques remarques d'ordre général dans l'optique de la construction d'un nouveau système de masses planétaires.

(1°) Pour trois planètes, les méthodes spatiales ont apporté un gain de précision considérable par rapport aux méthodes astronomiques: la Terre, Vénus et Mars.

Pour la Terre, une grande partie de cette amélioration a déjà été prise en compte par le système UAI 1964, mais n'a pas été répercutée dans le calcul des perturbations planétaires. La différence entre cette valeur et la meilleure valeur actuelle, $1,1 \times 10^{-10}$ masse solaire, donne des effets perturbateurs sur les autres planètes très faibles pour les besoins des éphémérides et certainement inférieurs aux conséquences des incertitudes sur les masses d'autres planètes. Ils ne justifient pas de remettre en question la partie cohérente du système UAI 1964.

* Les discussions au cours du colloque montrent qu'il faudrait remonter la borne supérieure de cet intervalle à 4000000.

Pour Vénus et Mars, en revanche, l'amélioration par rapport aux valeurs de Newcomb est importante et devrait être introduite dans un éventuel nouveau système de masses.

(2°) Pour quatre planètes, les valeurs de Newcomb restent très proches des meilleures déterminations modernes et sont toujours très à l'intérieur des intervalles de de vraisemblance que nous avons définis ci-dessus. Il s'agit de Mercure, Jupiter, Uranus et Neptune. En cas d'un changement des valeurs conventionnelles des masses planétaires, on pourrait être tenté de modifier légèrement les valeurs de Newcomb. A notre avis, les arguments en faveur d'un tel changement ne sont pas convaincants et il vaudrait mieux n'introduire aucune modification.

(3°) Pour une seule planète, Saturne, la valeur de Newcomb est manifestement mauvaise. Les déterminations à l'aide des perturbations planétaires convergent vers $m = 1/3498,5$. Néanmoins, il serait souhaitable de confirmer cette valeur en utilisant les satellites de Saturne. En effet, la valeur obtenue par Jeffreys est loin de ce résultat, alors que les méthode utilisant les satellites font foi pour Uranus et Neptune.

(4°) Enfin, le changement de la masse de Pluton s'impose, d'autant plus que la masse de cette planète ne joue pas, dans les éphémérides, le rôle essentiel que jouent les masses des autres planètes.

Ainsi, le problème de la modification du système des masses planétaires se réduit-il à celui de la modification de la masse de 3 planètes: Vénus, Mars et Saturne et de l'adoption d'une masse vraisemblable pour Pluton.

Nous ne discutons pas ici de l'opportunité de procéder à une telle modification. C'est pour le cas où cette opportunité serait admise, que nous donnons, dans le dernier tableau, une proposition de modification du système de masses planétaires

Proposition d'un nouveau système de masses planétaires

Planète	$1/m$ système actuel	$1/m$ JPL 1968	US Naval Observatory (1970)	$1/m$ proposé	remarques sur la proposition.
Mercure	6000000	6017000	5987000	6000000	Newcomb
Vénus	408000	408522	408519	408522	Mariner 2 et 5
Terre et Lune	$\left\{ \begin{array}{l} 329390 \\ 328912 \end{array} \right.$	328900,1	328900,12	328912	UAI 1964
Mars	3093500	3098500	3098709	3098714	Mariner 4
Jupiter	1047,355	1047,3908	1047,366	1047,355	Newcomb
Saturne	3501,6	3499,2	3498,1	3498,5	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Moyenne arrondie des} \\ \text{déterminations récentes.} \end{array} \right.$
Uranus	22869	22930	22800	22869	Newcomb
Neptune	19314	19071	19325	19314	Newcomb
Pluton	360000	400000	1812000	2000000	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Valeur de Duncombe} \\ \text{et al., arrondie à sa valeur} \\ \text{supér.} \end{array} \right.$

selon les critères énoncés ci-dessus. Nous y avons ajouté, à titre de comparaison, le système de masses du Jet Propulsion Laboratory (Mulholland, 1968)*.

Remerciements

Je remercie ici tous les collègues qui m'ont aidé en répondant à mes demandes de renseignements et envoyé des documents qui ont servi à établir la présente synthèse, notamment MM. J. D. Anderson, V. A. Brumberg, W. E. Brunk, R. L. Duncombe, Y. Kozai, J. D. Mulholland, D. A. O'Handley, J. Schubart, I. I. Shapiro et G. A. Wilkins.

Bibliographie

Voir p. 270–272. Cette bibliographie combinée se réfère à la communication précédente ainsi qu'à: W. J. Klepczynski, P. K. Seidelmann et R. L. Duncombe, 'The Masses of the Principal Planets', p. 253 sqq.

* Au cours du colloque, P. K. Seidelmann a proposé un autre système de masses, provenant d'une moyenne pondérée des principales déterminations citées dans notre article (voir p. 269). Afin de faciliter les comparaisons, nous avons donné ces valeurs dans le tableau. On remarquera la convergence très grande des deux résultats.