CHAPITRE **2**

DÉFINITIONS ET DONNÉES ASTRONOMIQUES

2.1. INTRODUCTION

L'établissement des éphémérides, prévision des positions des corps célestes, dépend du système d'unités et de la valeur des constantes utilisées. En plus du système fondamental d'unités, commun à toutes les sciences, les astronomes utilisent, par commodité puisqu'il s'agit de représenter des mouvements à grande échelle, un autre système dit système d'unités astronomiques. C'est au cours de la Conférence internationale des étoiles fondamentales tenue à Paris du 18 au 21 mai 1896 que fut établi un système de constantes astronomiques sur lequel les astronomes étaient invités à fonder leurs calculs. Ce système de constantes, international dès l'origine, est entré en application immédiatement et est resté en vigueur jusqu'à l'adoption par la douzième assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI), réunie à Hambourg en 1964, d'un autre système dit UAI 1964 (UAI, 1966). Ce dernier système fut effectivement introduit dans les éphémérides à partir de 1968. La seizième assemblée générale de l'UAI réunie à Grenoble en 1976, le modifia pour donner naissance au système dit UAI 1976 (UAI, 1977) qui fut introduit dans les éphémérides en 1984.

Dans ce chapitre nous allons présenter ce nouveau système ainsi que des données plus récentes et actuellement en usage. Nous noterons :

• IERS 1992, les données issues du système de référence standard défini en 1992 (IERS, 1992) par le Service International de Rotation de la Terre (IERS, International Earth Rotation Service) ;

• Davies et al. 1996, les données publiées par le *groupe de travail* commun à l'UAI, à l'Association Internationale de Géodésie (IAG, International Association of Geodesy) et au COSPAR (Committee on Space Research) sur les coordonnées cartographiques et les éléments rotationnels des planètes et des satellites ;

• Fukushima 1990, les propositions du groupe de travail de l'UAI sur les systèmes de référence, sous-groupe sur les constantes astronomiques.

2.2. SYSTÈMES D'UNITÉS

2.2.1. Système fondamental

Le système pratique d'unités de mesure est le Système International d'unités dont l'abréviation internationale est SI. On y distingue trois classes d'unités, les unités de base, les unités dérivées et les unités supplémentaires.

Le Système International est fondé sur sept unités de base (Table 2.1) considérées comme indépendantes du point de vue dimensionnel.

Table 2.1. Unités de base du Système International d'unités (SI).

Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Intensité de courant électrique	ampère	A
Température thermodynamique	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse	candela	cd

Les définitions de ces unités ont changé au cours du temps.

Compte-tenu de leur précision intrinsèque et des incertitudes de mise en œuvre, chacune de leurs définitions successives est compatible avec la précédente tout en permettant des réalisations plus exactes.

Les dernières définitions publiées par le Bureau international des poids et mesures (BIPM, 1991) pour les sept unités de base sont les suivantes, les sigles CGPM désignant la Conférence générale des poids et mesures et CIPM, le Comité international des poids et mesures.

Unité de longueur : le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 *seconde (*17^e CGPM, 1983*).*

*Unité de masse : le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme (*1er CGPM, 1889 *et* 3^e CGPM, 1901*). Ce prototype international en platine iridié est conservé au Bureau International.*

Unité de temps : la seconde est la durée de 9 192 631 770 *périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (*13^e CGPM, 1967*).*

Unité de courant électrique : l'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} *newton par mètre de longueur (*CIPM, 1946 *et* 9^e CGPM, 1948*).*

Unité de température thermodynamique : le kelvin est la fraction 1/273.16 *de la température thermodynamique du point triple de l'eau (*13^e CGPM, 1967*).*

Unité de quantité de matière : la mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0.012 *kilogramme de carbone 12. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules (*14^e CGPM, 1971*). Remarquons que, dans la définition de la mole, il est entendu que l'on se réfère à des atomes de carbone 12 non liés, au repos et dans leur état fondamental.*

Unité d'intensité lumineuse : la candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} *hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est* 1/683 *watt par stéradian (*16^e CGPM, 1979*).*

Les unités dérivées sont formées par combinaison des unités de base à l'aide de relations algébriques liant les grandeurs correspondantes (*cf.* Bureau des longitudes, 1981).

Les unités supplémentaires sont les unités d'angle plan et d'angle solide (Table 2.2). Le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon.

Le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

Bien que ces unités soient sans dimension, il peut être utile de les introduire explicitement dans les expressions d'unités dérivées du SI.

Table 2.2. Unités supplémentaires (SI).

Grandeur	Nom	Symbole
Angle plan	radian	rad
Angle solide	stéradian	sr

2.2.2. Système UAI d'unités astronomiques

Unités de base

Les trois unités de base du système d'unités astronomiques, complétant le SI, sont réunies dans la table 2.3.

Table 2.3. Unités de base du système UAI d'unités astronomiques.

Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	unité astronomique	ua
Temps	jour	d
Masse	masse du soleil	S

Définitions

L'unité de temps est le jour, égal à 86 400 secondes du Système International.

L'unité de masse est la masse du Soleil.

L'unité de longueur ou unité de distance est le demi-grand axe d'une orbite que décrirait autour du Soleil une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le moyen mouvement est égal à k radians par jour, k étant la constante de Gauss, les unités de temps et de masse étant celles que l'on vient de définir. La valeur de k, donnée dans la table 2.6, est celle adoptée par l'UAI en 1938 (UAI, 1939).

Unités auxiliaires

On utilise comme unité auxiliaire de temps, l'année julienne définie comme étant égale à 365.25 jours, et le siècle julien égal à 100 années juliennes, soit 36 525 jours.

Les unités auxiliaires de longueur sont le parsec (pc) et l'année de lumière (al). Le parsec est la distance d'une étoile dont la parallaxe annuelle est égale à une seconde de degré, c'est-à-dire, la distance à laquelle une unité astronomique est vue sous un angle d'une seconde de degré. L'année de lumière est le trajet parcouru par la lumière pendant une année julienne dans un espace-temps vide de matière.

Unités en mécanique céleste relativiste

Dans le cadre de la mécanique relativiste (UAI, 1992) les unités sont celles du système SI pour un système de référence barycentrique dont le temps-coordonnée est le TCB et pour un système de référence géocentrique dont le temps-coordonnée est le TCG (*cf.* 3.8). L'emploi du TDB comme temps-coordonnée d'un système barycentrique (Seidelmann et Fukushima, 1992) ou du TT comme temps-coordonnée d'un système géocentrique entraîne l'introduction de nouvelles unités de temps et de longueur afin de conserver constante la valeur de la vitesse de la lumière. En désignant par s_B et m_B les unités de temps et de longueur compatibles avec l'emploi du TDB et par s_G et m_G les unités de temps et de longueur compatibles avec l'emploi du TT, on a :

$$\mathrm{s}_B = \frac{\mathrm{s}}{1 - L_B} \qquad \mathrm{m}_B = \frac{\mathrm{m}}{1 - L_B}$$

$$\mathrm{s}_G = \frac{\mathrm{s}}{1 - L_G} \qquad \mathrm{m}_G = \frac{\mathrm{m}}{1 - L_G}$$

avec :

$$L_B = 1.550\,519 \times 10^{-8} \qquad L_G = 6.969\,291 \times 10^{-10}$$

La valeur de L_B donnée ici est issue de Fairhead et Bretagnon (1990) ; elle est différente de celle recommandée par l'UAI en 1992 (UAI, 1992), $L_B = 1.550\,505 \times 10^{-8}$, qui était légèrement erronée.

2.2.3. Tables de correspondance

Nous donnons, dans la table 2.4, la correspondance entre les valeurs des diverses unités de temps et, dans la table 2.5, la correspondance entre les valeurs des diverses unités de distance dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.

2.3. LE SYSTÈME UAI DE CONSTANTES ASTRONOMIQUES

Le caractère des constantes astronomiques comme celui des constantes physiques fondamentales dépend des conventions adoptées pour fixer les unités et leur définition. On classe les constantes en trois catégories :

– les constantes de définition dont la valeur est fixée arbitrairement, utilisées dans les relations de définition des unités ; le choix des constantes de définition peut varier d'un système de constantes à un autre ;

– les constantes primaires, constantes nécessaires à la réduction des observations et dont les valeurs ne peuvent être déterminées qu'à partir des observations elles-mêmes ;

– les constantes dérivées dont les valeurs sont dérivées des constantes de définition et des constantes primaires selon des relations algébriques simples.

Table 2.4. Correspondance entre les unités de temps.

	Seconde	Jour	Année julienne	Siècle julien
1 seconde	1	$1.157\,407\,407\times10^{-5}$	$3.168\,808\,781\times10^{-8}$	$3.168\,808\,781\times10^{-10}$
1 jour	86 400	1	$2.737\,850\,787\times10^{-3}$	$2.737\,850\,787\times10^{-5}$
1 année julienne	31 557 600	365.25	1	0.01
1 siècle julien	3 155 760 000	36 525	100	1

Table 2.5. Correspondance entre les unités de distance dans les systèmes UAI 1976 (76) et IERS 1992 (92).

	Mètre	Unités astronomiques	Année de lumière	Parsec
1 m (76)	1	$6.684\,587\,1535\times10^{-12}$	$1.057\,000\,834\,02\times10^{-16}$	$3.240\,779\,3046\times10^{-17}$
(92)	1	$6.684\,587\,1241\times10^{-12}$	$1.057\,000\,834\,02\times10^{-16}$	$3.240\,779\,2903\times10^{-17}$
1 ua(76)	149 597 870 000	1	$1.581\,250\,7336\times10^{-5}$	$4.848\,136\,8111\times10^{-6}$
(92)	149 597 870 610	1	$1.581\,250\,7406\times10^{-5}$	$4.848\,136\,8111\times10^{-6}$
1 al (76)	$9.460\,730\,472\,5808\times10^{15}$	63 241.077 38	1	0.306 601 395 22
(92)	$9.460\,730\,472\,5808\times10^{15}$	63 241.077 10	1	0.306 601 393 87
1 pc(76)	$3.085\,677\,5671\times10^{16}$	206 264.806 248	3.261 563 7619	1
(92)	$3.085\,677\,5807\times10^{16}$	206 264.806 248	3.261 563 7763	1

Vitesse de la lumière : 299 792 458 m/s.

2.3.1. Origine des temps

Certaines constantes sont en fait des fonctions du temps. Il est donc nécessaire de choisir une origine des temps, ou époque standard. Les valeurs données ci-après pour ces constantes sont donc celles qu'elles prennent pour l'époque standard.

L'origine des temps, ou époque standard, est le premier janvier 2000 à 12 heures de l'échelle de temps utilisée (*cf.* chapitre 3). Elle correspond au début du jour julien 2 451 545.0, et est désignée par J2000.0 (UAI, 1977). Dans la suite de cet ouvrage, nous la noterons J2000. Par définition, le début d'une année julienne est séparé de l'époque standard par un nombre entier d'années juliennes. Ainsi, le début de l'année julienne 1995, désigné par 1995.0, correspond au jour julien :
$2\,451\,545.0 - 5 \times 365.25 = 2\,449\,718.75$, soit le 1 janvier 1995 à 6 heures.

2.3.2. Valeurs des constantes astronomiques

La table 2.6 fournit les valeurs des constantes astronomiques dans le système UAI 1976. En parallèle, figurent dans la dernière colonne les valeurs de ces mêmes constantes adoptées dans le système IERS 1992.

Remarquons que la valeur de la vitesse de la lumière, qui était une constante primaire en 1976, est devenue une constante de définition depuis le changement de la définition du mètre en 1983.

