Fondement des Conventions IERS

Standards en astronomie
et genèse des Conventions IERS
Recommandations et Résolutions (IAG, IAU)

Nicole Capitaine
SYRTE, Observatoire de Paris,
Université PSL, CNRS, Sorbonne Université

En hommage à Jean Kovalevsky

décédé le 18 août à l'hôpital de Grasse

Spécialiste de renommée internationale en astrométrie, mécanique céleste, géodésie spatiale, métrologie, il a joué un rôle de tout premier plan dans les domaines traités aujourd'hui.

Astronome émérite à l'Observatoire de la Côte d'Azur,

Membre de l'Académie des Sciences et Membre honoraire du Bureau des Longitudes.

Ancien élève de l'Ecole normale supérieure, Doctorat d'Etat à l'Université de Yale.

Chef du Service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes (1960-1971).

Responsabilités dans le programme spatial français pour les satellites DIA, C et D.

Premier Directeur exécutif du Groupe de recherches de géodésie spatiale (1971-1978).

Un des créateurs du CERGA (1974), à Grasse, dont il a été le premier directeur.

Coordinateur (dès 1979) du consortium international FAST, chargé de la réduction des données du satellite astrométrique Hipparcos, dont les résultats ont dépassé les espérances les plus optimistes.

Est l'auteur de nombreux travaux, articles et ouvrages sur la mécanique céleste, l'astrométrie, et les systèmes de référence célestes, qui sont des références internationales.

Président du Bureau National de Métrologie (1994-2001) et du Comité international des poids et mesures (1996-2004).

Plan

- *Contexte historique*
- *Les systèmes de constantes astronomiques fondamentales (1896-2012)*
- *Les Résolutions UAI 1997-2012 relatifs aux systèmes de référence*
- *Les standards astro-géodésiques (1966-2010)*

Contexte historique

Définition et usage des constantes/standards en astronomie/géodésie

Système de constantes/standards astro-géodésiques: ensemble de valeurs numériques conventionnelles adoptées pour certaines constantes intervenant dans la représentation des observations astronomiques et géodésiques et dans la théorie des mouvements des objets célestes ou artificiels.

- Les valeurs numériques attribuées à ces constantes
  - sont à la base de tout calcul astronomique et/ou géodésique
  - fixent la représentation dynamique du système Terre-Lune et du solaire et permettent leur utilisation comme référence pour les objets galactiques et extragalactiques
- La cohérence et l'exactitude de ce système de constantes sont d'une grande importance
  - pour toute réduction d'observation des satellites artificiels, de la Lune, du Soleil, des planètes, des étoiles, ou d'autres objets du système solaire
  - pour tout calcul théorique de position ou de mouvement d'un astre ou d'un corps du système Terre-Lune et du système solaire

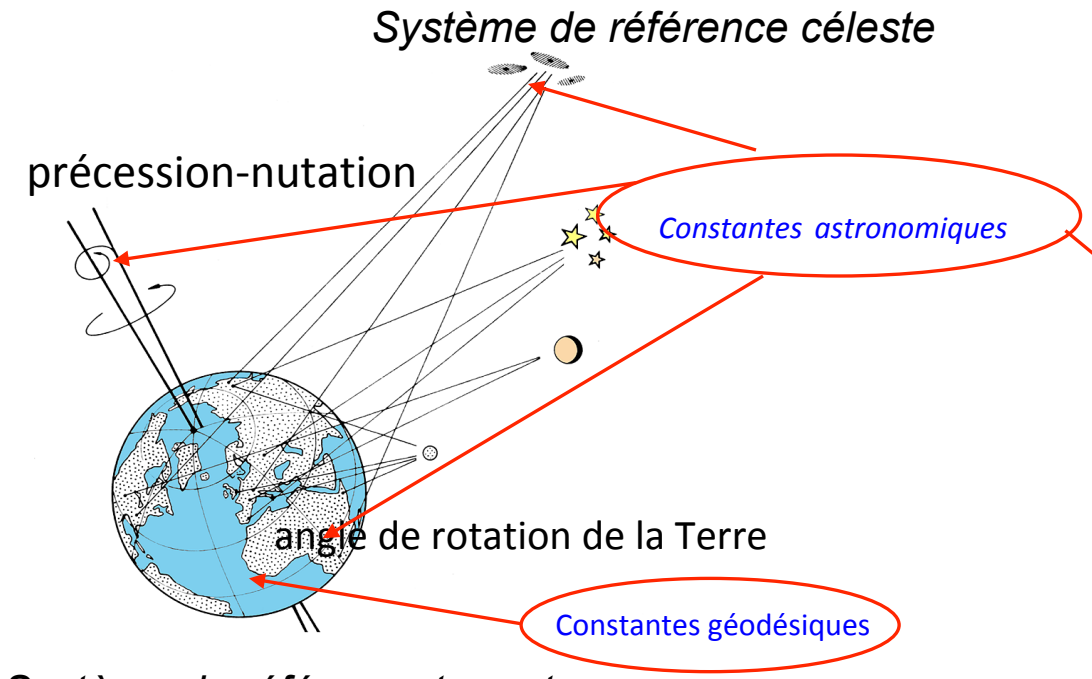
Un système de constantes/ standards est associé à un système de référence céleste fondamental et une échelle de temps pour les théories dynamiques et la datation des observations. Il est essentiel pour le calcul d'éphémérides de satellites artificiels et astronomiques.

On peut adopter des unités de taille appropriée pour un usage pratique (temps, longueur, masse)

Usage des constantes/standards

Observations astronomiques

Théorie
éphémérides des planètes
du système solaire

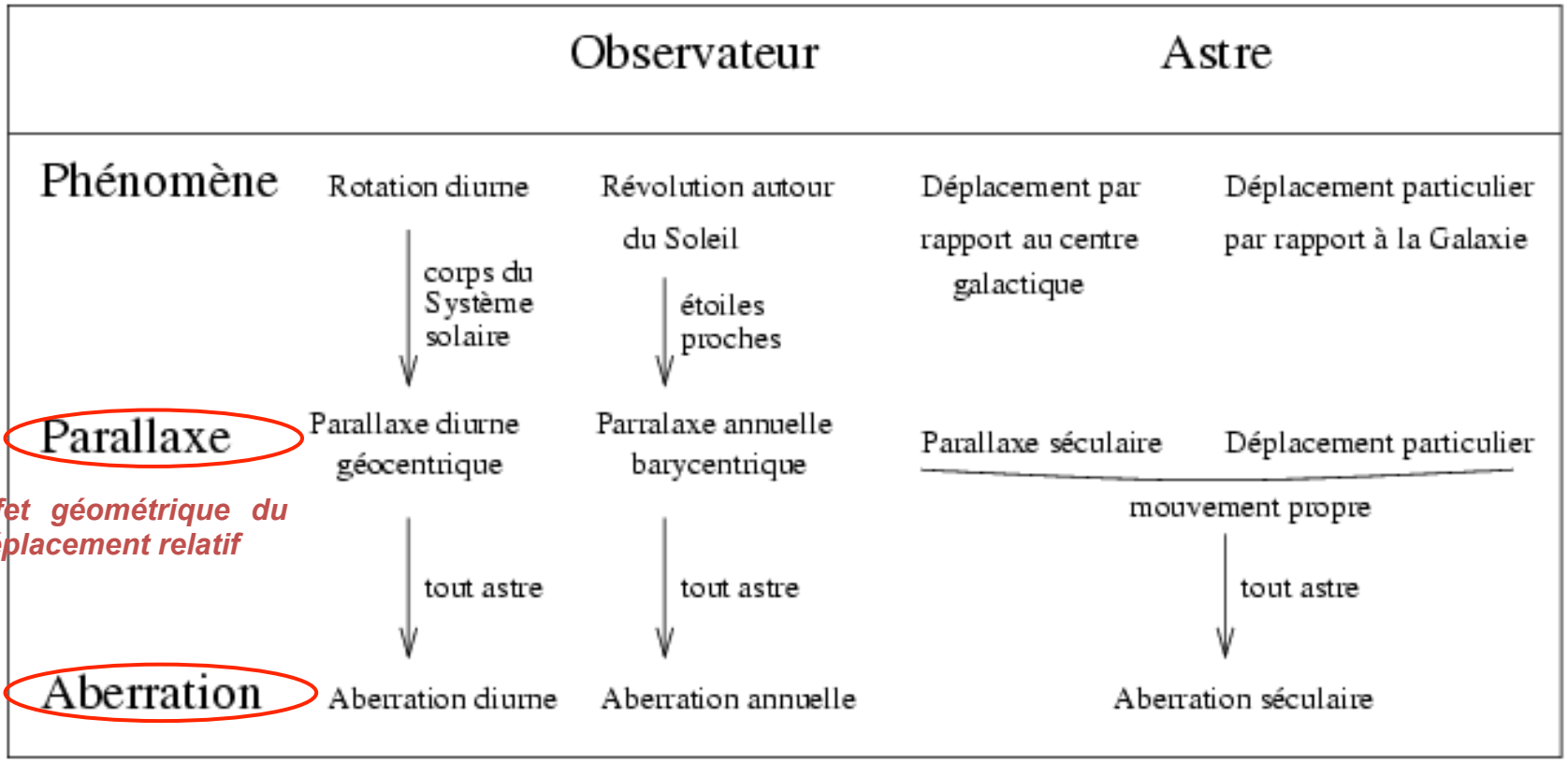


Mouvement des planètes
dans le système solaire

Quelques constantes astronomiques historiques:

constantes de parallaxe diurne et d'aberration annuelle

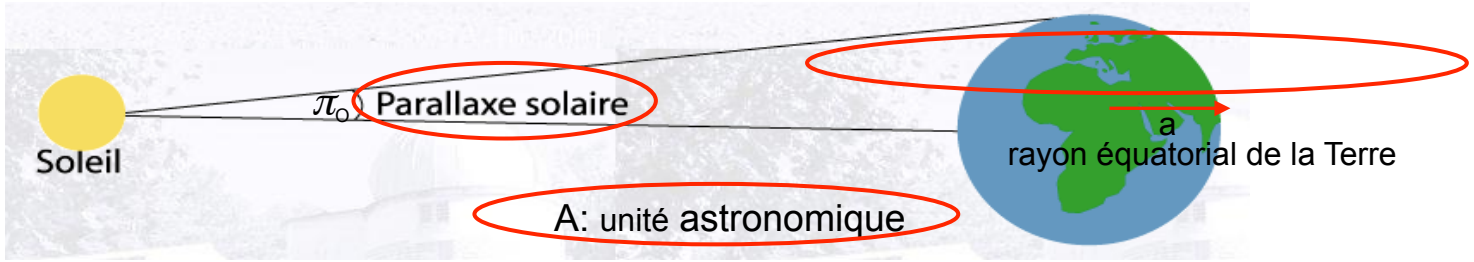
déplacement apparent de la direction d'un astre



effet géométrique du déplacement relatif

changement apparent de la direction de l'astre dû à la vitesse relative de l'observateur par rapport à l'astre et à la vitesse finie de propagation des ondes électromagnétiques

Parallaxe solaire (ou diurne)



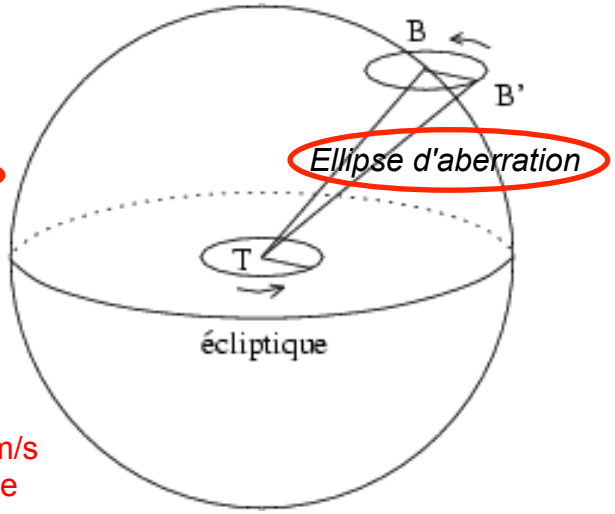
Constante de parallaxe solaire, π_O = *arcsin(a/A)*

C'est l'angle sous lequel on voit le rayon de la Terre depuis le Soleil,

C'est la différence angulaire sous laquelle deux observateurs (l'un au centre de la Terre et l'autre sur la Terre) observant le Soleil à l'horizon, voient le centre du Soleil.