2.3.3. Système des masses planétaires et données à utiliser pour le calcul des éphémérides

Masses des planètes et des principaux satellites

Les tables 2.7 à 2.9 contiennent des données sur les masses des planètes et des principaux satellites pour le système UAI 1976 et pour des systèmes plus récents. La table 2.7 donne les rapports de la masse du Soleil aux masses des planètes principales et de leurs satellites. La table 2.8 donne les masses de petites planètes exprimées en masse solaire. La table 2.9 donne les rapports des masses des principaux satellites de Jupiter, Saturne et Neptune à la masse de la planète centrale.

Rayons équatoriaux des planètes, de la Lune et du Soleil

La table 2.10 donne les rayons équatoriaux R_e des planètes, de la Lune et du Soleil dans les systèmes UAI 1976 et Davies et al. 1996.

Champ de gravitation des planètes et de la Lune

Pour évaluer le potentiel gravitationnel U créé par un corps du système solaire en un point extérieur à ce corps, on utilise des développements en harmoniques sphériques de coefficients C_{nk} et S_{nk}, sous la forme :

$$U = \frac{Gm}{r}\left[1 + \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{k=0}^{n}(C_{nk}\cos k\lambda + S_{nk}\sin k\lambda)P_{nk}(\sin\varphi)\right]$$

où G désigne la constante de la gravitation universelle, m la masse du corps et a son rayon équatorial ; λ, φ et r sont les coordonnées sphériques (respectivement, la longitude, la latitude et la distance à l'origine) du point courant dans un système de référence lié au corps et défini par son centre de masse, son équateur et son méridien origine (*cf.* 10.1). $P_{nk}(u)$ est une fonction de Legendre de seconde espèce égale à :

$$P_{nk}(u) = \frac{1}{2^n n!}(1-u^2)^{k/2}\ \frac{\mathrm{d}^{n+k}(u^2-1)^n}{\mathrm{d}u^{n+k}}.$$

On distingue les harmoniques zonaux ($k = 0$) des harmoniques tesséraux ($k \neq 0$). On pose $J_n = -C_{n0}$. Pour les corps à symétrie de révolution, les coefficients des harmoniques tesséraux sont nuls.

Table 2.6. Constantes de définition, constantes primaires et constantes dérivées dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.

	UAI 1976	IERS 1992
Constantes de définition		
Constante de Gauss, k	0.017 202 098 95 ([1])	0.017 202 098 95
Vitesse de la lumière, c		299 792 458
Constantes primaires		
Vitesse de la lumière, c	299 792 458 $\mathrm{m\,s^{-1}}$	
Temps de lumière pour l'unité de distance, τ_A	499.004 782 s	499.004 783 53 s
Rayon équatorial de la Terre, R	6 378 140 m	6 378 136.3 m
Facteur d'ellipticité géopotentiel de la Terre, J_2	0.001 082 63	0.001 082 6362
Constante géocentrique de la gravitation, GM	$3.986\,005\times10^{14}\ \mathrm{m^3\,s^{-2}}$	$3.986\,004\,418\times10^{14}\ \mathrm{m^3\,s^{-2}}$ (unités TT) $3.986\,004\,415\times10^{14}\ \mathrm{m^3\,s^{-2}}$ (unités TCG)
Constante de la gravitation, G	$6.672\times10^{-11}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$	$6.672\,59\times10^{-11}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$
Rapport de la masse de la Lune à la masse de la Terre, μ	0.012 300 02	0.012 300 034
Constante de la précession par siècle julien pour J2000, p	$5\,029''.0966$	$5\,029''.0966$
Obliquité de l'écliptique pour J2000, ε_0	$23°\,26'\,21''.448$	$23°\,26'\,21''.4119$
Potentiel de gravité à la surface du géoïde, W		$62\,636\,858\ \mathrm{m^2\,s^{-2}}$ ([2])
Vitesse angulaire moyenne de rotation de la Terre, ω		$7.292\,115\times10^{-5}\ \mathrm{rad\,s^{-1}}$
Constantes dérivées et relations		
Constante de la nutation pour J2000, N_0	$9''.2025$	
Unité de distance (unité astronomique), $A = c\tau_A$	$1.495\,978\,70\times10^{11}\,\mathrm{m}$	$1.495\,978\,7061\times10^{11}\,\mathrm{m}$

([1]) $k = 0.985\,607\,668\,601\,425$ degré/jour.

([2]) Bursa, 1992.

Table 2.6. (fin).

	UAI 1976	IERS 1992
Parallaxe solaire, $\pi_0 = \arcsin(R/\mathrm{A})$	$8''.794\,148$	$8''.794\,142$
Constante de l'aberration pour J2000, κ	$20''.495\,52$	
Aplatissement de la Terre, f	$0.003\,352\,81 = 1/298.257$	$1/298.257$
Constante héliocentrique de la gravitation, $GS = \mathrm{A}^3\,k^2\mathrm{d}^{-2}$	$1.327\,124\,38 \times 10^{20}$ m^3 s^{-2}	$1.327\,124\,40 \times 10^{20}$ m^3 s^{-2}
Rapport de la masse du Soleil à la masse de la Terre $GS/GM = S/M$	332 946.0	332 946.045
Rapport de la masse du Soleil à la somme des masses de la Terre et de la Lune, $(S/M)/(1+\mu)$	328 900.5	328 900.56
Masse du Soleil, $GS/G = S$	1.9891×10^{30} kg	1.9889×10^{30} kg
Autre forme de la constante géocentrique de la gravitation GM		$3.003\,4896 \times 10^{-6}\,GS$

Table 2.7. Rapport de la masse du Soleil aux masses des planètes principales dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.

		UAI 1976	IERS 1992
Mercure		6 023 600	6 023 600
Vénus		408 523.5	408 523.71
Terre	+ Lune	328 900.5	328 900.56
Mars		3 098 710	3 098 708
Jupiter	+ satellites	1 047.355	1 047.3486
Saturne	+ satellites	3 498.5	3 497.90
Uranus	+ satellites	22 869	22 902.94
Neptune	+ satellites	19 314	19 412.24 (1)
Pluton	+ Charon	130 000 000 (2)	135 000 000

(1) Neptune + Triton

(2) La valeur donnée pour Pluton (Harrington et Christy, 1980) est différente de celle du système UAI 1976 qui était 3 000 000. Elle a été révisée à la suite de la découverte de Charon, satellite de Pluton.

Table 2.8. Masses des petites planètes exprimées en masse solaire dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992 ou Fukushima 1990.

	Numéro de la planète	UAI 1976	IERS 1992 (a) Fukushima 1990 (b)
Cérès	1	5.9×10^{-10}	$1/(2\times10^{9})$ (a)
Pallas	2	1.1×10^{-10}	$1/(8\times10^{9})$ (a)
Vesta	4	1.2×10^{-10}	$1/(7\times10^{9})$ (a)
Iris	7		5.4×10^{-12} (b)
Métis	9		2.5×10^{-12} (b)
Hygiea	10		4.7×10^{-11} (b)
Bamberga	324		8.8×10^{-12} (b)

Table 2.9. Rapports des masses des principaux satellites de Jupiter, Saturne et Neptune à la masse de la planète centrale dans le système UAI 1976 et d'après des déterminations plus récentes.

		UAI 1976	Campbell et Synnot 1985 (a) Campbell et Anderson 1989 (b) Owen et al. 1991 (c)
Jupiter	Io	4.70×10^{-5}	4.705×10^{-5} (a)
	Europe	2.56×10^{-5}	2.527×10^{-5} (a)
	Ganymède	7.84×10^{-5}	7.804×10^{-5} (a)
	Callisto	5.6×10^{-5}	5.668×10^{-5} (a)
Saturne	Titan	2.41×10^{-4}	2.367×10^{-4} (b)
Neptune	Triton	2×10^{-3}	2.09×10^{-4} (c)

Table 2.10. Rayons équatoriaux des planètes, de la Lune et du Soleil, en kilomètres, dans les systèmes UAI 1976 et Davies et al. 1996.

	UAI 1976	Davies et al. 1996
Mercure	2 439	2 439.7
Vénus	6 052	6 051.8
Terre	6 378.140	6 378.14
Mars	3 397.2	3 397
Jupiter	71 398	71 492
Saturne	60 000	60 268
Uranus	25 400	25 559
Neptune	24 300	24 764
Pluton	2 500	1 195
Lune	1 738	1 737.4
Soleil	696 000	

Table 2.11. Champ de gravitation des planètes : coefficients des harmoniques dans le système UAI 1976 et d'après des déterminations plus récentes.

	UAI 1976	Fukushima 1990 (a) IERS 1992 (b) Campbell et Synnot 1985 (c) Campbell et Anderson 1989 (d) Owen et al. 1991 (e)	
	Vénus		
J_2		+ 0.000 006	(a)
	Terre		
J_2	+ 0.001 082 63	+ 0.001 082 6362	(b)
J_3	− 0.000 002 54	− 0.000 002 533	(b)
J_4	− 0.000 001 61	− 0.000 001 619	(b)
	Mars		
J_2	+ 0.001 964	+ 0.001 960	(a)
J_3	+ 0.000 036	+ 0.000 036	(a)
J_4		− 0.000 032	(a)
C_{22}	− 0.000 055	− 0.000 055	(a)
S_{22}	+ 0.000 031	+ 0.000 031	(a)
S_{31}	+ 0.000 026	+ 0.000 026	(a)
	Jupiter		
J_2	+ 0.014 75	+ 0.014 736	(c)
J_3		+ 0.000 001	(c)
J_4	− 0.000 58	− 0.000 587	(c)
J_6		+ 0.000 031	(c)
	Saturne		
J_2	+ 0.016 45	+ 0.016 298	(d)
J_4	− 0.001 0	− 0.000 915	(d)
J_6		+ 0.000 103	(d)
	Uranus		
J_2	+ 0.012	+ 0.003 339	(a)
J_4		− 0.000 032	(a)
	Neptune		
J_2	+ 0.004	+ 0.003 41	(e)
J_4		− 0.000 03	(e)

Nous donnons dans les tables 2.11 et 2.12 les coefficients des développements en harmoniques sphériques des potentiels des planètes (Table 2.11) et de la Lune (Table 2.12).

Table 2.12. Champ de gravitation de la Lune : coefficients des harmoniques dans les systèmes UAI 1976 et IERS 1992.

	UAI 1976	IERS 1992
C_{20}	$-$ 0.000 2027	$-$ 0.000 202 151
C_{22}	+ 0.000 0223	+ 0.000 022 302
C_{30}	$-$ 0.000 006	$-$ 0.000 008 626
C_{31}	+ 0.000 029	+ 0.000 030 71
S_{31}	+ 0.000 004	+ 0.000 005 6107
C_{32}	+ 0.000 0048	+ 0.000 004 8348
S_{32}	+ 0.000 0017	+ 0.000 001 684
C_{33}	+ 0.000 0018	+ 0.000 001 436
S_{33}	$-$ 0.000 001	$-$ 0.000 000 334 35
C_{40}		+ 0.000 000 15
C_{41}		$-$ 0.000 007 18
S_{41}		+ 0.000 002 95
C_{42}		$-$ 0.000 001 440
S_{42}		$-$ 0.000 002 884
C_{43}		$-$ 0.000 000 085
S_{43}		$-$ 0.000 000 789
C_{44}		$-$ 0.000 000 1549
S_{44}		+ 0.000 000 0564
$\gamma = \frac{B-A}{C}$	0.000 2278	0.000 228 0043
$\beta = \frac{C-A}{B}$	0.000 6313	0.000 631 6769
$\frac{C}{MR_e^2}$	0.392	0.390 53
I	$5\,552''.7 = 1°\,32'\,32''.7$	$5\,553''.5 = 1°\,32'\,33''.5$

Nous donnons également dans la table 2.12, pour les systèmes UAI 1976 et IERS 1992, les paramètres de gravitation de la Lune liés aux moments d'inertie, C (moment d'inertie polaire), A (moment d'inertie autour de l'axe dirigé vers la Terre) et B (moment d'inertie autour du troisième axe) ainsi que l'inclinaison moyenne I de l'équateur lunaire sur l'écliptique. M et R_e désignent respectivement la masse et le rayon équatorial de la Lune.

2.4. DONNÉES CONCERNANT LES CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE

2.4.1. Éléments orbitaux des planètes et des satellites

Dans la table 2.13 figurent les périodes de révolution sidérale P des planètes ainsi que leurs périodes de rotation T. Ces dernières sont calculées d'après les expressions définissant la position du méridien origine sur chaque planète (Davies et al., 1996).

Dans la table 2.14, on donne les paramètres moyens des orbites des satellites des planètes ; a désigne le demi-grand axe de l'orbite, e l'excentricité de l'orbite, P la révolution sidérale, I l'inclinaison de l'orbite du corps soit par rapport à l'écliptique J2000 (E), soit par rapport à l'équateur de la planète (e). Dans cette table figurent en outre, les noms des découvreurs des satellites et des anneaux ainsi que la date de leur découverte : en particulier les découvertes par Voyager 1 des anneaux de Jupiter (Johnson et al., 1979) et de l'anneau D de Saturne (Smith et al., 1981), et celles par Pioneer 11 des anneaux F et G (Gehrels et al., 1980).

Table 2.13. Périodes de révolution sidérale P et de rotation T des planètes.

Planètes	P (jours)	T	
Mercure	87.969	58.646 225	(1)
Vénus	224.701	243.018 484	(1) (2)
Terre	365.256	23.934 471	(3)
Mars	686.980	24.622 962	(3)
Jupiter	4 332.59	9.924 920	(3) (4) (5)
Saturne	10 759.2	10.656 222	(3) (4)
Uranus	30 688.5	17.240 000	(2) (3) (4)
Neptune	60 182.3	16.110 000	(3) (4)
Pluton	90 469.7	153.293 904	(2) (3)

(1) en jours ; (2) rotation rétrograde ; (3) en heures ; (4) rotation du champ magnétique (système III) ; (5) on a également $T = 9.841\,668$ heures, rotation de l'atmosphère à l'équateur (système I) et $T = 9.927\,953$ heures, rotation de l'atmosphère aux latitudes élevées (système II).

Les éléments moyens de la Lune sont issus de Simon et al. (1994).

Les éléments moyens des satellites de Mars sont déduits de la théorie de leur mouvement (Chapront-Touzé, 1988 et 1990).

Pour Jupiter, les éléments publiés pour les anneaux et pour les nouveaux satellites JXVI et JXV sont donnés par Nicholson et Matthews (1991) et ceux de JXIV par Synnott (1984). Les éléments des quatre satellites galiléens sont dus à Lieske (1980, 1987) et à Thuillot et Vu (1986), ceux de JXIII sont dus à Aksnes (1978). Les éléments de JV, JX, JXI et JXII sont extraits de l'*Encyclopédie scientifique de l'univers* (Bureau des longitudes, 1986), le demi-grand axe de JV étant toutefois calculé à partir de la valeur de la période. Les éléments de JVI, JVII, JVIII et JIX proviennent d'intégrations numériques effectuées par Rocher (1996) dont les résultats sont publiés dans le *Supplément à la Connaissance des Temps pour les satellites faibles* (Bureau des longitudes, 1997)

Pour Saturne, les éléments publiés sont tirés de Esposito et al., (1984) pour les anneaux sauf l'anneau F dont les éléments sont tirés de Synnott et al. (1983). Ils sont tirés de Showalter et al. (1986) et Showalter (1990) pour SXVIII, de Synnott et al. (1981) pour SX, SXI, SXII, SXV, SXVI et SXVII, du *Supplément à la Connaissance des Temps, éphémérides des satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus* (Bureau des longitudes, 1995) pour SXIII et SXIV, de Dourneau (1993) pour les huit principaux satellites. Ils proviennent d'une intégration numérique effectuée par Bec-Borsenberger (1996) dont les résultats sont publiés dans le *Supplément à la Connaissance des Temps pour les satellites faibles* (Bureau des longitudes, 1996) pour SIX (Phœbé).

Pour Uranus, les éléments des anneaux sont tirés de French et al. (1988), ceux des cinq principaux satellites de Laskar et Jacobson (1987) et ceux des dix petits satellites de Owen et Synnott (1987).

Pour Neptune, les éléments des anneaux sont tirés de Nicholson et al. (1990), ceux des deux principaux satellites de Jacobson et al. (1991) et ceux des six petits satellites de Owen et al. (1991).

Enfin, pour Pluton les éléments de Charon sont dus à Null et al. (1993).

Table 2.14. Éléments orbitaux des satellites.

Nom	N°	a (10^3km)	e	I (degrés)		P (jours)	Découverte	
				Terre				
Lune		383.398	0.055 546	5.156 69	(E)	27.3217		
				Mars				
Phobos		9.38	0.0151	1.1	(e)	0.3189	Hall	1877
Déimos		23.46	0.0002	0.9/2.7	(e)	1.2624	Hall	1877
				Jupiter				
Anneaux		125.6/126.6					Voyager 1	1979
Métis	XVI	127.979	$\leq$ 0.005	$\leq$ 0.1	(e)	0.294 779	Voyager 1/2	1979–1980
Adrastéia	XV	128.980	$\leq$ 0.005	$\leq$ 0.3	(e)	0.298 260	Voyager 1	1979–1980
Amalthée	V	181.2	0.003	0.4	(e)	0.498 179	Barnard	1892
Thébé	XIV	221.895	0.015	0.8	(e)	0.6745	Voyager 1	1979–1980
Io	I	422	0.004	0.02/0.04	(e)	1.769 138	Galilée	1610
Europe	II	671	0.009	0.42/0.51	(e)	3.551 181	Galilée	1610
Ganymède	III	1 070	0.002	0.06/0.30	(e)	7.154 553	Galilée	1610
Callisto	IV	1 883	0.007	0.15/0.74	(e)	16.689 018	Galilée	1610
Léda ([9])	XIII	11 150	0.116/0.210	1.5/50.6	([3])	240.5	Kowal	1974
Himalia ([9])	VI	11 443	0.112/0.207	4.5/51.9	([3])	250.1	Perrine	1904–1905
Lysithéa ([9])	X	11 700	0.081/0.155	23.2/51.4	([3])	258.5	Nicholson	1938
Elara ([9])	VII	11 716	0.155/0.272	1.4/46.7	([3])	259.1	Perrine	1904–1905

Table 2.14. (suite).

Nom	N°	a (10^3km)	e	I (degrés)	P (jours)	Découverte	
				Jupiter			
Ananké ([9])	XII	21 048	0.083/0.452	122.2/172.9 ([3])	624.1	Nicholson	1951
Carmé ([9])	XI	23 280	0.132/0.414	140.6/172.4 ([3])	726.3	Nicholson	1938
Pasiphaé ([9])	VIII	23 658	0.184/0.668	119.1/174.2 ([3])	744.2	Melotte	1908
Sinopé ([9])	IX	23 848	0.108/0.425	132.3/179.4 ([3])	753.2	Nicholson	1914
				Saturne			
Anneau D		67			0.2	Voyager 1	1981
Anneau C		74.5 /92.06 ([1])	0	0 (e)	0.24/0.33 ([1])	Bond	1851
Anneau B		92.06/117.50 ([1])	0.0006		0.33/0.48 ([1])	Galilée	1610
Anneau A		122.20/136.77([1])			0.50/0.60 ([1])	Galilée	1610
Anneau F		140.2	0.003		0.618	Pioneer 11	1980
Anneau G		169				Pioneer 11	1980
Anneau E		180/480 ([1])				Feibelman	1967
Pan	XVIII	133.6			0.575	Showalter ([2])	1990
Atlas ([4])	XV	137.67	0.002	0.3 (e)	0.6019	Voyager 2	1980
Prométhée ([4])	XVI	139.35	0.002	0.0 (e)	0.612 99	Voyager 2	1980
Pandore ([4])	XVII	141.70	0.004	0.0 (e)	0.6285	Voyager 2	1980
Épiméthée ([4])	XI	151.42	0.009	0.34 (e)	0.694 32	Fountain/Larson	1978
Janus ([4])	X	151.47	0.007	0.14 (e)	0.694 66	Dollfus	1966
Mimas	I	185.54	0.019 05	1.56 (e)	0.942 422	Herschel	1789
Encelade	II	238.20	0.0049	0.03 (e)	1.370 218	Herschel	1789
Téthys	III	294.992	0.0	1.10 (e)	1.887 803	Cassini	1684
Télesto	XIII	294.66			1.8878	Voyager 2	1980
Calypso	XIV	294.66			1.8878	Voyager 2	1980
Dioné	IV	377.654	0.0022	0.01 (e)	2.736 916	Cassini	1684
Hélène ([4])	XII	378.06	0.005	0.15 (e)	2.7391	Lecacheux/Laques	1980
Rhéa	V	527.367	0.0003	0.35 (e)	4.517 503	Cassini	1672
Titan	VI	1 221.803	0.0291	0.30 (e)	15.945 446	Huygens	1655
Hypérion	VII	1 481.1	0.1035	0.64 (e)	21.276 673	Bond/Lassel	1848
Japet	VIII	3 561.85	0.0283	18.5 (e)	79.330 954	Cassini	1671
Phœbé	IX	12 893.24	0.175 63	173.73 ([5])	546.6	Pickering	1898
				Uranus			
Anneaux		42/51	0.0001/0.0008	0.06/0.0002 (e)		Elliot et al.	1977
Cordélia	VI	49.752	0.000 47	0.14 (e)	0.335 03	Voyager 2	1986
Ophélie	VII	53.764	0.0101	0.09 (e)	0.376 41	Voyager 2	1986
Bianca	VIII	59.165	0.000 88	0.16 (e)	0.434 58	Voyager 2	1986
Cressida	IX	61.767	0.000 23	0.04 (e)	0.463 57	Voyager 2	1986
Desdémone	X	62.659	0.000 23	0.16 (e)	0.473 65	Voyager 2	1986
Juliette	XI	64.358	0.000 59	0.06 (e)	0.493 07	Voyager 2	1986
Portia	XII	66.097	0.000 17	0.09 (e)	0.513 20	Voyager 2	1986
Rosalinde	XIII	69.927	0.000 09	0.28 (e)	0.558 46	Voyager 2	1986
Belinda	XIV	75.255	0.000 11	0.03 (e)	0.623 52	Voyager 2	1986
Puck	XV	86.004	0.000 05	0.31 (e)	0.761 83	Voyager 2	1985

Table 2.14. (fin).