Aberration annuelle des étoiles

$$\frac{na}{c\sqrt{1-e^2}} = k \quad \text{" constante de l'aberration "} \qquad = 20.50\,''$$



$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos v}$$

$$r^2 \frac{dv}{dt} = n a^2 \sqrt{1-e^2}$$

$$\Rightarrow \quad v_n = r\frac{dv}{dt} = \frac{na}{\sqrt{1-e^2}}(1+e\cos v)$$

vitesse normale au rayon vecteur

vitesse de la Terre sur son orbite ~ 30 km/s
direction varie avec une période annuelle

Si on suit la Terre, T, dans son mouvement annuel autour du Soleil, la position apparente B' d'un astre décrit une ellipse autour de sa position géométrique B.

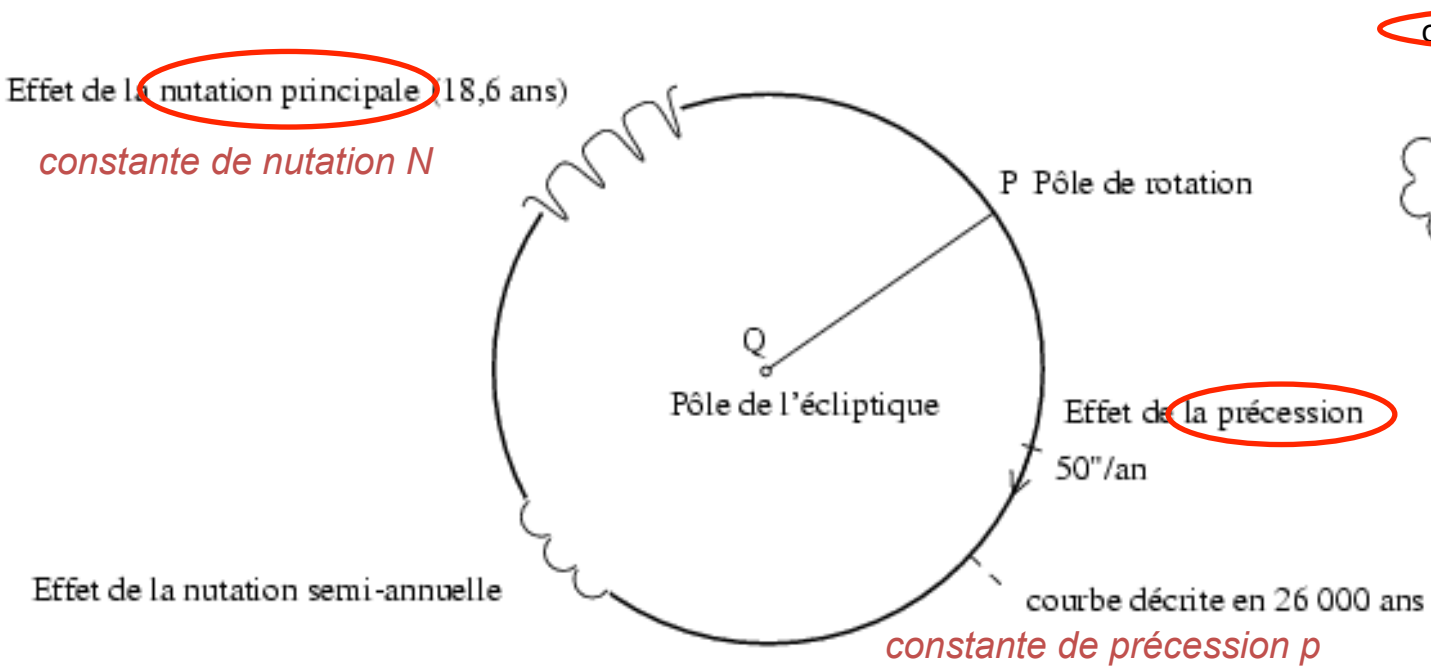
Contrairement à l'effet de parallaxe annuelle, l'effet d'aberration annuelle est indépendant de la distance de l'étoile au Soleil.

L'angle $\Delta\theta$ entre la direction apparente et la direction géométrique dû à l'effet d'aberration, est tel que sin BTB'= *k* sin θ, θ étant l'angle entre la direction de l'astre et la direction de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil et *k* la constante de l'aberration.

Quelques constantes astronomiques historiques:

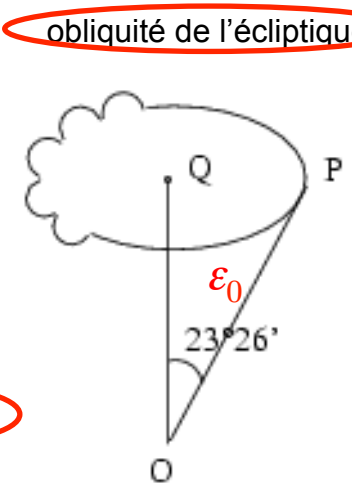
constantes de précession, nutation

Effet du déplacement céleste de l'axe de la Terre



constante de nutation N

constante de précession p

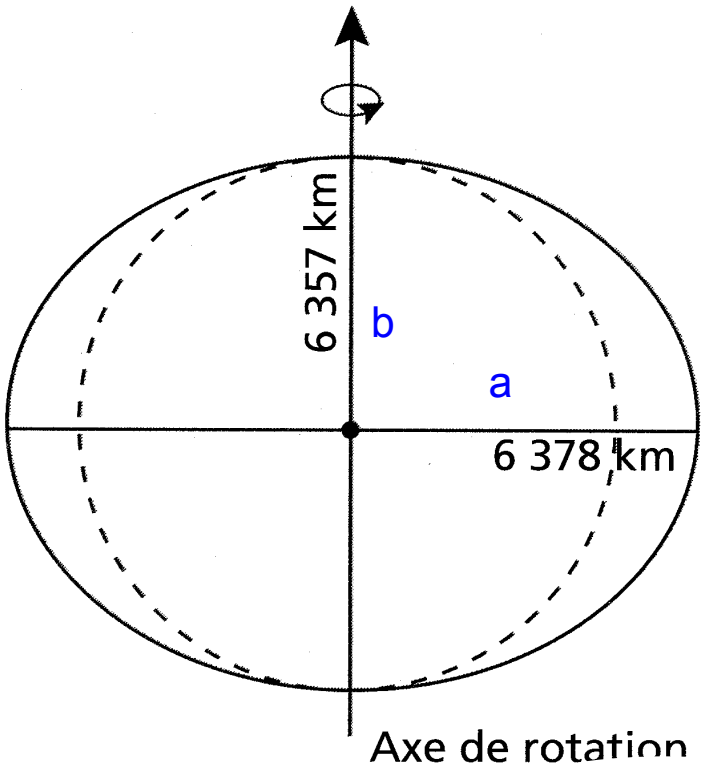


constante de l'obliquité de l'écliptique, ε_0, à la date t_0

d'où l'on déduit l'aplatissement dynamique de la Terre: C-A/C (A, A, C étant les moments principaux d'inertie de la Terre)

Quelques constantes astro-géodésiques historiques:
aplatissement géométrique de la Terre

f = (a-b)/a



a: rayon équatorial
b: rayon polaire

*Constantes astronomiques fondamentales et éphémérides**

- 1679: Etablissement en France d'éphémérides astronomiques annuelles (pour le méridien de Paris), *La Connaissance des temps*, sous la responsabilité du Bureau des longitudes depuis 1795.
- 1766: *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris* (pour le méridien de Greenwich) par l'Astronomer Royal of England.
- 1852: *The American Ephemeris and Nautical Almanac* (pour le méridien de Washington ou de Greenwich).
- Au cours du 19è siècle, les valeurs des constantes astronomiques employées par les diverses éphémérides étaient différentes et changeaient souvent, ce qui introduisait
  - des différences systématiques et des incohérences,
  - des difficultés à connaître celles qui ont été utilisées pour la réduction des observations.
- 1884: Conférence de Washington qui adopte le méridien de Greenwich (loi du 9 mars 1911 en France).
- Le développement de la coopération internationale, en particulier l'entreprise de la *Carte du Ciel* (1887) montrait la nécessité d'une certaine unification.
- 1895: Première discussion générale des observations astronomiques (S. Newcomb) afin de déterminer les valeurs les plus probables des constantes astronomiques.

* *Ephémérides: tables astronomiques donnant tous les éléments nécessaires au calcul du mouvement des planètes dans le système solaire et à la réduction d'observations d'étoiles.*

Le premier système de constantes astronomiques fondamentales

1895: Lettre du Superintendant du *Nautical almanac* (M. Downing) adressée à M. Loewy (directeur *Connaissance des temps)* sur « l'opportunité qu'il y aurait à adopter un même système d'étoiles fondamentales dans les diverses éphémérides astronomique »

M. Loewy consulte le Bureau des longitudes :

« Ce corps savant reconnut à l'unanimité le haut intérêt qui s'attachait à la question soulevée par l'astronome anglais. La marche si rapide de la science moderne, les progrès incessants accomplis rendent partout, en effet, très désirable une entente entre les savants chargés de publications similaires d'une utilité générale. Dans le cas considéré, il lui parut hors de doute que l'adoption d'un même système de constantes et une meilleure coordination de certains résultats figurant dans les diverses éphémérides présenteraient un grand avantage pour l'exécution des travaux que intéressent à la fois l'astronomie, la navigation et la géodésie ».

• 1896: «Conférence internationale des étoiles fondamentales » (Paris, 18 mai 1896, Palais de l'Institut, salle des séances du Bureau des longitudes) présidée par M. Loewy.

- *Discussions sur catalogues d'étoiles, constantes de la nutation, d'aberration, de précession.*
- *Adoption d'un ensemble de* valeurs à partir de 1901.

• Ce premier système de constantes fondamentales comprenait 8 constantes, considérées comme conventionnelles jusqu'en 1967 pour la réduction des observations et le calcul d'éphémérides. D'autres constantes furent introduites dans l'usage courant avec des valeurs conventionnelles de façon parfois incohérente.