Nom	N°	a (10^3km)	e	I (degrés)		P (jours)	Découverte	
				Uranus				
Miranda	V	129.872	0.0013 (7)	4.34	(e)	1.413 479	Kuiper	1948
Ariel	I	190.945	0.0012 (7)	0.04 (7)	(e)	2.520 379	Lassell	1851
Umbriel	II	265.998	0.0040 (7)	0.13 (7)	(e)	4.144 176	Lassell	1851
Titania	III	436.298	0.0014 (7)	0.08 (7)	(e)	8.705 867	Herschel	1787
Obéron	IV	583.519	0.0016 (7)	0.07 (7)	(e)	13.463 234	Herschel	1787
				Neptune				
Anneaux		55.1/62.9					Hubbard et al.	1986
Naïade	III	48.227	0.000 33	4.74	(8)	0.294 40	Voyager 2	1989
Thalassa	IV	50.075	0.000 16	0.21	(8)	0.311 48	Voyager 2	1989
Despina	V	52.526	0.000 139	0.07	(8)	0.334 66	Voyager 2	1989
Galatée	VI	61.953	0.000 12	0.05	(8)	0.428 75	Voyager 2	1989
Larissa	VII	73.548	0.001 39	0.20	(8)	0.554 65	Voyager 2	1989
Protée	VIII	117.647	0.000 44	0.04	(8)	1.122 32	Voyager 2	1981–1989
Triton	I	354.759	0.000 02	156.3	(e)	5.876 85	Lassell	1846
Néréide	II	5 513.41	0.751	6.68	(e)	360.135	Kuiper	1949
				Pluton				
Charon	I	19.405	0.0	96.56	(6)	6.387	Christy/Harrington	1978

(1) La première valeur se rapporte au bord intérieur de l'anneau, la seconde au bord extérieur.

(2) Analyse d'observations de 1981 de Voyager 2.

(3) Équateur céleste J2000.

(4) Éléments osculateurs pour l'époque 1 octobre 1980 à 0 h.

(5) Écliptique J2000. Éléments osculateurs pour l'époque 14 janvier 1970 à 0 h.

(6) Équateur céleste J2000. Éléments osculateurs pour l'époque 19 juin 1986 à 0 h.

(7) Valeur médiane sur l'intervalle de temps [1955, 2005] (*cf.* Table 8.7.1).

(8) Plan de Laplace du satellite.

(9) Valeurs médianes (a, P) ou extremums (e, I) sur l'intervalle [1900, 2050] (*cf.* Table 8.5.1).

2.4.2. Paramètres physiques

On donne dans la table 2.15, les masses au repos m du Soleil, des planètes et des systèmes formés par les planètes et leurs satellites, ainsi que les quantités Gm, produits de la constante héliocentrique de la gravitation GS, par le rapport des masses des planètes ou des systèmes planète-satellites à la masse du Soleil m/S. Les masses des planètes sont évaluées en enlevant à la masse du système planète-satellites, la somme des masses connues de ses satellites et des anneaux (Table 2.17). Les

Table 2.15. Masses des corps célestes et constantes gravitationnelles correspondantes.

Planètes, Systèmes planétaires et petites planètes	m (masse solaire)	m (10^{24} kg)	Gm ($m^3\ s^{-2}$)	ρ (10^3 kg/m^3)	T (K)	Albédo B	Albédo G
Soleil	1	1 988 900	$1.327\,124\,40\times10^{20}$	1.4			
Mercure	$1.660\,137\times10^{-7}$	0.330 18	$2.203\,208\times10^{13}$	5.4	620	0.056	0.11
Vénus	$2.447\,8383\times10^{-6}$	4.8685	$3.248\,5860\times10^{14}$	5.2	750	0.72	0.65
Syst. Terre-Lune	$3.040\,4326\times10^{-6}$	6.0471	$4.035\,0324\times10^{14}$				
Terre	$3.003\,4896\times10^{-6}$	5.9736	$3.986\,0044\times10^{14}$	5.5	295	0.39	0.367
Mars	$3.227\,1514\times10^{-7}$	0.641 85	$4.282\,8314\times10^{13}$	3.9	250	0.16	0.15
Syst. de Jupiter	$9.547\,9193\times10^{-4}$	1 899.0	$1.267\,127\,67\times10^{17}$				
Jupiter	$9.545\,9429\times10^{-4}$	1 898.6	$1.266\,865\,37\times10^{17}$	1.2	170	0.70	0.52
Syst. de Saturne	$2.858\,8601\times10^{-4}$	568.60	$3.794\,063\,00\times10^{16}$				
Saturne	$2.858\,15\times10^{-4}$	568.46	$3.793\,12\times10^{16}$	0.6	135	0.75	0.47
Syst. d'Uranus	$4.366\,2437\times10^{-5}$	86.840	$5.794\,548\,60\times10^{15}$				
Uranus	$4.365\,785\times10^{-5}$	86.831	$5.793\,9393\times10^{15}$	1.2	80	0.90	0.51
Syst. de Neptune	$5.151\,39\times10^{-5}$	102.46	$6.836\,54\times10^{15}$				
Neptune	$5.150\,314\times10^{-5}$	102.43	$6.835\,107\times10^{15}$	1.6	50	0.82	0.41
Syst. Pluton-Charon	7.200×10^{-9}	0.014 32	9.555×10^{11}			0.145	0.3
Pluton	6.225×10^{-9}	0.012 38	8.261×10^{11}	1.7			
Cérès	$5.0\ \times10^{-10}$	0.000 99	6.6×10^{10}				
Pallas	1.25×10^{-10}	0.000 25	1.7×10^{10}				
Vesta	1.43×10^{-10}	0.000 28	1.9×10^{10}				
Iris	$5.4\ \times10^{-12}$	0.000 011	7.2×10^{8}				
Métis	$2.5\ \times10^{-12}$	0.000 005	3.3×10^{8}				
Hygiea	$4.7\ \times10^{-11}$	0.000 093	6.2×10^{9}				
Bamberga	$8.8\ \times10^{-12}$	0.000 018	1.2×10^{9}				

masses sont données dans deux systèmes d'unités : le système astronomique (unité = masse solaire) et le système SI (unité = kg). Ces quantités sont calculées à partir des données Fukushima 1990 ou IERS 1992 des paragraphes 2.3.2 et 2.3.3 et des données de la table 2.17, sauf pour Jupiter et Pluton. Les valeurs pour Jupiter sont tirées de Campbell et Synnott (1985). Pour le couple Pluton-Charon, les valeurs ont été extraites d'un article de Young et al. (1994).

On donne également, pour le Soleil et les planètes principales, une estimation de la masse volumique ρ et, pour les planètes principales, la température superficielle moyenne T, l'albédo de Bond B, et l'albédo géométrique G issues de l'*Encyclopédie scientifique de l'univers* (Bureau des longitudes, 1986). La masse volumique est obtenue à partir de la masse et du rayon équatorial

Table 2.16. Figures géométriques représentant le Soleil, les planètes et la Lune.

Nom	R_p (km)	a_1 (km)	f_p (10^{-3})	f_e (10^{-3})	L_e (degrés)	a_s (km)	a_r (m)	f_g ($\times 10^{-10}$)
Soleil								21 210
Mercure	2 439.7					2 439.7		
Vénus	6 051.8	6 051.476	1/113.8	1/253.2	− 6.2	6 051.8	0.003 614 54	5.973 06
Lune	1 737.4	1 735.554	1/2.67	1/7.49	0.03	1 737.4	$5.455\ 098 \times 10^{-5}$	0.313 958
Terre	6 356.75	6 378.171		1/920	−14.9	6 371.00	0.004 435 03	6.969 290
Mars	3 375	3 396.510	1/0.184	1/2.63	75.0	3 390	0.000 476 529	1.407 87
Jupiter ([1])	66 854					69 911	1.409 577	197.166
Saturne ([1])	54 364					58 232	0.422 04	70.027
Uranus ([1])	24 973					25 362	0.064 4663	25.223
Neptune ([1])	24 341					24 622	0.076 05	30.71
Pluton	1 195					1 195		

([1]) Le rayon à une surface de pression 10^5 Pa.

donné dans la table 2.10 (données issues de Davies et al. 1996), en supposant le corps sphérique.

L'albédo de Bond est le rapport du flux total réfléchi par le corps au flux total incident.

L'albédo géométrique est le rapport de l'éclat du corps, pour un angle de phase nul, à l'éclat d'un disque parfaitement diffusant ayant la même position et le même diamètre apparent que le corps.

Nous donnons dans la table 2.16, les valeurs des paramètres de diverses figures géométriques à symétrie équatoriale (sphéroïde, ellipsoïde triaxial, sphère) représentant au mieux la forme des planètes principales et de la Lune. Pour le sphéroïde, on donne le rayon polaire R_p (Davies et al., 1996) le rayon équatorial R_e étant donné dans la table 2.10. Pour l'ellipsoïde, on donne le demi-grand axe équatorial a_1, le facteur d'aplatissement polaire f_p, le facteur d'aplatissement équatorial f_e, et la longitude du grand axe équatorial L_e (comptée positivement vers l'est), rapportée au méridien origine du corps (Fukushima, 1990). Pour la sphère on donne le rayon moyen a_s (Davies et al., 1996). Figurent également dans la table 2.16, pour les planètes et la Lune, le *rayon relativiste* $a_r = (GM/c^2)$ et pour le Soleil, la Lune et les planètes, sauf Mercure, le *facteur gravitationnel* f_g. Pour la Lune et les planètes telluriques (objets non gazeux), f_g est donné par $f_g = (W/c^2)$ où W est le potentiel de gravité à la surface du corps (W est une quantité mesurée). Pour les autres corps, on prend $f_g = Gm/R_e c^2$ où m est la masse du corps considéré et R_e son rayon équatorial. G est la constante de la gravitation universelle et c la vitesse de la lumière (Fukushima, 1990).

On donne dans les tables 2.17 et 2.18, pour les satellites et les anneaux des planètes, la masse au repos m dans le système d'unités astronomiques et le Système International, le rapport de m à la masse de la planète centrale et le produit Gm. Ces masses sont déduites des valeurs données par :

– IERS 1992 pour la Lune ;
– Duxbury et Callahan (1989) pour Phobos et Déimos ;
– Campbell et Synnott (1985) pour les satellites galiléens ;
– Fukushima 1990 pour les autres satellites de Jupiter, les anneaux de Saturne, Hypérion, Phœbé et Néréide ;
– Campbell et Anderson (1989) pour Titan ;
– Tyler et al. (1982) pour Mimas, Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa et Japet ;
– Thomas et al. (1989) pour les petits satellites d'Uranus Cordélia et Ophélie ;
– Jacobson et al. (1992) pour les anciens satellites d'Uranus (Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Obéron) ;
– Banfield et Murray (1992) pour les six petits satellites de Neptune ;
– Owen et al. (1991) pour Triton ;
– Young et al. (1994) pour Charon.

On donne également, pour les anneaux, le rayon moyen a_s et, pour les satellites, ou le rayon a_s de la sphère ou les demi-axes équatoriaux (a_1, a_2) et polaire (a_3) de l'ellipsoïde triaxial représentant au mieux la surface du satellite. Pour tous les satellites, sauf pour ceux de Mars et de Pluton, ces valeurs sont données par Davies et al. (1996), les satellites de Mars ayant leurs valeurs estimées par Duxbury et Callahan (1989) (ainsi que leur masse volumique) et le demi-diamètre de Charon étant donné par Tholen et Buie (1990). Comme pour les planètes, l'estimation de la masse volumique a été obtenue à partir de la masse et du rayon moyen par Bec-Borsenberger (1996).

On donne enfin, dans les deux dernières colonnes de la table 2.18, la magnitude visuelle m_v et l'albédo géométrique. La plus grande partie de ces quantités est tirée de l'*Encyclopédie scientifique de l'univers* (Bureau des longitudes, 1986) ou du *Supplément à la Connaissance des Temps pour les satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus* (Bureau des longitudes, 1995). Les autres sources utilisées sont :

– Pascu et al. (1992) pour Thébé ;
– *Encyclopédie scientifique de l'univers* (Bureau des longitudes, 1986) pour la plupart des satellites de Saturne, Uranus et Neptune ;
– Showalter (1990) pour l'albédo et le rayon de Pan ;
– Buratti et Veverka (1984) pour Mimas, Encelade, Téthys, Dioné et Rhéa ;
– Tholen et Zellner (1983) pour les albédos de Hypérion et du côté sombre de Japet ;
– Stone et Miner (1982) pour les albédos des nouveaux satellites de Saturne ;
– Thomas et al. (1989) pour la magnitude et l'albédo de Titania.

Table 2.17. Masses des principaux satellites.

Nom	N°	m (masse solaire)	m (masse planète)	Gm ($\mathrm{m^3\,s^{-2}}$)
		Terre		
Lune		$3.694\,3024\times10^{-8}$	$1.230\,0034\times10^{-2}$	$4.902\,7989\times10^{12}$
		Mars		
Phobos		6.39×10^{-15}	1.98×10^{-8}	8.47×10^{5}
Déimos		9.1×10^{-16}	2.8×10^{-9}	1.20×10^{5}
		Jupiter		
Métis	XVI	4.8×10^{-14}	5×10^{-11}	6.3×10^{6}
Adrastéia	XV	9.5×10^{-15}	1×10^{-11}	1.3×10^{6}
Amalthée	V	3.6×10^{-12}	3.8×10^{-9}	4.8×10^{8}
Thébé	XIV	3.8×10^{-13}	4×10^{-10}	5.1×10^{7}
Io	I	4.49×10^{-8}	4.705×10^{-5}	5.96×10^{12}
Europe	II	2.41×10^{-8}	2.527×10^{-5}	3.20×10^{12}
Ganymède	III	7.45×10^{-8}	7.804×10^{-5}	9.89×10^{12}
Callisto	IV	5.41×10^{-8}	5.668×10^{-5}	7.18×10^{12}
Léda	XIII	2.9×10^{-15}	3×10^{-12}	3.8×10^{5}
Himalia	VI	4.8×10^{-12}	5.0×10^{-9}	6.3×10^{8}
Lysithéa	X	3.8×10^{-14}	4×10^{-11}	5.1×10^{6}
Elara	VII	3.8×10^{-13}	4×10^{-10}	5.1×10^{7}
Ananké	XII	1.9×10^{-14}	2×10^{-11}	2.5×10^{6}
Carmé	XI	4.8×10^{-14}	5×10^{-11}	6.3×10^{6}
Pasiphaé	VIII	9.5×10^{-14}	1×10^{-10}	1.3×10^{7}
Sinopé	IX	3.8×10^{-14}	4×10^{-11}	5.1×10^{6}
		Saturne		
Anneau C		4.9×10^{-13}	1.7×10^{-9}	6.4×10^{7}
Anneau B		1.2×10^{-11}	4.2×10^{-8}	1.6×10^{9}
Anneau A		3.1×10^{-12}	1.1×10^{-8}	4.2×10^{8}
Mimas	I	2.29×10^{-11}	8.00×10^{-8}	3.04×10^{9}
Encelade	II	3.7×10^{-11}	1.3×10^{-7}	4.9×10^{9}
Téthys	III	3.4×10^{-10}	1.2×10^{-6}	4.5×10^{10}
Dioné	IV	5.29×10^{-10}	1.85×10^{-6}	7.0×10^{10}
Rhéa	V	1.16×10^{-9}	4.06×10^{-6}	1.54×10^{11}
Titan	VI	6.7652×10^{-8}	2.3670×10^{-4}	8.9782×10^{12}

Table 2.17. (fin).

Nom	N°	m (masse solaire)	m (masse planète)	Gm (m^3 s^{-2})
		Saturne		
Hypérion	VII	8.6×10^{-12}	3×10^{-8}	1.1×10^{9}
Japet	VIII	7.99×10^{-10}	2.79×10^{-6}	1.06×10^{11}
Phœbé	IX	2×10^{-13}	7×10^{-10}	2.7×10^{7}
		Uranus		
Cordélia	VI	7.0×10^{-15}	1.6×10^{-10}	9.3×10^{5}
Ophélie	VII	1.3×10^{-14}	2.9×10^{-10}	1.7×10^{6}
Miranda	V	0.33×10^{-10}	0.76×10^{-6}	4.4×10^{9}
Ariel	I	6.80×10^{-10}	1.56×10^{-5}	90.3×10^{9}
Umbriel	II	5.89×10^{-10}	1.35×10^{-5}	78.2×10^{9}
Titania	III	17.73×10^{-10}	4.061×10^{-5}	235.3×10^{9}
Obéron	IV	15.15×10^{-10}	3.471×10^{-5}	201.1×10^{9}
		Neptune		
Naïade	III	5.0×10^{-14}	9.7×10^{-10}	6.6×10^{6}
Thalassa	IV	1.6×10^{-13}	3.1×10^{-9}	2.1×10^{7}
Despina	V	1.1×10^{-12}	2.1×10^{-8}	1.4×10^{8}
Galatée	VI	1.9×10^{-12}	3.6×10^{-8}	2.5×10^{8}
Larissa	VII	2.2×10^{-12}	4.2×10^{-8}	2.9×10^{8}
Protée	VIII	2.0×10^{-11}	3.9×10^{-7}	2.7×10^{9}
Triton	I	1.08×10^{-8}	2.09×10^{-4}	1.428×10^{12}
Néréide	II	1×10^{-11}	2×10^{-7}	1.4×10^{9}
		Pluton		
Charon	I	0.975×10^{-9}	0.1567	12.9×10^{10}

Table 2.18. Demi-diamètre ; masse ; masse volumique, ρ ; magnitude visuelle à l'opposition, m_v ; albédo géométrique.

Nom	N°	a_1 a_2 a_3 ou a_s (km)	Masse (10^{21} kg)	ρ (10^3 kg/m^3)	m_v	Albédo géométrique
			Terre			
Lune		1 737.4	73.476	3.34	−12.7	0.12
			Mars			
Phobos		13.3 - 11.1 - 9.3	1.27×10^{-5}	2.2	11.6	0.06
Déimos		7.5 - 6.2 - 5.4	1.8×10^{-6}	1.7	12.7	0.06
			Jupiter			
Métis	XVI	20	9.5×10^{-5}	2.8	17.5	0.05
Adrastéia	XV	13 - 10 - 8	1.9×10^{-5}	4.5	18.9	0.05
Amalthée	V	131.0 - 73.0 - 67.0	7.2×10^{-3}	2.7	14.1	0.05
Thébé	XIV	55 - - 45	7.6×10^{-4}	1.45	15.7	0.04
Io	I	1830.0 - 1818.7 -1815.3	89.3	3.53	5.02	0.61
Europe	II	1 565	48.0	2.99	5.29	0.64
Ganymède	III	2 634	148.2	1.94	4.61	0.42
Callisto	IV	2 403	107.6	1.85	5.65	0.20
Léda	XIII	5	5.7×10^{-6}	11	20	
Himalia	VI	85	9.5×10^{-3}	3.7	14.8	0.03
Lysithéa	X	12	7.6×10^{-5}	11	18.4	
Elara	VII	40	7.6×10^{-4}	2.8	16.8	0.03
Ananké	XII	10	3.8×10^{-5}	9.1	18.9	
Carmé	XI	15	9.5×10^{-5}	6.7	18.0	
Pasiphaé	VIII	18	1.9×10^{-4}	7.8	17.0	
Sinopé	IX	14	7.6×10^{-5}	6.6	18.3	
			Saturne			
Anneau C			9.7×10^{-4}			
Anneau B			2.4×10^{-2}			
Anneau A			6.3×10^{-3}			
Pan	XVIII	~ 10				0.4-0.7
Atlas	XV	18.5 - 17.2 - 13.5			18	0.4
Prométhée	XVI	74.0 - 50.0 - 34.0			15	0.6
Pandore	XVII	55.0 - 44.0 - 31.0			15.5	0.6
Épiméthée	XI	69.0 - 55.0 - 55.0			15	0.4
Janus	X	97.0 - 95.0 - 77.0			14	0.4
Mimas	I	209.1 - 196.2 - 191.4	0.0455	1.4	12.9	0.77
Encelade	II	256.3 - 247.3 - 244.6	0.074	1.1	11.7	1.04
Téthys	III	535.6 - 528.2 - 525.8	0.674	1.1	10.3	0.8
Télesto (Téthys B)	XIII	15 - 12.5 - 7.5			18	0.6

Table 2.18. (fin).

Nom	N°	a_1 a_2 a_3 ou a_s (km)	Masse (10^{21} kg)	ρ (10^3 kg/m^3)	m_v	Albédo géométrique
			Saturne			
Calypso (Téthys C)	XIV	15.0 - 8.0 - 8.0			18.5	0.8
Dioné	IV	560	1.052	1.4	10.4	0.55
Hélène	XII	16			17	0.5
Rhéa	V	764	2.31	1.2	9.7	0.65
Titan	VI	2 575	134.55	1.9	8.3	0.21
Hypérion	VII	180 - 140 - 112.5	0.017	1.4	14.19	0.19/0.25
Japet	VIII	718	1.59	1.3	10.2/11.9	0.5 ([1])
Phœbé	IX	115 - 110 - 105	0.0004	0.07	16.5	0.06
			Uranus			
Cordélia	VI	13	1.4×10^{-5}	1.5	24.2 ([2])	
Ophélie	VII	15	2.5×10^{-5}	1.5	23.9 ([2])	
Bianca	VIII	21			23.1 ([2])	
Cressida	IX	31			22.3 ([2])	
Desdémone	X	27			22.5 ([2])	
Juliette	XI	42			21.7 ([2])	
Portia	XII	54			21.1 ([2])	
Rosalinde	XIII	27			22.5	
Belinda	XIV	33			22.1	
Puck	XV	77			20.4	0.07
Miranda	V	240.4 - 234.2 - 232.9	0.066	1.2	16.5	0.34
Ariel	I	581.1 - 577.9 - 577.7	1.35	1.7	14.4	0.40
Umbriel	II	584.7	1.17	1.4	15.3	0.19
Titania	III	788.9	3.526	1.7	13.9	0.28
Obéron	IV	761.4	3.014	1.6	14.2	0.24
			Neptune			
Naïade	III	29	0.99×10^{-4}	1.0	24.7	
Thalassa	IV	40	3.2×10^{-4}	1.2	23.8	
Despina	V	74	2.1×10^{-3}	1.2	22.6	0.06
Galatée	VI	79	3.7×10^{-3}	1.8	22.3	0.06
Larissa	VII	104 - - 89	4.3×10^{-3}	1.2	22.0	0.06
Protée	VIII	218 - 208 - 201	4.0×10^{-2}	1.1	20.3	0.06
Triton	I	1 352.6	21.4	2.1	13.7	0.7
Néréide	II	170	0.02	1.0	18.7	0.4
			Pluton			
Charon	I	593	1.94	2	16.8	0.4

([1]) Côté brillant 0.5 ; côté non brillant 0.07.

([2]) Calculée en supposant que le satellite a le même albédo que Puck.