Valeurs adoptée pour 8 constantes par la Conférence internationale des étoiles fondamentales, Paris, 1896

En application à partir de 1901

1° La *constante de la précession* ..... $p = 50'',2564$;

2° La *constante de la nutation* .. $N_0 = 9'',21$;

3° L'*obliquité de l'écliptique* ... $\varepsilon = 23^{\circ}27'8'',26$;

4° La *constante de l'aberration* .. $\varkappa = 20'',47$;

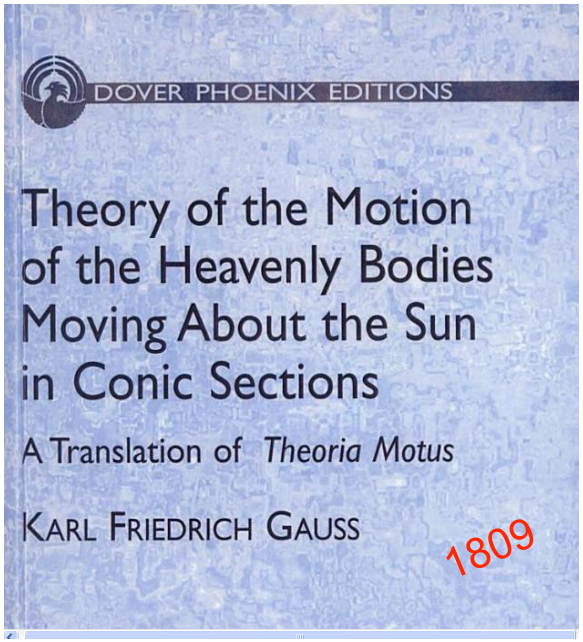
5° La *parallaxe solaire* ..... $\varpi_0 = 8'',80$.

6° L'*aplatissement de l'ellipsoïde terrestre* ..... $\alpha = 1/297$;

7° Le *rayon équatorial terrestre* ..... $a_e = 6\,378\,388$ m;

8° La *constante de la gravitation universelle* ..... $k = 0,017\,202\,098\,95$.

Choix des unités astronomiques



IV. For different bodies moving about the sun, the squares of these quotients are in the compound ratio of the parameters of their orbits, and of the sum of the masses of the sun and the moving bodies.

Denoting, therefore, the parameter of the orbit in which the body moves by $2p$, the mass of this body by μ (the mass of the sun being put $=1$), the area it describes about the sun in the time t by $\frac{1}{2}g$, then $\frac{g}{t\sqrt{p}\sqrt{(1+\mu)}}$ will be a constant for all heavenly bodies. Since then it is of no importance which body we use for determining this number, we will derive it from the motion of the earth, the mean distance of which from the sun we shall adopt for the unit of distance; the mean solar day will always be our unit of time. Denoting, moreover, by π the ratio of the circumference of the circle to the diameter, the area of the entire ellipse described by the earth will evidently be $\pi\sqrt{p}$, which must therefore be put $=\frac{1}{2}g$, if by t is understood the sidereal year; whence, our constant becomes $=\frac{2\pi}{t\sqrt{(1+\mu)}}$. In order to ascertain the numerical value of this constant, hereafter to be denoted by k, we will put, according to the latest determination, the sidereal year or $t=365.2563835$, the mass of the earth, or $\mu=\frac{1}{354710}=0.0000028192$, whence results

$\log 2\pi$	0.7981798684
Compl. $\log t$	7.4374021852
Compl. $\log \sqrt{(1+\mu)}$ . . .	9.9999993878
$\log k$	8.2355814414
$k=$	0.01720209895

: Constante de Gauss

Systèmes de référence adoptés dans les éphémérides

1896: Conférence internationale des étoiles fondamentales (Paris,18-19 mai)

1911: Congrès international des éphémérides astronomiques (Paris, 23-26 octobre)

1922: 1ère Assemblée générale de l'Union Astronomique internationale (Rome, 2-10 mai)

1941: adoption du catalogue FK3 comme système de référence fondamental

1964: adoption du catalogue FK4 comme système de référence fondamental

1984: adoption du catalogue FK5 comme système de référence fondamental
associé à la précession UAI 1976

- adoption des éphémérides planétaires DE200/LE200 du JPL par *AsA*
- adoption des théories planétaires du BDL dans la *Connaissance des temps*

1998: adoption du Système/Repère de référence céleste ICRS/ICRF
ICRF1 (1998); ICRF2 (2009); ICRF3 (2018)

2003: adoption des éphémérides planétaires DE405/LE405 du JPL par *AsA*

2006: adoption des éphémérides planétaires INPOP dans la *Connaissance des temps*

Echelles de temps pour l'astronomie

Temps solaire vrai, puis temps solaire moyen (1816), puis temps solaire moyen à l'échelle d'un pays (1891 en France), puis temps moyen de Greenwhich (1911)

Temps Universel UT1: rotation de la Terre. Reflète ses inégalités

- échelle de temps + def s -> jusqu'en 1960

Temps des éphémérides TE: révolution de la Terre. Usage peu pratique

- def s: 1960-1967
- Échelle de temps pour les éphémérides dans le système UAI 1964

1967: Seconde du SI = seconde « atomique »

1972: TAI reconnu au niveau international:

échelle construite par accumulation de secondes du SI au niveau de la mer moyenne de lecture de 300 horloges atomiques

Échelle de temps scientifique TAI

→ Temps universel coordonné (UTC) : UTC = TAI + n

→ TT, TCB, TCG, TDB: « pour » les éphémérides en prolongement de TE mais en cohérence avec la RG (temps-coordonnées géocentrique et barycentrique)

Angles de rotation de la Terre exprimés en fonction de UT1: TS, ERA

Les systèmes UAI de constantes astronomiques fondamentales

Les systèmes de constantes astronomiques fondamentales de l'UAI

Système UAI-1964: 1er ensemble cohérent de constantes

Adopté en 1964; appliqué à partir de 1968

– 2 constantes de définition, 10 constantes primaires, 12 constantes secondaires, et masses des planètes principales par rapport à la masse du Soleil

Système UAI 1976-1980: 1er système associant un système de référence céleste (catalogue d'étoiles, FK5) et un ensemble cohérent de constantes et de modèles

Adopté en 1976 et 1980; appliqué à partir de 1984

– 1 constante de définition, 9 constantes primaires, 11 constantes dérivées, les masses des planètes principales et quelques autres valeurs recommandées pour certaines constantes

Système UAI 2009-2012: 1er système associant le système de référence céleste extragalactique (ICRF2) et un ensemble cohérent de constantes et de modèles

Adopté en 2009 (appliqué à partir de 2010)

- classification plus rigoureuse des constantes suivant leur nature, une amélioration très significative de la précision des valeurs numériques, ajout de nouvelles constantes,

- expression des valeurs numériques en accord avec les différentes échelles de temps relativistes utilisées dans le système solaire.

Complété, en 2012 par une nouvelle définition de l'unité astronomique

Premier Système UAI: Système UAI 1964

appliqué à partir de 1968

LE SYSTÈME UAI DE CONSTANTES FONDAMENTALES

Nous donnons-ci-dessous le système de constantes fondamentales tel qu'il a été adopté en 1964 par l'Union astronomique internationale. On y trouvera aussi 12 constantes secondaires avec les relations qui les déterminent.

On remarquera qu'on a dû introduire dans ces relations des coefficients numériques F_1, F_2 et F_3, déduits de théories et qui sont des fonctions de constantes astronomiques non fondamentales, mais dont la valeur est connue avec une précision surabondante pour les besoins du formulaire.

Constantes de définition

Nombre de secondes de temps des éphémérides dans une année tropique (1900, janvier 0, 12^h TE)...	$s = 31\ 556\ 925{,}974\ 7$
Constante de la gravitation universelle définissant l'unité astronomique (UA).....	$k = 0{,}01720\ 20989\ 5$

Constantes primaires

Valeur de l'UA, en mètres.....	$A = 149\ 600.10^6$
Vitesse de la lumière, en mètres par seconde.....	$c = 299\ 792{,}5.10^3$
Rayon équatorial terrestre, en mètres.....	$a_e = 6\ 378\ 160$
Facteur d'ellipticité géopotentielle.	$J_2 = 0{,}001\ 082\ 7$
Constante géocentrique de la gravitation, en $m^3.s^{-2}$.....	$GM = 398\ 603.10^9$
Rapport de la masse de la Lune à celle de la Terre.....	$\mu = 1/81{,}30$
Moyen mouvement sidéral de la Lune, en radians par seconde (1900, janvier 0, 12^h TE).....	$n_C^* = 2{,}661\ 699\ 489.10^{-6}$

Précession générale en longitude par siècle tropique (1900,0).....	$p = 5\ 025'',64$
Obliquité de l'écliptique (1900,0)....	$\varepsilon = 23°27'8'',26$
Constante de la nutation (1900,0)....	$N_0 = 9'',2100$

Constantes secondaires

Parallaxe solaire...	arc sin $(a_e/A) = \varpi_0 = 8'',794\ 05$ $(8'',794)$ (1)
Temps de lumière relatif à l'UA....	$A/c = \tau_A = 499^s,012 = 1^s/0{,}002\ 003\ 96$
Constante de l'aberration.....	$F_1 k' \tau_A = \varkappa = 20'',4958$ $(20'',496)$ (1)
Aplatissement terrestre	$\alpha = 0{,}003\ 352\ 9 = 1/298{,}25$
Gravité à l'équateur.....	$g_e = 978{,}030\ 87$ gals
Constante héliocentrique de la gravitation, en $m^3.s^{-2}$.	$A^3 k'^2 = GS = 132\ 718.10^{15}$
Rapport de la masse du Soleil à celle de la Terre.....	$(GS)/(GM) = S/M = 332\ 958$
Rapport de la masse du Soleil à celle du système Terre-Lune.....	$S/M\,(1+\mu) = 328\ 912$
Demi-grand axe perturbé de l'orbite de la Lune, en mètres.....	$F_2[GM(1+\mu)/n_C^{*2}]^{\frac{1}{3}} = a_C = 384\ 400.10^3$
Sinus de la parallaxe de la Lune...	$a_e/a_C = \sin \varpi_C = 3\ 422'',451$
Constante de l'inégalité lunaire....	$\frac{\mu}{1+\mu}\frac{a_C}{A} = L = 6'',439\ 87$ $(6'',440)$ (1)
Constante de l'inégalité parallactique.....	$F_3 \frac{1-\mu a_C}{1+\mu A} = P_C = 124'',986$

(1) Les nombres arrondis entre parenthèses sont également admis.

Système UAI 1976/1980 de constantes astronomiques (1)

appliqué à partir de 1984

Unités : Les unités mètre (m), kilogramme (kg) et seconde (s) sont les unités de longueur, de masse et de temps du Système International d'Unités SI.

L'unité astronomique de temps (D) est le jour de 86 400 s
L'unité astronomique de masse (S) est la masse du Soleil
L'unité astronomique de distance (A) est le demi-grand axe de l'orbite autour du Soleil d'une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le moyen mouvement n est égal à la constante de Gauss k, l'unité de temps et l'unité de masse étant définies comme ci-dessus.