2.5. VALEURS SUCCESSIVES DES CONSTANTES ASTRONOMIQUES

On donne dans ce paragraphe les déterminations successives des valeurs des constantes astronomiques. Ces valeurs ont été définies ou adoptées soit dans des déterminations globales d'éphémérides : Newcomb (1895, 1898), DE102 (Newhall et al., 1983), DE200 (Standish, 1982, 1990), DE403 (Standish et al., 1995), $\cdots$, soit dans des systèmes de références : UAI, IERS, *GRS* (Geodetic Reference System), MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis). Les décisions prises relativement à ces déterminations successives lors des assemblées générales de l'UAI en 1938, 1964, 1976 et 1982 ont été publiées, respectivement, en 1939, 1966, 1977 et 1982. Les standards du *GRS* ont été publiés par Moritz (1992) ; ceux du projet MERIT ont été publiés par Melbourne et al. (1983).

2.5.1. Constantes de définition

Constante de Gauss

symbole		:	k
unité		:	$\mathrm{ua}^{3/2}\mathrm{d}^{-1}\mathrm{S}^{-1/2}$
Newcomb	1898	:	0.017 202 098 95
UAI	1938	:	Newcomb 1898
UAI	1964	:	Newcomb 1898
UAI	1976	:	Newcomb 1898
DE102	1977	:	Newcomb 1898
DE200	1982	:	Newcomb 1898
IERS	1992	:	Newcomb 1898
DE403	1995	:	Newcomb 1898

Vitesse de la lumière dans le vide

symbole		:	c	
unité		:	m/s	
Cornu M.A.	1876	:	300 400 000	
Newcomb	1895	:	299 860 000	
De Sitter	1938	:	299 774 000	
Clemence	1948	:	299 773 000	
UAI	1964	:	299 792 500	(constante primaire)
UAI	1976	:	299 792 458	(constante primaire)
DE102	1977	:	UAI 1976	
DE200	1982	:	UAI 1976	
IERS	1992	:	UAI 1976	
DE403	1995	:	UAI 1976	

Nombre de secondes de temps dans une année tropique

Newcomb	1898 :	31 556 925.975 456	à B1900 (DJ 2 415 020.3135)
De Sitter	1938 :	31 556 925.169 344	à B1900
UAI	1964 :	31 556 925.9747	à B1900

2.5.2. Constantes primaires et constantes dérivées

Temps de lumière pour l'unité de distance

symbole	:	τ_A
unité	:	s
De Sitter	1938 :	498.553
Clemence	1948 :	499.291
UAI	1964 :	499.012 = 1/0.002 003 96
UAI	1976 :	499.004 782
DE102	1977 :	499.004 783 78
DE200	1982 :	499.004 783 70
IERS	1992 :	499.004 783 53
DE403	1995 :	499.004 783 806

Rayon équatorial de la Terre

symbole	:	R_e	
unité	:	m	
Paris	1896 :	6 378 388.00	
Newcomb	1898 :	6 378 257	
De Sitter	1938 :	6 378 387	
Clemence	1948 :	6 378 388	
UAI	1964 :	6 378 160	
UAI	1976 :	6 378 140	
DE102	1977 :	6 378 156	
GRS	1980 :	6 378 137	(constante de définition)
IERS	1992 :	6 378 136.3	
DE403	1995 :	*GRS* 1980	

Facteur d'ellipticité géopotentiel de la Terre

symbole	:	J_2
UAI	1964 :	0.001 082 7
UAI	1976 :	0.001 082 63
DE102	1977 :	0.001 082 637
IERS	1992 :	0.001 082 6362

Vitesse angulaire de la Terre

symbole	:	ω	
unité	:	10^{-5} radian/s	
GRS	1967 :	7.292 115 1467	(constante de définition)
GRS	1980 :	7.292 115	(constante de définition)
IERS	1992 :	*GRS* 1980	

Constante géocentrique de la gravitation

symbole	:	GM	
unité	:	10^{14} m^3 s^{-2}	
Newcomb	1898 :	3.986 03	
UAI	1964 :	Newcomb 1898	
UAI	1976 :	3.986 005	
DE200	1982 :	3.986 004 48	
IERS	1992 :	3.986 004 418	(unité TT)
DE403	1995 :	3.986 004 356 08	

Constante de la gravitation

symbole	:	G
unité	:	10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}
UAI	1976 :	6.672
IERS	1992 :	6.672 59

Rapport de la masse de la Lune à celle de la Terre

symbole	:	μ	
Newcomb	1895 :	1/81.45	
De Sitter	1938 :	1/81.53	
Clemence	1948 :	1/81.79	
UAI	1964 :	1/81.30	= 0.012 300
UAI	1976 :	0.012 300 02	
DE102	1977 :	1/81.300 7	
DE200	1982 :	1/81.300 587	
IERS	1992 :	0.012 300 034	
DE403	1995 :	1/81.300 585	

Constante de la précession

symbole	:	p	
unité	:	$''$/siècle	
Newcomb	1895 :	5 023.71	à B1850, par siècle tropique
	:	5 025.64	à B1900, par siècle tropique
Paris	1896 :	Newcomb 1895	à B1900, par siècle tropique
De Sitter	1938 :	5 026.00	à B1900, par siècle tropique
UAI	1964 :	Newcomb 1895	à B1900, par siècle tropique
UAI	1976 :	5 029.0966	à J2000, par siècle julien
IERS	1992 :	UAI 1976	

Obliquité de l'écliptique

symbole	:	ε_0	
Newcomb	1895 :	$23° 27' 08''.26$	à B1900
Paris	1896 :	Newcomb 1895	
De Sitter	1938 :	$23° 27' 08''.29$	à B1900
UAI	1964 :	Paris 1896	
UAI	1976 :	$23° 26' 21''.448$	à J2000
DE102	1977 :	$23° 26' 44''.816$	à B1950 (DJ 2 433 282.423)
DE200	1982 :	$23° 26' 21''.4119$	à J2000
IERS	1992 :	DE200	

Constante de la nutation

symbole	:	N_0	
unité	:	$''$	
Newcomb	1895 :	9.214	à B1850
Paris	1896 :	9.21	à B1900
De Sitter	1938 :	9.2181	à B1900
Clemence	1948 :	9.210	à B1900
UAI	1964 :	Paris 1896	
UAI	1976 :	9.2109 (provisoire)	à J2000
UAI	1982 :	9.2025	à J2000
IERS	1992 :	abandonnée par suite de l'introduction de la théorie de la nutation UAI 1980 (Wahr, 1981 ; UAI, 1982)	

Unité de distance

symbole		: ua
unité		: 10^{11}m
De Sitter	1938 :	1.494 53
Clemence	1948 :	1.496 70
UAI	1964 :	1.496 00
UAI	1976 :	1.495 978 70
DE102	1977 :	1.495 978 7068
DE200	1982 :	1.495 978 7066
IERS	1992 :	1.495 978 7061
DE403	1995 :	1.495 978 706 91

Parallaxe solaire

symbole		: π_0
unité		: $''$
Newcomb	1895	: 8.7854
Newcomb	1895	: 8.790
Paris	1896	: 8.80
De Sitter	1938	: 8.8030
Clemence	1948	: 8.790
UAI	1964	: 8.794 05
UAI	1976	: 8.794 148
IERS	1992	: 8.794 142

Constante de l'aberration

symbole		: κ
unité		: $''$
Newcomb	1895	: 20.511
Newcomb	1895	: 20.501
Paris	1896	: 20.47
De Sitter	1938	: 20.4770
Clemence	1948	: 20.507
UAI	1964	: 20.4958
UAI	1976	: 20.495 52
IERS	1992	: remplacée par le calcul direct (*cf.* 7.1)

Aplatissement de la Terre

symbole	:	f
Paris	1911 :	1/297.00
De Sitter	1938 :	1/296.753
Clemence	1948 :	1/296.202
UAI	1964 :	1/298.25 = 0.003 3529
GRS	1967 :	1/298.247 168
UAI	1976 :	1/298.257
GRS	1980 :	1/298.257 222 101
IERS	1992 :	UAI 1976

Constante héliocentrique de la gravitation

symbole		:	GS
unité		:	10^{20} m^3 s^{-2}
Newcomb	1898	:	1.329 074
UAI	1964	:	1.327 18
UAI	1976	:	1.327 124 38
DE102	1977	:	1.327 124 4000
DE200	1982	:	1.327 124 3994
MERIT	1983	:	1.327 124 40
IERS	1992	:	MERIT 1983
DE403	1995	:	1.327 124 4002

Rapport de la masse du Soleil à celle de la Terre

Newcomb	1898	:	333 432
UAI	1964	:	332 958
UAI	1976	:	332 946.0
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	332 946.038
IERS	1992	:	332 946.045
DE403	1995	:	332 946.049...

Rapport de la masse du Soleil à celle du système Terre-Lune

Le Verrier	1856	:	354 936
Le Verrier	1876	:	324 439
Newcomb	1898	:	329 390
De Sitter	1938	:	327 932
Clemence	1948	:	329 406
UAI	1964	:	328 912
		:	Newcomb 1898 (pour la construction des éphémérides planétaires)
Duncombe	1969	:	Newcomb 1898

UAI	1976	:	328 900.5
DE102	1977	:	328 900.53
DE200	1982	:	328 900.55
IERS	1992	:	328 900.56
DE403	1995	:	328 900.560...

2.5.3. Rapports de la masse du Soleil aux masses des planètes

Mercure

Le Verrier	1856	:	3 000 000
Newcomb	1895	:	6 000 000
UAI	1964	:	Newcomb 1895
UAI	1976	:	6 023 600
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	UAI 1976
IERS	1992	:	UAI 1976
DE403	1995	:	UAI 1976

Vénus

Le Verrier	1856	:	401 847
Le Verrier	1858	:	400 246
Le Verrier	1876	:	412 150
Newcomb	1895	:	408 000
UAI	1964	:	Newcomb 1895
UAI	1976	:	408 523.5
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	UAI 1976
IERS	1992	:	408 523.71
DE403	1995	:	IERS 1992

Mars

Le Verrier	1856	:	2 680 337
Le Verrier	1858	:	2 994 790
Le Verrier	1876	:	2 812 526
Newcomb	1895	:	3 093 500
UAI	1964	:	Newcomb 1895
UAI	1976	:	3 098 710
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	UAI 1976
IERS	1992	:	3 098 708
DE403	1995	:	IERS 1992

Système de Jupiter

Le Verrier	1856	:	1 050
Newcomb	1895	:	1 047.35
Gaillot	1904	:	1 047.52
Eckert et al.	1951	:	1 047.355
UAI	1964	:	Eckert et al., 1951
UAI	1976	:	Eckert et al., 1951
DE102	1977	:	Eckert et al., 1951
DE200	1982	:	1 047.350
IERS	1992	:	1 047.3486
DE403	1995	:	IERS 1992

Système de Saturne

Le Verrier	1856	:	3 512
Newcomb	1895	:	3 501.6
Gaillot	1904	:	Le Verrier 1856
Eckert et al.	1951	:	Newcomb 1895
UAI	1964	:	Newcomb 1895
UAI	1976	:	3 498.5
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	3 498.0
IERS	1992	:	3 497.90
DE403	1995	:	3 497.898

Système d'Uranus

Le Verrier	1856	:	24 000
Newcomb	1895	:	22 756
Gaillot	1904	:	22 453
Eckert et al.	1951	:	22 869
UAI	1964	:	Eckert et al., 1951
UAI	1976	:	Eckert et al., 1951
DE102	1977	:	Eckert et al., 1951
DE200	1982	:	22 960
IERS	1992	:	22 902.94
DE403	1995	:	22 902.98

Système de Neptune

Le Verrier	1856	:	14 400
Newcomb	1895	:	19 540

Gaillot	1904	:	18 908
Eckert et al.	1951	:	19 314
UAI	1964	:	Eckert et al., 1951
UAI	1976	:	Eckert et al., 1951
DE102	1977	:	Eckert et al., 1951
DE200	1982	:	Eckert et al., 1951
IERS	1992	:	19 412.24
DE403	1995	:	IERS 1992

Système Pluton-Charon (*cf.* Table 2.7, note 2)

Eckert et al.	1951	:	360 000
UAI	1964	:	Eckert et al., 1951
UAI	1976	:	3 000 000
DE102	1977	:	UAI 1976
DE200	1982	:	130 000 000
IERS	1992	:	135 000 000
DE403	1995	:	135 200 000

2.6. AUTRES CONSTANTES ET UNITÉS

2.6.1. Système de référence galactique

Les axes de coordonnées du système de référence galactique, par rapport au système de référence FK4 (1950.0), sont déterminés par les coordonnées dans ce dernier système du pôle galactique et du centre galactique définis à la suite de l'Assemblée générale de l'UAI de 1958 (Blaauw et al., 1960).