Constante de définition :

1	Constante de Gauss	$k = 0{,}017\,202\,098\,95$	

Constantes primaires :

2.	Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 299\,792\,458\ ms^{-1}$	$\pm 1.2\ ms^{-1}$
3.	Temps de lumière pour l'unité de distance	$\tau_A = 499{,}004\,782\ s$	$\pm 6 \times 10^{-6} s$
4.	Rayon équatorial de la Terre	$a = 6\,378\,140\ m$	$\pm 5\ m$
5.	Facteur d'ellipticité géopotentiel de la Terre	$J_2 = 0{,}001\,082\,63$	$\pm 1 \times 10^{-8}$
6.	Constante géocentrique de la gravitation	$GM = 3{,}986\,005 \times 10^{14} m^3 s^{-2}$	$\pm 3 \times 10^{8} m^3 s^{-2}$
7.	Constante de la gravitation	$G = 6{,}672 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$	$\pm 4 \times 10^{-14} m^3 kg^{-1} s^{-2}$
8.	Rapport de la masse de la Lune à la masse de la Terre	$\mu = 0{,}012\,300\,02$	$\pm 4 \times 10^{-8}$
9.	Précession générale en longitude par siècle julien pour J 2000,0	$p = 5\,029{,}''096\,6$	$\pm 0{,}''15$
10.	Obliquité de l'écliptique pour J 2000,0 : angle entre les plans de l'équateur et de l'écliptique	$\varepsilon_0 = 23^\circ 26'\ 21{,}''448$	$\pm 0{,}''10$
11.	Coefficients, pour J 2000,0, des termes les plus importants de la nutation	longitude / obliquité	
		$-\ 17{,}''199\,6$, $9{,}''202\,5$	(période : 18,6 ans)
		$-\ 1{,}''318\,7$, $0{,}''573\,6$	(période : 183 jours)
		$-\ 0{,}''227\,4$, $0{,}''097\,7$	(période : 13,7 jours)

Constante de précession (1976)

Modèle de Nutation IAU 1980

remplace la constante de nutation

Système UAI 1976/1980 de constantes astronomiques (2)

Constantes dérivées :

12. Unité de distance (unité astronomique)	$A = c\tau_A = 1{,}495\,978\,70 \times 10^{11}$ m	$\pm 2 \times 10^{3}$ m
13. Parallaxe solaire : demi-diamètre apparent de la Terre vu du Soleil	$\arcsin(a/A) = \pi_\odot = 8''{,}794\,148$	$\pm 7 \times 10^{-6}$″
14. Constante de l'aberration pour J 2000,0 : terme principal du déplacement apparent de la position d'une étoile dû à la vitesse de la Terre sur son orbite	$\dfrac{n\tau_A}{\sqrt{(1-e^2)}} = \kappa_0 = 20''{,}495\,520 \pm 1 \times 10^{-6}$″	
15. Aplatissement de la Terre	$f = 0{,}003\,352\,81 = 1/298{,}257$	$\pm 2 \times 10^{-8}$
16. Constante héliocentrique de la gravitation	$A^3k^2/D^2 = GS = 1{,}327\,124\,38 \times 10^{20}\,m^3s^{-2}$	$\pm 5 \times 10^{12}\,m^3s^{-2}$
17. Rapport de la masse du Soleil à la masse de la Terre	$GS/GM = S/M = 332\,946{,}0$	$\pm 0{,}3$
18. Rapport de la masse du Soleil à la somme des masses de la Terre et de la Lune	$(S/M)(1+\mu) = 328\,900{,}5$	$\pm 0{,}5$
19. Masse du Soleil en kg	$GS/G = S = 1.989\,1 \times 10^{30}$ kg	$\pm 1{,}2 \times 10^{27}$ kg

Système des masses :

20. Rapport de la masse du Soleil aux masses des planètes

Mercure	: 6 023 600 ± 3 500	Saturne	: 3 498,5 ± 3
Vénus	: 408 523,5 ± 2,5	Uranus	: 22 869 ± 225
Terre + Lune	: 328 900,5 ± 0,5	Neptune	: 19 314 ± 75
Mars	: 3 098 710 ± 80	Pluton	: 3 000 000 ± 6,5 × 10^6
Jupiter	: 1 047,355 ± 0,030		

IAU 1976 definition of the astronomical unit

The astronomical unit of length is that length (A) for which the Gaussian gravitational constant (k) takes the value of 0.01720209895 when the units of measurements are the astronomical unit of length, mass and time.

The dimensions of k^2 are those of the constant of gravitation (G), i.e., $L^3M^{-1}T^{-2}$.

The term "unit distance" is also for the length A."

This astronomical unit is approximately the mean distance between the Earth and the Sun.

The value of k is the angular velocity in radians per day (i.e. the daily mean motion) of an infinitesimally small mass that moves around the Sun in a circular orbit at a distance of 1 AU.

- the definition of the astronomical unit is based on the Gaussian gravitational constant *k,*
- its value in SI has to be determined experimentally,

Table 7. Non-SI units whose values in SI units must be obtained experimentally

Quantity	Name of unit	Symbol for unit	Value in SI units [a]
Units accepted for use with the SI			
energy	electronvolt [b]	eV	1 eV = 1.602 176 53 (14) x 10^{-19} J
mass	dalton, [c]	Da	1 Da = 1.660 538 86 (28) x 10^{-27} kg
	unified atomic mass unit	u	1 u = 1 Da
length	astronomical unit (d)	ua	1 ua = 1.495 978 706 91 (6) x 10^{11} m
Natural units (n.u.)			
speed	n.u. of speed (speed of light in vacuum)	c_0	299 7
action	n.u. of action (reduced Planck constant)	$\hbar$	1.054
mass	n.u. of mass (electron mass)	m_e	9.109
time	n.u. of time	$\hbar/(m_e c_0^2)$	1.288
Atomic units (a.u			
charge	a.u. of charge (elementary charge)	e	1.602 176 53 (14) x 10^{-19} C
mass	a.u. of mass (electron mass)	m_e	9.109 3826 (16) x 10^{-31} kg
action	a.u. of action (reduced Planck constant)	$\hbar$	1.054 571 68 (18) x 10^{-34} J s
length	a.u. of length, bohr (Bohr radius)	a_0	0.529 177 2108 (18) x 10^{-10} m
energy	a.u. of energy, hartree (Hartree energy)	E_h	4.359 744 17 (75) x 10^{-18} J
time	a.u. of time	$\hbar/E_h$	2.418 884 326 505 (16) x 10^{-17} s

(d) The astronomical unit is approximately equal to the mean Earth-Sun distance. It is the radius of an unperturbed circular Newtonian orbit about the Sun of a particle having infinitesimal mass, moving with a mean motion of 0.017 202 098 95 radians per day (known as the Gaussian constant). The value given for the astronomical unit is quoted from the IERS Conventions 2003 (D.D. McCarthy and G. Petit eds., *IERS Technical Note 32*, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004, 12). The value of the astronomical unit in metres comes from the JPL ephemerides DE403 (Standish E.M., Report of the IAU WGAS Sub-Group on Numerical Standards, *Highlights of Astronomy*, Appenzeller ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995, 180-184).

Evolution depuis 1976 /1980

- Amélioration spectaculaire de la précision des observations

- Diversification des observations de très haute précision

- Accès à une système de référence « quasi-idéal »

- Sondes spatiales planétaires

- Echelles de temps de très haute qualité en cohérence avec la Relativité générale

- Ephémérides planétaires numériques (JPL, EPM, INPOP) de très haute précision fournissant un ensemble cohérent de constantes

- Modèles représentant les observations à mieux que la milliseconde de degré

- Coordination par l'IERS (*International Earth and reference systems service*)

RESOLUTION B2

Sur les constantes astronomiques UAI 2009

La XXVIIème Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale,

Considérant:

1. Le besoin de disposer d'un ensemble cohérent de valeurs numériques de haute précision pour les constantes astronomiques,

2. Que des valeurs améliorées des constantes astronomiques ont été déduites d'observations récentes et publiées dans des revues à comité de lecture, et

3. Que des valeurs conventionnelles ont été adoptées pour un certain nombre de quantités astronomiques par les résolutions des Assemblées générales de l'UAI en 2000 et 2006,

Reconnaissant

1. Le besoin permanent de disposer des meilleures valeurs numériques disponibles (CBEs) pour les constantes astronomiques, et

2. Le besoin d'un service opérationnel destiné à la communauté astronomique, pour la maintenance de ces valeurs,

Recommande

1. Que la liste des valeurs des constantes, préalablement publiées, qui ont été rassemblées dans le rapport du Groupe de travail "Numerical Standards of Fundamental Astronomy" de la Division I de l'UAI (voir http://maia.usno.navy.mil/NSFA/CBE.html), soit adoptée comme Système UAI (2009) de constantes astronomiques,

2. Que les meilleures valeurs numériques disponibles pour les constantes astronomiques fassent l'objet d'une maintenance permanente sous forme d'un document électronique,

3. Qu'afin de garantir l'intégrité de ces valeurs, la Division I mette en place une procédure formelle pour l'adoption de nouvelles valeurs et l'archivage des anciennes versions, et

4. Que l'UAI établisse au sein de la Division I un organe permanent chargé de la maintenance des meilleures valeurs numériques disponibles pour les constantes de l'astronomie fondamentale.

Table 1 IAU 2009 system of astronomical constants (Luzum et al., *CMDA* 2009)

Constant	Description	Value	Reference
		Natural Defining Constant	
c	Speed of light	2.99792458×10^8 m s^{-1}	CODATA (2006)
		Auxiliary Defining Constants	
k[a]	Gaussian gravitational constant	$1.720209895 \times 10^{-2}$	IAU (1976), Gauss (1857)
L_G	1–d(TT)/d(TCG)	$6.969290134 \times 10^{-10}$	IAU (2000), Petit (2000)
L_B	1–d(TDB)/d(TCB)	$1.550519768 \times 10^{-8}$	IAU (2006)
TDB_0[b]	TDB–TCB at T_0	-6.55×10^{-5} s	IAU (2006)
θ_0[c]	Earth rotation angle at J2000.0	0.7790572732640 revolutions	IAU (2000), Capitaine et al. (2000)
dθ/dUT1[c]	Rate of advance of Earth rotation angle	1.00273781191135448 revolutions UT1-day^{-1}	IAU (2000), Capitaine et al. (2000)

Constant	Description	Value	Uncertainty	Reference
		Natural Measurable Constants		
G	Constant of gravitation	6.67428×10^{-11} m^{3}kg^{-1}s^{-2}	6.7×10^{-15}m^{3}kg^{-1}s^{-2}	CODATA (2006)
		Other Constants		
au[d]	Astronomical unit	$1.49597870700 \times 10^{11}$ m	3 m	Pitjeva and Standish (2009)
L_C	Average value of 1–d(TCG)/d(TCB)	$1.48082686741 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}	Irwin and Fukushima (1999)
		Body Constants[e]		
GM_S	Heliocentric gravitational constant	$1.32712442099 \times 10^{20}$ m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)	1.0×10^{10} m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)	Folkner et al. (2008)
		$1.32712440041 \times 10^{20}$ m^{3}s^{-2} (TDB-compatible)	1.0×10^{10} m^{3}s^{-2} (TDB-compatible)	
a_E[f]	Equatorial radius of the Earth	6.3781366×10^6 m (TT-compatible)	1×10^{-1} m (TT-compatible)	Groten (2000), Burša et al. (1998)
J_2[f]	Dynamical form factor	1.0826359×10^{-3}	1×10^{-10}	Groten (2000)
$\dot{J}_2$	Time rate of change in J_2	-3.0×10^{-9} cy^{-1}	6×10^{-10} cy^{-1}	IAU (2006), Capitaine et al. (2005)
GM_E	Geocentric gravitational constant	$3.986004418 \times 10^{14}$ m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)	8×10^5 m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)	Ries et al. (1992)

In addition to the list above: The IAU 2006 precession replaces the historical *constant of precession*

Table 1 continued

Constant	Description	Value	Uncertainty	Reference
		$3.986004415 \times 10^{14}\ m^3 s^{-2}$ (TT-compatible)	$8 \times 10^5 m^3 s^{-2}$ (TT-compatible)	
		$3.986004356 \times 10^{14}\ m^3 s^{-2}$ (TDB-compatible)	$8 \times 10^5 m^3 s^{-2}$ (TDB-compatible)	
W_0	Potential of the geoid	$6.26368560 \times 10^7\ m^2 s^{-2}$	$5 \times 10^{-1} m^2 s^{-2}$	Groten (2000)
$\omega^{[g]}$	Nominal mean angular velocity of the Earth	$7.292115 \times 10^{-5}\ rad\ s^{-1}$ (TT-compatible)	—	Groten (2000)
M_M/M_E	Ratio of the mass of the Moon to the Earth	$1.23000371 \times 10^{-2}$	4×10^{-10}	Pitjeva and Standish (2009)
		Ratio of the mass of the Sun to the mass of the body[e]		
M_S/M_{Me}	Mercury	6.0236×10^6	3×10^2	Anderson et al. (1987)
M_S/M_{Ve}	Venus	4.08523719×10^5	8×10^{-3}	Konopliv et al. (1999)
M_S/M_{Ma}	Mars	3.09870359×10^6	2×10^{-2}	Konopliv et al. (2006)
M_S/M_J	Jupiter	1.047348644×10^3	1.7×10^{-5}	Jacobson et al. (2000)
M_S/M_{Sa}	Saturn	3.4979018×10^3	1×10^{-4}	Jacobson et al. (2006)
M_S/M_U	Uranus	2.290298×10^4	3×10^{-2}	Jacobson et al. (1992)
M_S/M_N	Neptune	1.941226×10^4	3×10^{-2}	Jacobson (2009)
M_S/M_P	(134340) Pluto	1.36566×10^8	2.8×10^4	Tholen et al. (2008)
M_S/M_{Eris}	(136199) Eris	1.191×10^8	1.4×10^6	Brown and Schaller (2007)
		Ratio of the mass of the body to the mass of the Sun		
M_{Ceres}/M_S	(1) Ceres	4.72×10^{-10}	3×10^{-12}	Pitjeva and Standish (2009)
M_{Pallas}/M_S	(2) Pallas	1.03×10^{-10}	3×10^{-12}	Pitjeva and Standish (2009)
M_{Vesta}/M_S	(4) Vesta	1.35×10^{-10}	3×10^{-12}	Pitjeva and Standish (2009)
		Initial values at J2000.0		
$\epsilon^{[h]}_{J2000}$	Obliquity of the ecliptic at J2000.0	8.4381406×10^4 arcseconds	1×10^{-3} arcseconds	IAU (2006), Hilton et al. (2006), Chapront et al. (2002)

Notes [a] to [h]—See section 2.1

Table 1 IAU 2009 System of Astronomical Constants (extracts)

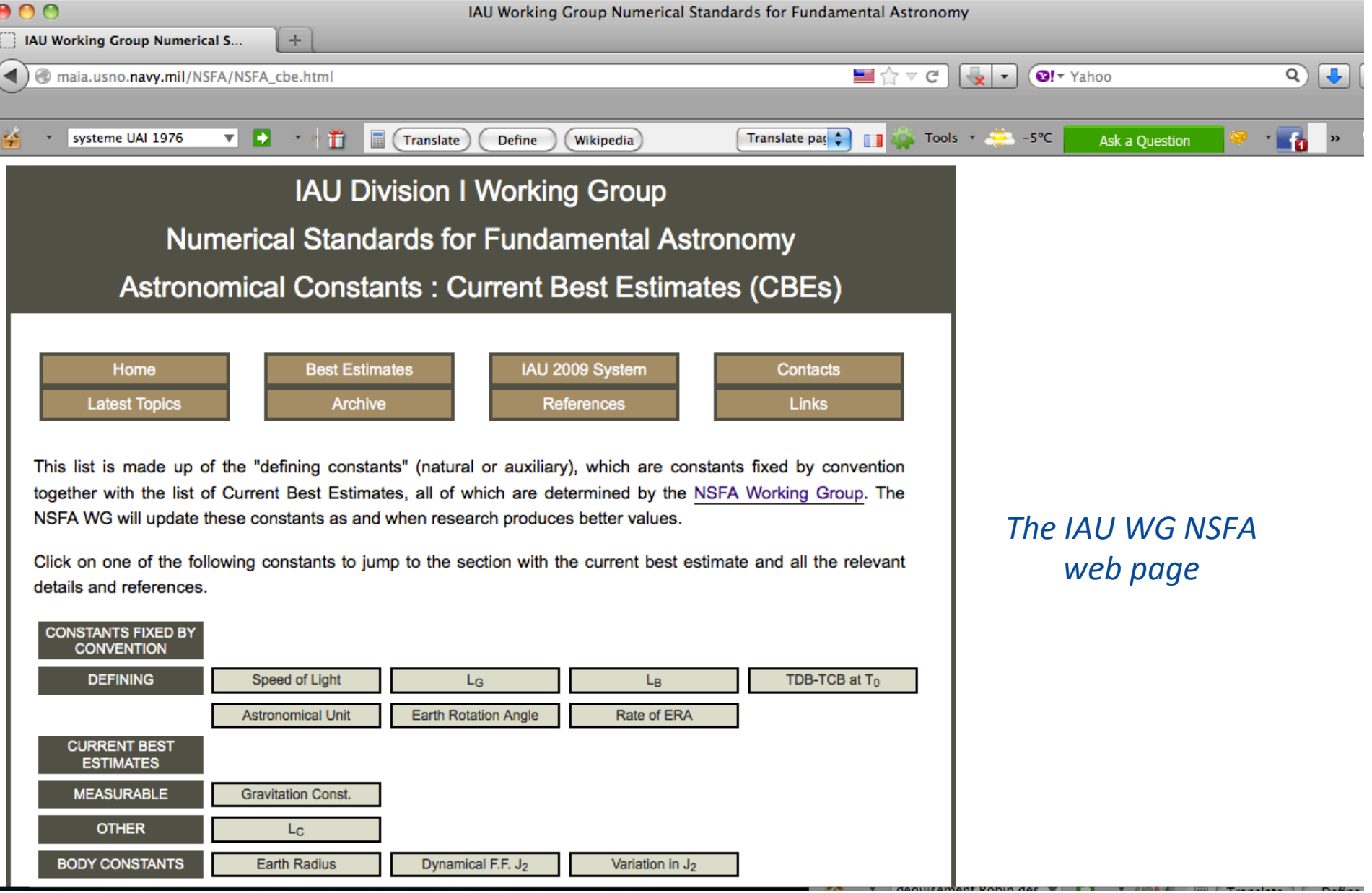
Constant	Description	Value
	Natural Defining Constant	
c	Speed of Light	2.99792458×10^{8} m s^{-1}
	Auxiliary Defining Constants	
k[a]	Gaussian gravitational constant	$1.720209895 \times 10^{-2}$
L_G	1−d(TT)/d(TCG)	$6.969290134 \times 10^{-10}$
L_B	1−d(TDB)/d(TCB)	$1.550519768 \times 10^{-8}$
TDB_0[b]	TDB−TCB at T_0	-6.55×10^{-5} s
θ_0[c]	Earth rotation angle at J2000.0	0.7790572732640 revolutions
dθ/dUT1[c]	Rate of advance of Earth rotation angle	1.00273781191135448 revolutions UT1-day^{-1}

Constant	Description	Value	Uncertainty
	Natural Measurable Constants		
G	Constant of gravitation	6.67428×10^{-11} m^{3}kg^{-1}s^{-2}	6.7×10^{-15} m^{3}kg^{-1}s^{-2}
	Other Constants		
au[d]	Astronomical unit	$1.49597870700 \times 10^{11}$ m	3 m
L_C	Average value of 1−d(TCG)/d(TCB)	$1.48082686741 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}
	Body Constants[e]		
GM_S	Heliocentric gravitational constant	$1.32712442099 \times 10^{20}$ m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)	1.0×10^{10} m^{3}s^{-2} (TCB-compatible)
		$1.32712440041 \times 10^{20}$ m^{3}s^{-2} (TDB-compatible)	1.0×10^{10} m^{3}s^{-2} (TDB-compatible)

CODATA, 2006

Pitjeva & Standish 2009

Folkner et al. 2008, from the ua fitted to DE 421



The IAU WG NSFA web page

Détermination de l'unité astronomique en unités métriques

- Dans le passé, les mesures astronomiques se résumaient à des mesures géométriques, et ne permettaient d'obtenir que des distances relatives, rapportées à la dimension de l'orbite terrestre.

- La détermination de l'unité astronomique (au) en km a été l'objet d'efforts énormes pendant des siècles, utilisant des mesures de parallaxes de planètes intérieures, les transits de Venus, les conjonctions de Mars, les approches d'astéroïdes.

- Pendant la seconde partie du 20è siècle la précision de la détermination de l'au a été améliorée de façon spectaculaire:
  - méthodes modernes ont remplacé les méthodes optiques de type triangulation,
  - ordinateurs puissants et rapides,
  - efforts énormes pour améliorer les éphémérides planétaires.

La précision de la détermination de l'au est passée de plusieurs dizaines de milliers de km à quelques mètres en 2010.