Les coordonnées équatoriales héliocentriques du pôle galactique Z sont :

$$\begin{aligned} \alpha_Z &= 12\,\mathrm{h}\ 49\,\mathrm{min}, \\ \delta_Z &= 27°24' ; \end{aligned}$$

l'angle de position du méridien origine est :

$$\theta = 123°.$$

Les coordonnées du centre galactique X en sont déduites :

$$\begin{aligned} \alpha_X &= 17\,\mathrm{h}\ 42\,\mathrm{min}\ 24\,\mathrm{s}, \\ \delta_X &= -28°55'. \end{aligned}$$

Dans le système de référence FK5 (J2000), les coordonnées équatoriales héliocentriques du pôle galactique Z deviennent (Murray, 1989) :

$$\begin{aligned} \alpha_Z &= 12\,\mathrm{h}\ 51\,\mathrm{min}\ 26.2755\,\mathrm{s}, \\ \delta_Z &= 27°7'41''.704. \end{aligned}$$

On a également, pour les coordonnées équatoriales héliocentriques du centre galactique :

$$\begin{aligned} \alpha_X &= 17\,\mathrm{h}\ 45\,\mathrm{min}\ 34.5959\,\mathrm{s}, \\ \delta_X &= -28°56'9''.965, \end{aligned}$$

et pour l'angle de position du méridien origine :

$$\theta = 122°56'12''.498.$$

En 1985, l'assemblée générale de l'UAI a adopté pour les constantes galactiques relatives à la distance du Soleil au centre galactique (R_0) et à la vitesse circulaire du Soleil autour du centre galactique (θ_0) les valeurs suivantes (Kerr et Lynden-Bell, 1986) :

$$\begin{aligned} R_0 &= 8.5\,\mathrm{kpc}, \\ \theta_0 &= 220\,\mathrm{km/s}. \end{aligned}$$

2.6.2. Système de référence extragalactique

Les sources extragalactiques observées par interférométrie à très longue base (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) permettent de constituer un système de référence extragalactique. On définit l'origine des ascensions droites en fixant l'ascension droite (J2000) du quasar 3 C 273 B (1 226+023) (Robertson et al., 1986) :

$$\begin{aligned} \alpha &= 12\,\mathrm{h}\ 29\,\mathrm{min}\ 6.6997\,\mathrm{s}, \\ \delta &= 2°3'8''.5988. \end{aligned}$$

On donne également les coordonnées du pulsar milliseconde PSR $1937 + 21$ dans le FK4-J2000 (Dickey, 1989) :

$$\begin{aligned} \alpha &= 19\,\mathrm{h}\ 39\,\mathrm{min}\ 38.560\,25\,\mathrm{s}, \\ \delta &= 21°34'59''.1447. \end{aligned}$$

2.6.3. Valeurs estimées de quantités cinématiques

Constantes de Oort (Kerr et Lynden-Bell, 1986) :

$$\begin{aligned} \mathrm{A} &= 14.4 \pm 1.2\,(\mathrm{km/s})\ \mathrm{kpc}^{-1}, \\ \mathrm{A-B} &= 26.4 \pm 1.9\,(\mathrm{km/s})\ \mathrm{kpc}^{-1}. \end{aligned}$$

2.6.4. Valeurs estimées de quantités dynamiques

Paramètres post-newtoniens (PPN) :

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.0000 \pm 0.0002,\\ \gamma &= 1.000 \pm 0.002,\\ \frac{2+2\gamma-\beta}{3} &= 1.00 \pm 0.02.\end{aligned}$$

Bien que le paramètre α n'apparaisse pas formellement dans les paramètres PPN, il apparaît comme un facteur clé en astrométrie pour exprimer la dilatation du temps et le *décalage vers le rouge* $(3/2+\alpha)$. Les paramètres β et γ caractérisent la plupart des effets relativistes en astrométrie ; $1+\gamma$ caractérise le *retard* et la déflexion de la lumière, $2+2\gamma-\beta$ caractérise le *décalage du péricentre.*

Pour la relativité générale d'Einstein, on a :

$$\begin{cases}\alpha &= 0\\ \beta &= \gamma = 1\end{cases}$$

2.6.5. Autres unités

On donne dans ce dernier paragraphe les définitions de quelques unités ne faisant pas partie du Système International mais rencontrées dans la littérature et encore tolérées (Cohen et Taylor, 1986 ; Bureau des longitudes, 1981, 1986).

L'électronvolt

L'électronvolt (eV) est une unité en usage avec le Système International (en physique atomique) ; sa valeur en unité SI est obtenue expérimentalement. Un électronvolt est l'énergie cinétique acquise par un électron en subissant une différence de potentiel de 1 V dans le vide :

$$1 \text{ eV} = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19}\,\text{J approximativement.}$$

L'angström

L'angström (Å), est encore utilisé en spectroscopie et en microscopie. On a :

$$1 \text{ Å} = 10^{-10}\,\text{m} = 10^{-4}\,\mu\text{m} = 0.1\,\text{nm}.$$

Le Gauss

Le Gauss (Gs ou G) est le nom donné à l'unité CGS électromagnétique d'induction magnétique. On a :

$$1 \text{ Gs} = 10^{-4}\,\text{T}.$$

Le Gamma

Le Gamma (γ), est une unité utilisée pour exprimer l'intensité du champ magnétique. On a :

$$1\,\gamma = 10^{-9}\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{nT}.$$

L'atmosphère

L'atmosphère, unité employée pour la pression, vaut 101 325 Pa. L'usage de cette unité est fortement déconseillé ; elle n'est donnée ici qu'à titre d'information.

L'inch

L'inch (pouce) unité anglo-saxonne de longueur, est utilisé pour donner les diamètres des objectifs de certains instruments astronomiques. On a :

$$1 \text{ inch} = 2.54\,\mathrm{cm}.$$

Le pouce utilisé en France, ou *zoll* en Allemagne, n'avait pas tout à fait la même valeur : 2.707 cm.

Le jansky

On peut mesurer l'intensité des radio-sources par la densité de flux $S(\mathrm{v})$ qui est l'énergie reçue de l'ensemble d'une source de dimension finie, par unité de surface réceptrice placée sur terre perpendiculairement à la direction de la source, par seconde et par hertz de bande. Étant donnée la faible intensité des radio-sources on exprime $S(\mathrm{v})$ en jansky.

$$1 \text{ jansky} = 10^{-26}\,\mathrm{W\ m^{-2}\,Hz^{-1}}.$$

2.7. BIBLIOGRAPHIE

Aksnes, K. : 1978, The motion of Jupiter XIII (Leda), 1974-2000, *Astron. J.* **83**, 1249.

Banfield, D., Murray, N. : 1992, A dynamical history of the inner Neptunian satellites, *Icarus* **99**, 390.

Bec-Borsenberger, A. : 1996, Communication privée.

BIPM : 1991, *Le Système International d'unités (SI)*, Pavillon de Breteuil, Sèvres.

Blaauw, A., Gum, C.S., Pawsey, J.L., Westerhout, G. : 1960, The new IAU system of galactic coordinates (1958 revision), *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **121**, 123.

Bond, W.C. : 1851, On the new ring of Saturn, *Astron. J.* **2**, 5.

Buratti, B., Veverka, J. : 1984, Voyager photometry of Rhea, Dione, Tethys, Enceladus and Mimas, *Icarus* **58**, 254.

Bureau des longitudes : 1981, La physique, *Encyclopédie scientifique de l'univers* **IV**, Gauthier-Villars, Paris.

Bureau des longitudes : 1986, Les étoiles, le système solaire, *Encyclopédie scientifique de l'univers* **II**, Gauthier-Villars, Paris.

Bureau des longitudes : à partir de 1995, Éphémérides des satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus, *Supplément à la Connaissance des Temps*, Bureau des longitudes, Paris.

Bureau des longitudes : à partir de 1996, Éphémérides des satellites faibles de Jupiter et de Saturne, *Supplément à la Connaissance des Temps*, Bureau des longitudes, Paris.

Bursa, M. : 1992, Parameters of common relevance of astronomy, geodesy and geodynamics, *Bull. Géod.* **66**, 193.

Campbell, J.K., Anderson, J.D. : 1989, Gravity field of the Saturnian system from Pioneer and Voyager tracking data, *Astron. J.* **97**, 1485.

Campbell, J.K., Synnot S.P. : 1985, Gravity field of the Jovian system from Pioneer and Voyager tracking data, *Astron. J.* **90**, 364.

Chapront-Touzé, M. : 1988, ESAPHO : a semi-analytical theory for the orbital motion of Phobos, *Astron. Astrophys.* **200**, 255.

Chapront-Touzé, M. : 1990, Orbits of the Martian satellites from ESAPHO and ESADE theories, *Astron. Astrophys.* **240**, 159.

Christy, J.W., Harrington, R.S. : 1978, The satellite of Pluto, *Astron. J.* **83**, 1005.

Clemence, G.M. : 1948, On the system of astronomical constants, *Astron. J.* **53**, 1170.

Cohen, E.R., Taylor, B.N. : 1986, The 1986 adjustement of the fundamental physical constants, *Codata Bulletin* **63**.

Cornu, M.A. : 1876, Mémoire sur la détermination de la vitesse de la lumière, *Annales de l'observatoire de Paris*, tome **XIII**, Gauthier-Villars, Paris.

Davies, M.E., Abalakin, V.K., Bursa, M., Lieske, J.H., Morando, B., Morrison, D., Seidelmann, P.K., Sinclair, A.T., Yallop, B., Tjuflin, Y.S. : 1996, Report of the IAU/IAG/COSPAR working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites : 1994, *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **63**, 127.

De Sitter, W. : 1938, On the system of astronomical constants, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* vol. **VIII**, 213.

Dickey, J.O. : 1989, Intercomparisons between kinematic and dynamical systems, in *Reference frames in astronomy and geophysics*, J. Kovalevsky, I.I. Mueller and B. Kolaczek eds., Kluwer, Dordrecht, 305.

Dourneau, G. : 1993, Orbital elements of the eight major satellites of Saturn determined from a fit of their theories of motion to observations from 1886 to 1985, *Astron. Astrophys.* **267**, 292.

Duncombe, R.L. : 1969, Heliocentric coordinates of Ceres, Pallas, Juno, Vesta 1928-2000, *Astron. Pap. Amer. Ephem.* **XX**.