Résolution UAI 2012 B2: Version française

Proposée par le Groupe de travail UAI sur les « Standards numériques en Astronomie fondamentale »
Soutenue par la Division I

Re-définition de l'unité astronomique de longueur

La XXVIII[e] Assemblée générale de l'Union astronomique internationale,

Notant

1. que le Système UAI 1976 de constantes astronomiques de l'Union astronomique internationale précise les unités pour la dynamique du système solaire, comprenant le jour (D=86400 s), la masse du Soleil, M_S, et *l'unité astronomique de longueur*, ou *unité astronomique,* dont la définition[i] est fondée sur la valeur de la constante de Gauss,
2. que le but de la définition de l'unité astronomique était de donner des valeurs exactes des distances relatives dans le système solaire à une époque où il n'était pas possible d'estimer des distances avec une grande exactitude,
3. que, pour évaluer le paramètre de masse solaire, GM_S, appelée précédemment constante héliocentrique de la gravitation, dans le Système International d'unités (SI)[ii], on utilise la constante de Gauss k, ainsi qu'une valeur de l'unité astronomique déterminée par l'observation,
4. que le Système UAI 2009 de constantes astronomiques (Résolution UAI 2009 B2) a conservé la définition UAI 1976 de l'unité astronomique, en définissant k comme une "constante auxiliaire de définition" avec comme valeur numérique celle qui est donnée par le Système UAI 1976 de constantes astronomiques,
5. que la valeur, compatible avec le Temps dynamique barycentrique (TDB), de l'unité astronomique donnée dans la Table 1 du Système UAI 2009 (149 597 870 700 m ± 3 m), est une moyenne (Pitjeva and Standish 2009) d'estimations récentes de l'unité astronomique définie par k,
6. que la valeur de GM_S compatible avec TDB, donnée dans la Table 1 du Système UAI 2009, qui a été calculée en utilisant la valeur de l'unité astronomique ajustée sur les éphémérides DE421 (Folkner *et al.* 2008), est cohérente avec la valeur de l'unité astronomique de la Table 1 dans la limite des incertitudes estimées; et

Considérant

1. le besoin de disposer d'un ensemble cohérent d'unités et de valeurs numériques de constantes pour leur utilisation en astronomie dynamique moderne dans le cadre de la relativité générale[iii]
2. que l'exactitude des mesures modernes de distances rend inutile l'utilisation de distances relatives,
3. que les éphémérides planétaires modernes peuvent déterminer GM_S directement en unités SI et que cette quantité peut varier avec le temps,
4. le besoin d'une unité de longueur qui est approximativement égale à la distance Terre-Soleil, et
5. que différents symboles sont actuellement en usage pour désigner l'unité astronomique,

Recommande

1. que l'unité astronomique soit re-définie comme une unité conventionnelle de longueur égale à 149 597 870 700 m exactement, selon la valeur adoptée dans la Résolution UAI 2009 B2,
2. que cette définition de l'unité astronomique soit utilisée avec toutes les échelles de temps telles que TCB, TDB, TCG et TT, etc.
3. que la constante de Gauss k soit supprimée du système de constantes astronomiques,
4. que la valeur du paramètre de masse solaire, GM_S, soit déterminée en unités SI par l'observation, et
5. que le seul symbole "au" soit utilisé pour l'unité astronomique.

Références

Capitaine, N., Guinot, B., Klioner, S., 2011, Proposal for the re-definition of the astronomical unit of length through a fixed relation to the SI metre, Proceedings of the Journées 2010 Systèmes de référence spatio-temporels, N. Capitaine (ed.), Observatoire de Paris, pp 20-23

Fienga, A., Laskar, J., Morley, T., Manche, H. et al., 2009, INPOP08: a 4D-planetary ephemeris, A&A 507, 3, 1675

Fienga, A., Laskar, J., Kuchynka, P., Manche, H., Desvignes, G., Gastineau, M., Cognard, I., Theureau, G., 2011, INPOP10a and its applications in fundamental physics, Celest. Mech. Dyn. Astr., Volume 111, on line edition (http://www.springerlink.com/content/0923-2958).

Folkner, W.M., Williams, J.G., Boggs, D.H., 2008, Memorandum IOM 343R-08-003, Jet Propulsion Laboratory

International Astronomical Union (IAU), Proceedings of the Sixteenth General Assembly," Transactions of the IAU, XVIB, p. 31, pp. 52-66, (1976)

International Astronomical Union (IAU), Proceedings of the Twenty Seventh General Assembly," Transactions of the IAU, VXVIIB, p. 57, pp. 6: 55-70 (2010)

Klioner, S., 2008, Relativistic scaling of astronomical quantities and the system of astronomical units, A&A 478, 951

Klioner, S., Capitaine, N., Folkner, W., Guinot, B., Huang, T.-Y., Kopeikin, S. M., Pitjeva, E., Seidelmann P.K., Soffel, M., 2009, Units of relativistic time scales and associated quantities, in Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 261, p. 79-84

Luzum, B., Capitaine, N., Fienga, A., Folkner, W., Fukushima, T., Hilton. J., Hohenkerk, C., Krasinsky, G., Petit, G., Pitjeva, E., Soffel, M., Wallace, P., 2011, The IAU 2009 system of astronomical constants: the report of the IAU working group on numerical standards for Fundamental Astronomy, Celest. Mech. Dyn. Astr., doi: 10.1007/s10569-011-9352-4

Pitjeva, E.V. and Standish, E.M., 2009, Proposals for the masses of the three largest asteroids, the Moon-Earth mass ratio and the astronomical unit, Celest. Mech. Dyn. Astr., 103, 365, doi: 10.1007/s10569-009-9203-8

Standish, E.M., 2004, The Astronomical Unit now, in Transits of Venus, New views of the Solar System and Galaxy, Proceedings of the IAU Colloquium 196, D. W. Kurtz ed., 163

---

[i] La définition UAI 1976 est: « *L'unité astronomique de longueur* ou *unité de distance (A)* est la longueur pour laquelle la constante de Gauss (k) prend la valeur 0.017 202 098 95 quand les unités de mesure sont les unités astronomiques de longueur, de masse et de temps. Les dimensions de k^2 sont celles de la constante de la gravitation (G), c.-à-d. $L^3M^{-1}T^{-2}$ ». Bien que cette définition soit la première définition officielle explicite de l'unité astronomique, l'utilisation de k pour définir l'unité astronomique a été en usage depuis le XIX[è] siècle avant de devenir officielle en 1938.

[ii] en utilisant l'équation $A^3k^2/D^2=GM_S$, où A est *l'unité astronomique*, D l'intervalle de temps de un jour, et k la constante de Gauss.

[iii] En relativité, une éphéméride du système solaire, pour laquelle l'unité astronomique est une unité utile, est une représentation coordonnée de la dynamique du système solaire. Les unités SI sont introduites dans cette représentation coordonnée en utilisant les équations relativistes pour les photons et pour les corps massifs et en reliant les coordonnées de certains événements avec les quantités observées exprimées en unités SI.

Les Résolutions UAI & UGGI 1997-2012

Relatives aux systèmes de référence

The IAU 2000-2009 Resolutions on reference systems

after the IAU 1997 adoption of the ICRS/HCRS; to prepare the future μas accuracy

	IAU 2000 Resolutions	IAU 2006 Resolutions	IAU 2009 Resolutions
reference systems	Resolution B1.3 *Definition of BCRS and GCRS*		Resolution B2 *Adoption of ICRF2*
	Resolution B1.5 *Extended Relativistic framework for time transformation*		
models	Resolution B1.6 *IAU 2000 Precession-Nutation Model*	Resolution B1 *Adoption of the P03 Precession and definition of the ecliptic*	Resolution B1 *Adoption of the IAU 2009 system of astronomical constants*
concepts nomenclature	Resolution B1.7 *Definition of Celestial Intermediate Pole (CIP)*	Resolution B2 *Supplement to the IAU 2000 Resolutions on reference systems* Rec 1: Harmonizing « intermediate » to the pole and the origin (CIP, CIO) Rec 2: Default orientation of the BCRS/GCRS	
	Resolution B1.8 *Definition and use of CEO and TEO*		
time scales	Resolution B1.9 *Re-definition of TT*	Resolution B3 *Re-definition of TDB*	

Résolutions successives de l'UGGI pour les systèmes de référence

AG UGGI 1991: Adoption Résolutions UAI 1991 sur le système de référence céleste et adopte le système de référence terrestre (CTRS) pour désigner le système de référence terrestre idéal défini à partir du système de référence géocentrique non-tournant par une rotation spatiale.

AG IUGG2003 : Adoption Résolutions UAI 2000 sur les systèmes de référence

AG IUGG2007 : Adoption Résolutions UAI 2006 sur les systèmes de référence
Adopte la désignation GTRS

IAU 2000 (and IUGG 2003) Resolutions

Resolution	Aim
Definition of BCRS and GCRS	to provide coordinate systems in the framework of GR
Extended Relativistic framework for time transformation	to give a set of formulas for practical transformations between relativistic time scales
IAU 2000 Precession-Nutation Model	to provide a model for the precession-nutation of the equator with submilliarcsecond accuracy
Definition of Celestial Intermediate Pole	to refine the 1980 definition (CEP) and realize the pole in the high frequency domain
Definition and use of the TEO and CEO origins	to allow an accurate estimation of the Earth's rotation and precession-nutation separately
Re-definition of TT	to clarify the TT/TCG relationship

IAU 2006 Resolutions (and IUGG 2007)

Resolution	Aim
Adoption of the P03 Precession and definition of the ecliptic	to adopt a precession model as a replacement to the IAU 2000 precession in order to be consistent with both dynamical theory and the IAU 2000 nutation
	recommended by the IAU WG « Precession and the eclitptic »
Supplement to the IAU 2000 Resolutions on reference systems Recom 1: Harmonizing intermediate to the pole and the origin Recom 2: Default orientation of the BCRS and GCRS	to address definition, terminology and orientation issues relative to reference systems that needed to be specified after the adoption of the IAU 2000 resolutions
	recommended by the IAU WG « Nomenclature for Fundamental Astronomy »
Re-definition of TDB	to address definition issue relative to time scales
	recommended by the IAU WG « Nomenclature for Fundamental Astronomy »
	to clarify the TDB/TCB relationship

IAU 2009 and IAU 2018 Resolutions

Resolution	Aim
Adoption of the IAU 2009 System of astronomical constants	to adopt improved constants and classification *recommended by the IAU WG « Numerical Standards for Fundamental Astronomy »*
Adoption of ICRF2 (2009)	*recommended by the IAU WG «2d realization of the ICRF»*
Adoption of ICRF3 (2018)	*recommended by the IAU WG «ICRF3»*

The Barycentric and Geocentric celestial reference systems, BCRS and GCRS

IAU 2000 Resolution B1.3: Definition of BCRS and GCRS as coordinate systems in the framework of GR

- a) for Solar System (BCRS), which can be considered to be *a global coordinate system*

e.g. to be used for planetary ephemerides,

- b) for the Earth (GCRS), which can only be considered as a *local coordinate system*

e.g. to be used for Earth rotation, precession-nutation of the equator

Transformation BCRS/GCRS: extension of the Lorentz transformation

BCRS → G $$X^a = \delta_{ai}\left[r_E^i + \frac{1}{c^2}\left(\frac{1}{2}v_E^i v_E^j r_E^j + w_{ext}(\mathbf{x}_E) r_E^i + r_E^i a_E^j r_E^j - \frac{1}{2}a_E^i r_E^2\right)\right] + O(c^{-4}),$$

TCB → TC $$T = t - \frac{1}{c^2}\left[A(t) + v_E^i r_E^i\right] + \frac{1}{c^4}\left[B(t) + B^i(t) r_E^i + B^{ij}(t) r_E^i r_E^j + C(t,\mathbf{x})\right] + O(c^{-5}),$$

IAU 2006 Resolution B2: Fixing the default orientation of the BCRS

The BCRS orientation is such that for all practical applications, unless otherwise stated, the BCRS is assumed to be oriented according to the ICRS axes.

Transformation between the ITRS and GCRS in the IERS Conventions

The coordinate transformation from the terrestrial system, ITRS
to the Geocentric celestial system, GCRS, can be written as (Resolution IAU 2000 B1.8) :

$$[GCRS] = Q(t)\ R(t)\ W(t)\ [ITRS]$$

rotation angle : $R(t) = R_3(ERA)$
(model + observed variations)
IAU 2000/2006 IERS

celestial motion of the CIP
(model + observed celestial pole offsets
IAU 2000/2006 IERS

terrestrial motion of the CIP
(observed pole coordinates)
IERS

Celestial I I terrestrial

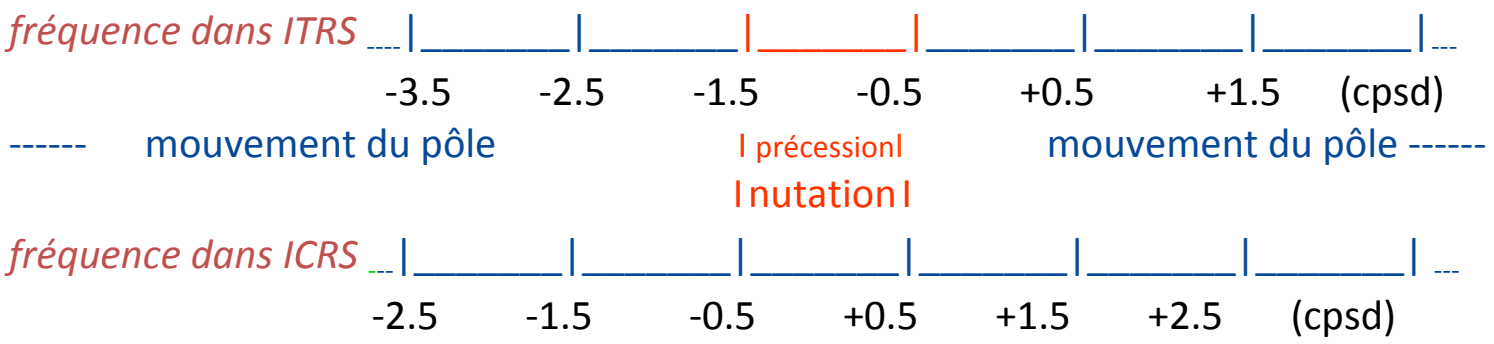
intermediate reference system

Définition du Pôle Céleste Intermédiaire (Résolution UAI 2000 B1.7)

Définition du CIP pour les variations à hautes fréquences

- Mouvement céleste: précession-nutation IAU 2000 périodes > 2 jours + offsets

- Nutations périodes < 2 jours incluses dans modèle mouvement dans TRS



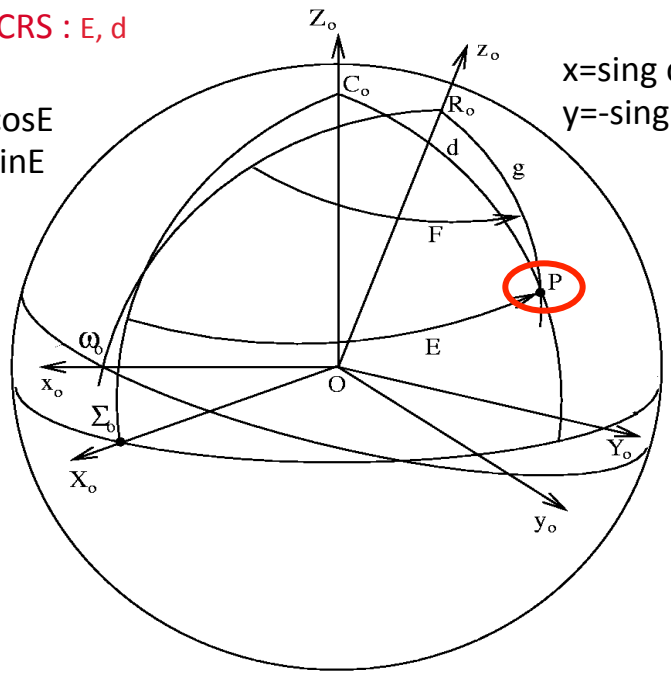
Nouveaux concepts: Pôle céleste intermédiaire, CIP, origines céleste et terrestre intermédiaires, CIO, TIO

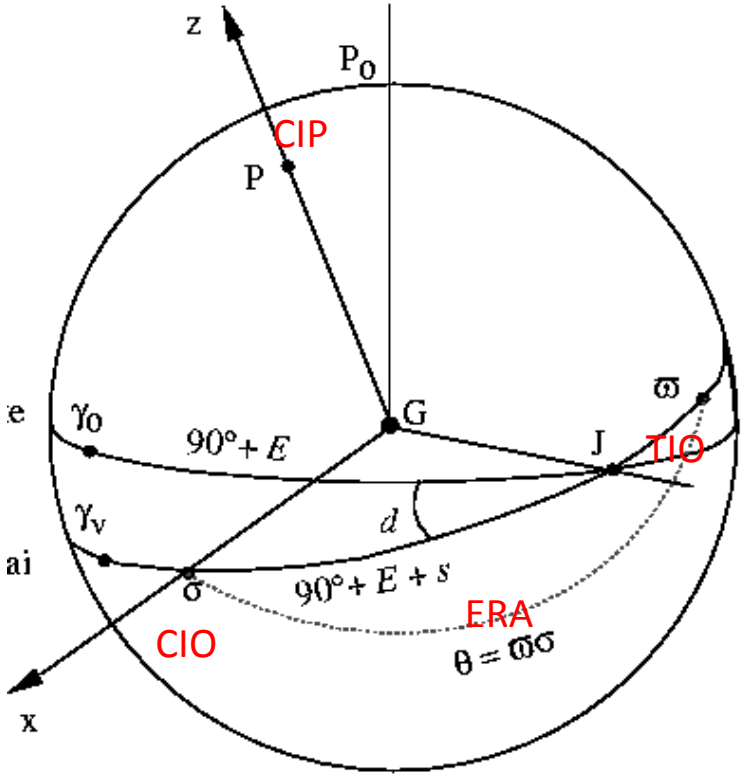
position du CIP
dans le GCRS : E, d

X = sind cosE
Y = sind sinE

position du CIP
dans l'ITRS : F, g

x=sing cosF
y=-sing sinF



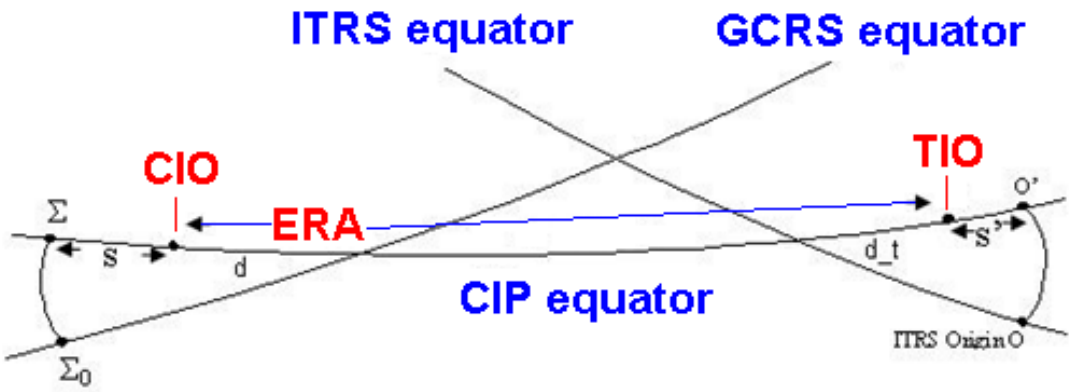


- *Remplacement du Pôle instantané de rotation par le CIP (noté P)*
- *Remplacement des angles de précession et de nutation par les coordonnées, X, Y, du CIP dans le GCRS*

- *Remplacement de l'équinoxe comme origine de l'angle de rotation de la Terre par la CIO*
- *Remplacement du GST par ERA = k UT1*
  d'où: dERA/dt = ω_3 (vitesse angulaire de rotation de la Terre)

EOP: Earth Rotation Angle (ERA)

ERA based on Celestial Intermediate Origin (CIO) and Terrestrial Intermediate Origin (TIO)

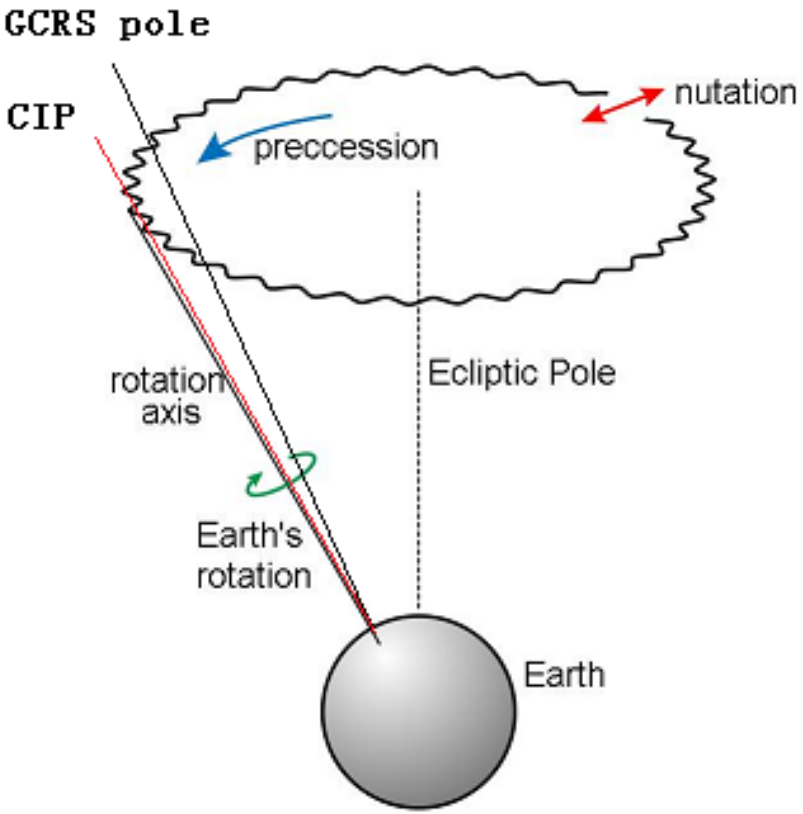


– Expression in function of UT1 :

$$\begin{aligned} ERA(UT1) &= 2\pi(0.7790572732640 + \rho \times (Julian\ UT1\ date - 2451545.0)) \\ \rho &= 1.0027378119113544 8 \end{aligned}$$

– ERA time derivative = Earth' angular velocity, expressed in function of LOD

Precession-nutation



- amplitudes between 17.2” and 0.1 mas
- periods between 3 d and 101 cy

IAU 2006/2000 semi-analytical model

- polynomial forms of *t (precession) : modèle P03* (Capitaine et al. 2003)

- plus sum of periodic terms (*nutation*).

- 1365 elliptical luni-solar and planetary nutation terms (“in-phase” and “out-of-phase” components).
- “transfer function” from rigid to non-rigid Earth nutation: MHB 2000 (Mathews et al. 2002), with Basic Earth Parameters (BEP) fitted to VLBI data (e.g. dynamical ellipticity of the Earth and fluid core, couplings due to magnetic field, …).

Modèle de précession UAI 2006
(Résolution UAI 2006 B1)

Déplacement (« précession ») de l'écliptique

Déplacement (« précession ») de l'équateur

TAB. 4.1 – Comparaison des expressions P03 et UAI 2000 des quantités de précession ; unité : mas.