Duxbury, T.C., Callahan, J.D. : 1989, Phobos and Deimos control networks, *Icarus* **77**, 275.

Eckert, W.J., Brouwer, D., Clemence, G.M. : 1951, Coordinates of the five outer planets 1653-2060, *Astron. Pap. Amer. Ephem.* **XII**.

Elliot, J.L., Dunham, E., Millis, R.L. : 1977, Discovering the rings of Uranus, *Sky and Telescope* **53**, 412.

Esposito, L.W., Dilley, J.P., Fountain, J.W. : 1980, Photometry and polarimetry of Saturn's rings from Pioneer Saturn, *J. Geophys. Res.* **85**, 5948.

Esposito, L.W., Cuzzi, J.N., Holberg, J.B., Marouf, E.A., Tyler, G.L., Porco, C.C. : 1984, Saturn's rings, in *Saturn*, T. Gehrels and M.S. Matthews eds., 473.

Fairhead, L., Bretagnon, P. : 1990, An analytical formula for the time transformation TB-TT, *Astron. Astrophys.* **229**, 240.

Feibelman, W.A. : 1967, Concerning the "D" ring of Saturn, *Nature* **214**, 793.

Fountain, J.W., Larson, S.M. : 1978, Saturn's ring and nearby faint satellites, *Icarus* **36**, 92.

French, R.G., Elliot, J.L., French, L.M., Kangas, J.A., Meech, K.J., Ressler, M.E., Buie, M.W., Frogel, J.A., Holberg, J.B., Fuensalida, J.J., Joy, M. : 1988, Uranian ring orbits from Earth-based and Voyager, occultation observations, *Icarus* **73**, 349.

Fukushima, T. : 1990, System of astronomical units and constants, *IAU-WGRS/SGAC Circ.* **13**.

Gaillot, A. : 1904, Tables rectifiées du mouvement de Saturne, *Annales de l'observatoire de Paris*, tome **XXIV**, Gauthier-Villars, Paris.

Gehrels, T., Baker, L.R., Beshore, E., Blenman, C., Burke, J.J., Castillo, N.D., Da Costa, B., Degewij, J., Doose, L.R., Fountain, J.W., Gotobed, J., Kenknight, C.E., Kingston, R., McLaughlin, G., McMillan, R., Murphy, R., Smith, P.H., Stoll, C.P., Strickland, R.N., Tomasko, M.G., Wijesinghe, M.P., Coffeen, D.L., Esposito, L.W. : 1980, Imaging photopolarimeter on Pioneer Saturn, *Science* **207**, 434.

Harrington, R.S., Christy, J.W. : 1980, The satellite of Pluto, II, *Astron. J.* **85**, 442.

Harrington, R.S., Christy, J.W. : 1981, The satellite of Pluto, III, *Astron. J.* **86**, 442.

Hubbard, W., Brahic, A., Sicardy, B., Elicer, L.A., Roques, F., Vilas, F. : 1986, Occultation detection of a Neptunian ring-like arc, *Nature* **319**, 636.

IERS : 1992, IERS standards (1992), *IERS Technical note* **13**, D.D. McCarthy ed., observatoire de Paris.

Jacobson, R.A. : 1990, The orbits of the satellites of Neptune, *Astron. Astrophys.* **231**, 241.

Jacobson, R.A., Campbell, J.K., Taylor, A.H., Synnott, S.P. : 1992, The masses of Uranus and its major satellites from Voyager tracking data and Earth-based Uranian satellite data, *Astron. J.* **103**, 2068.

Jacobson, R.A., Riedel, J.E., Taylor, A.H. : 1991, The orbits of Triton and Nereid from spacecraft and Earth-based observations, *Astron. Astrophys.* **247**, 565.

Johnson, T., Becklin, E.E., Wynn-Williams, C.G., Pilcher, C.B., Morgan, J.S. : 1979, Jupiter, *Circ. UAI* **3338**.

Kerr, F.J., Lynden-Bell, D. : 1986, Review of galactic constants, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **221**, 1023.

Laskar, J., Jacobson, R.A. : 1987, GUST86. An analytical ephemeris of the Uranian satellites, *Astron. Astrophys.* **188**, 212.

Le Verrier, U.-J. : 1856, Recherches astronomiques, *Annales de l'observatoire impérial de Paris*, tome **II**, 52, Mallet-Bachelier, Paris.

Le Verrier, U.-J. : 1858, Recherches astronomiques, *Annales de l'observatoire impérial de Paris*, tome **IV**, 102, Mallet-Bachelier, Paris.

Le Verrier, U.-J. : 1876, Recherches astronomiques, *Annales de l'observatoire de Paris*, tome **XIII**, 9, Gauthier-Villars, Paris.

Lieske, J.H. : 1980, Improved ephemerides of the Galilean satellites, *Astron. Astrophys.* **82**, 340.

Lieske, J.H. : 1987, Galilean satellites evolution : observational evidence for secular changes in mean motions, *Astron. Astrophys.* **176**, 146.

Melbourne, W., Anderle, R., Feissel, M., King, R., McCarthy, D.D., Smith, D., Tapley, B., Vicente, R. : 1983, Project MERIT standards, *U.S. Naval Observatory*, Circ. **167**.

Moritz, H. : 1992, Geodetic reference system 1980, *Bull. Géod.* **66**, 187.

Murray, C.A. : 1989, The transformation of coordinates between the systems of B1950.0 and J2000.0 and the principal galactic axes referred to J2000.0, *Astron. Astrophys.* **218**, 325.

Newcomb, S. : 1895, The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy, *Supplement for the American Ephemeris and Nautical Almanac* for 1896, USGPO, Washington D.C.

Newcomb, S. : 1898, Tables of the four inner planets, *Astron. Pap. Amer. Ephem.* vol. **VI**, Washington.

Newhall, XX, Standish, E.M., Williams, J.G. : 1983, DE102 : a numerically integrated ephemeris of the Moon and planets spanning forty-four centuries, *Astron. Astrophys.* **125**, 150.

Nicholson, P.D., Cooke, M.L., Matthews, K., Elias, J.H., Gilmore, G. : 1990, Five stellar occultations by Neptune : further observations of ring arcs, *Icarus* **87**, 1.

Nicholson, P.D., Matthews, K. : 1991, Near-infrared observations of the Jovian ring and small satellites, *Icarus* **93**, 331.

Null, G.W., Owen, W.M., Synnott, S.P. : 1993, Masses and densities of Pluto and Charon, *Astron. J.* **105**, 2319.

Owen, W.M., Synnott, S.P. : 1987, Orbits of the ten small satellites of Uranus, *Astron. J.* **93**, 1268.

Owen, W.M., Vaughan, R.M., Synnott, S.P. : 1991, Orbits of the six new satellites of Neptune, *Astron. J.* **101**, 1511.

Pascu, D., Panossian, S.P., Schmidt, R.E., Seidelmann, P.K., Hershey, J.L. : 1992, B, V photometry of Thebe (JXIV), *Icarus* **98**, 38.

Robertson, D.S., Fallon, F.W., Carter, W.E. : 1986, Celestial reference coordinate systems submilliarcsecond precision demonstrated with VLBI observations, *Astron. J.* **91**, 1456.

Rocher, P. : 1996, Communication privée.

Seidelmann, P.K., Fukushima, T. : 1992, Why new time scales ?, *Astron. Astrophys.* **265**, 833.

Showalter, M.R., Cuzzi, J.N., Marouf, E.A., Esposito, L.W. : 1986, Satellite "wakes" and the orbit of the Encke gap moonlet, *Icarus* **66**, 297.

Showalter, M.R. : 1990, Saturn, *Circ. UAI* **5052**.

Simon, J.-L., Bretagnon, P., Chapront, J., Chapront-Touzé, M., Francou, G., Laskar, J. : 1994, Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets, *Astron. Astrophys.* **282**, 663.

Smith, B.A., Soderblom, L., Beebe, R., Boyce, J., Briggs, G., Bunker, A., Collins, S.A., Hansen, C.J., Johnson, T.V., Mitchell, J.L., Terrile, R.J., Carr, M., Cook II, A.F., Cuzzi, J.N., Pollack, J.B., Danielson, G.E., Ingersoll, A., Davies, M.E., Hunt, G.E., Masursky, H., Shoemaker, E., Morrison, D., Owen, T., Sagan, C., Veverka, J., Strom, R., Suomi, V.E. : 1981, A new look at the Saturn system : the Voyager 2 images, *Science* **212**, 163.

Standish, E.M. : 1982, Orientation of the JPL ephemerides, DE200/LE200, to the dynamical equinox of J2000, *Astron. Astrophys.* **114**, 297.

Standish, E.M. : 1990, The observational basis for JPL'S DE200, the planetary ephemerides of the Astronomical Almanac, *Astron. Astrophys.* **233**, 252.

Standish, E.M., Newhall, XX, Williams, J.G., Folkner, W.F. : 1995, JPL planetary and lunar ephemerides DE403/LE403, *JPL Interoffice Memorandum* **314**, 10.

Stone, E.C., Miner, E.D. : 1982, Voyager 2 encounter with the Saturnian system, *Science* **215**, 499.

Synnott, S.P. : 1984, Orbits of the small inner satellites of Jupiter, *Icarus* **58**, 178.

Synnott, S.P., Peters, C.F., Smith, B.A., Morabito, L.A. : 1981, Orbits of the small satellites of Saturn, *Science* **212**, 191.

Synnott, S.P., Terrile, R.J., Jacobson, R.A., Smith, B.A. : 1983, Orbits of Saturn's F ring and its shepherding satellites, *Icarus* **53**, 156.

Tholen, D.J., Buie, M.W. : 1990, Further analysis of Pluto-Charon mutual event observations - 1990, *BAAS* **22**, 1129.

Tholen, D.J., Zellner, B. : 1983, Eight-color photometry of Hyperion, Iapetus and Phoebe, *Icarus* **53**, 341.

Thomas, P., Weitz, C., Veverka, J. : 1989, Small satellites of Uranus : disk integrated photometry and estimated radii, *Icarus* **81**, 92.

Thuillot, W., Vu, D.T. : 1986, Excentricités et inclinaisons moyennes des orbites des satellites galiléens de Jupiter, *Notes scientifiques et techniques du Bureau des longitudes* **S009**.

Tyler, G.L., Eshleman, V.R., Anderson, J.D., Levy, G.S., Lindal, G.F., Wood, G.E., Croft, T.A. : 1982, Radio science with Voyager 2 at Saturn : atmosphere and ionosphere and the masses of Mimas, Tethys and Iapetus, *Science* **215**, 553.

UAI : 1939, Report of the VIth general assembly, Stockholm 1938, *Trans. IAU* **VI**, Univ. Press, Cambridge.

UAI : 1966, Proceedings of the XIIth general assembly, Hambourg 1964, *Trans. IAU* **XII B**, Reidel, Dordrecht.

UAI : 1977, Proceedings of the XVIth general assembly, Grenoble 1976, *Trans. IAU* **XVI B**, Reidel, Dordrecht.

UAI : 1982, Proceedings of the XVIIIth general assembly, Patras 1982, *Trans. IAU* **XVIII B**, Reidel, Dordrecht.

UAI : 1992, Proceedings of the XXIst general assembly, Buenos Aires 1991, *Trans. IAU* **XXI B**, Reidel, Dordrecht.

Wahr, J.M. : 1981, The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* **64**, 705.

Young, L.A., Olkin, C.B., Elliot, J.L., Tholen, D.J., Buie, M.W. : 1994, The Charon-Pluto mass ratio from MKO astrometry, *Icarus* **108**, 186.