Source		t^0	t	t^2	t^3	t^4	t^5
IAU 2000	P_A		4197.6	194.47	−0.179		
P03			4199.094	193.9873	−0.22466	−0.000912	0.0000120
IAU	Q_A		−46815.0	50.59	0.344		
P03			−46811.015	51.0283	0.52413	−0.000646	−0.0000172
IAU 2000	ψ_A		5038478.750	−1072.59	−1.147		
P03			5038481.507	−1079.0069	−1.14045	0.132851	−0.0000951
IAU 2000	ω_A	84381448.0	−25.240	51.27	−7.726		
P03		84381406.0	−25.754	51.2623	−7.72503	−0.000467	0.0003337
IAU 2000	ϵ_A	84381448.0	−46840.24	−0.59	1.813		
P03		84381406.0	−46836.769	−0.1831	2.00340	−0.000576	−0.0000434
IAU 2000	χ_A		10552.6	−2380.64	−1.125		
P03			10556.403	−2381.4292	−1.21197	0.170663	−0.0000560

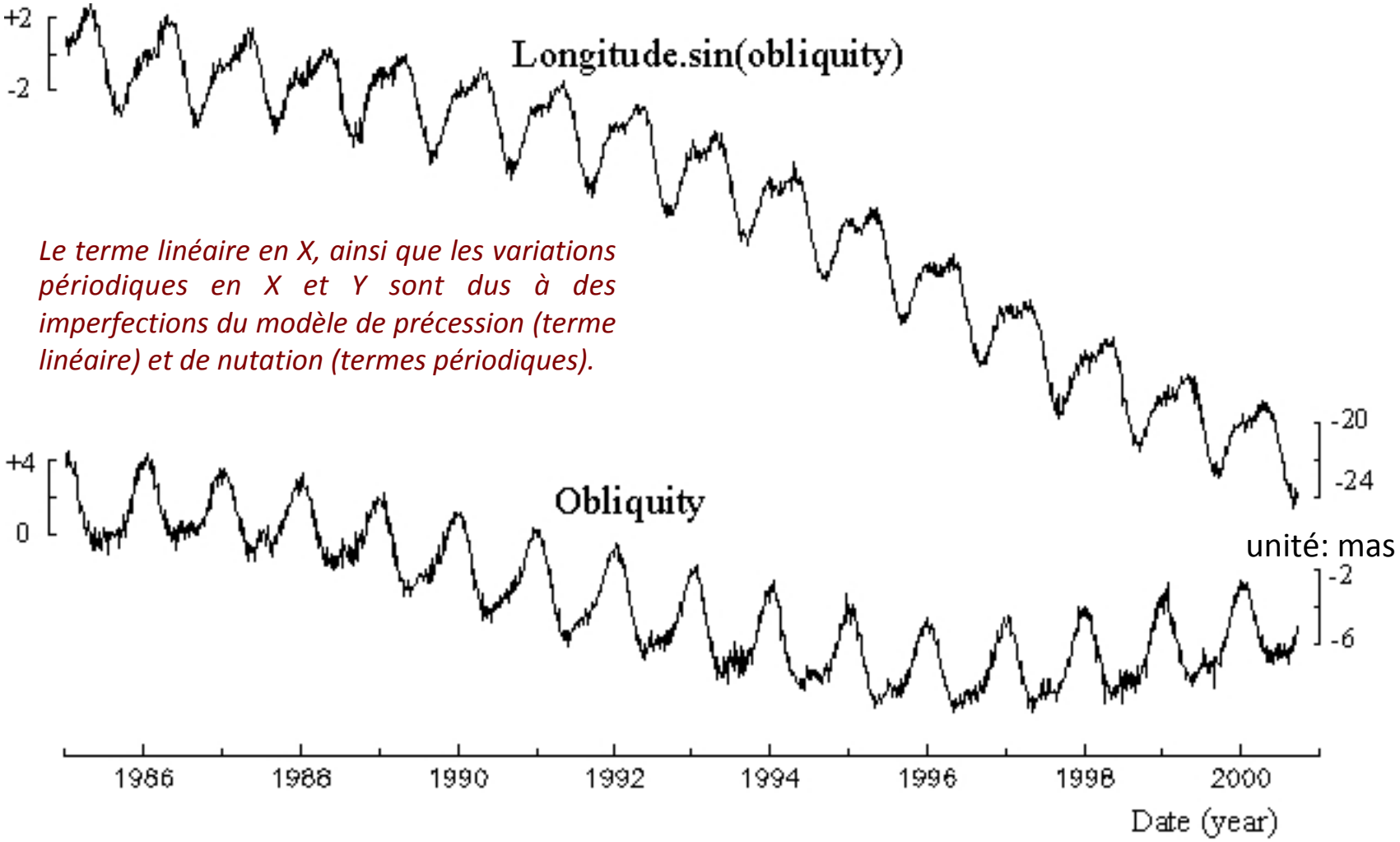
Déplacement (« précession ») de l'équateur

TAB. 4.2 – Expressions P03 de la position GCRS du CIP (X, Y) et de la CIO $(s + XY/2)$; unité : mas.

Quantité	t^0	t	t^2	t^3	t^4	t^5
X	− 16.617	2004191.898	− 429.7829	−198.61834	0.007578	0.0059285
Y	− 6.951	−25.896	− 22407.2747	1.90059	1.112526	0.0001358
$s + XY/2$	0.094	3.80865	− 0.12268	− 72.57411	0.02798	0.01562

t est compté en siècles Juliens (36 525 jours)

Écarts observés VLBI du pôle céleste
par rapport au modèle de précession-nutation UAI 1976/1980



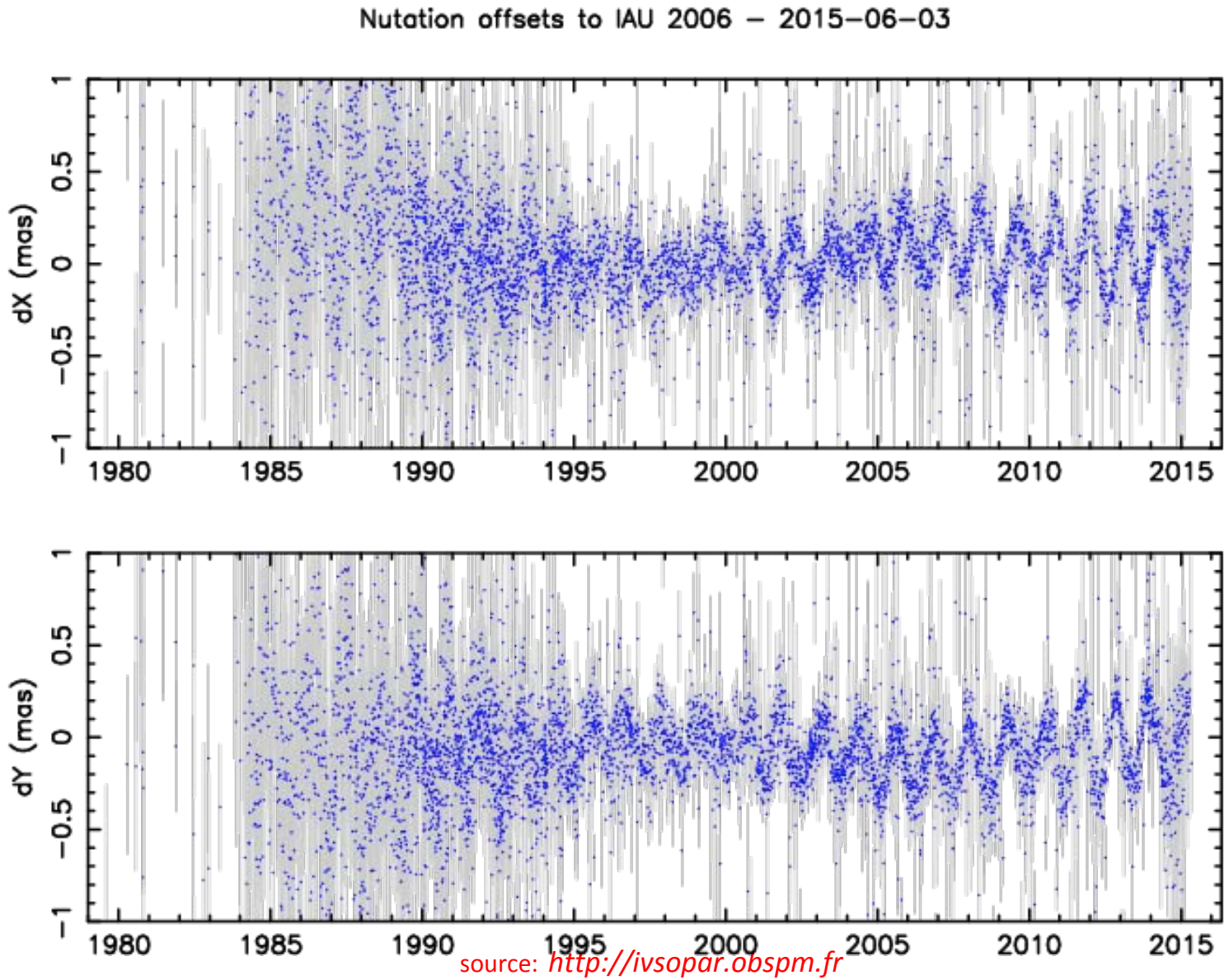
Le terme linéaire en X, ainsi que les variations périodiques en X et Y sont dus à des imperfections du modèle de précession (terme linéaire) et de nutation (termes périodiques).

IAU 2006/2000A$_R$ expressions for the GCRS coordinates of the CIP

$$
\begin{aligned}
X = & -0.''016617 + 2004.''191898\, t - 0.''4297829\, t^2 \\
& - 0.''19861834\, t^3 - 0.''000007578\, t^4 + 0.''0000059285\, t^5 \\
& + \sum_i \left[(a_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \sum_i \left[(a_{s,1})_i\, t \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,1})_i\, t \cos(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \sum_i \left[(a_{s,2})_i\, t^2 \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,2})_i\, t^2 \cos(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \ldots \\
Y = & -0.''006951 - 0.''025896\, t - 22.''4072747\, t^2 \\
& + 0.''00190059\, t^3 + 0.''001112526\, t^4 + 0.''0000001358\, t^5 \\
& + \sum_i \left[(b_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \sum_i \left[(b_{c,1})_i\, t \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,1})_i\, t \sin(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \sum_i \left[(b_{c,2})_i\, t^2 \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,2})_i\, t^2 \sin(\text{ARGUMENT}) \right] \\
& + \ldots
\end{aligned}
$$

precession; effects of frame biases; nutation; cross terms precession x nutation

Écarts observés VLBI du pôle céleste
par rapport au modèle de précession-nutation UAI 2006/2000



Amélioration très significative du modèle par rapport au modèle UAI 1976/1980

source: *http://ivsopar.obspm.fr*

The Terrestrial and Barycentric time scales TT and TDB

IAU 2000 Resolution B1.9: Re-definition of the Terrestrial Time (TT)

TT is a re-defined as a time scale differing from TCG
by a constant rate: dTT/dTCG = 1-*LG*,
where *LG* = 6.969290134 $\times 10^{-10}$ is a defining constant.

TCG – TT = LG x (JD - 2443144.5 0) × 86400

IAU 2006 Resolution B3: Re-definition of the Barycentric Dynamical Time (TDB)

TDB is re-defined as a linear transformation of TCB,
the coefficients of which (*L*B and TDB_0) are defining constants;
(*L*B = $1.550519768 \times 10^{-8}$; TDB_0 = - 6.55×10^{-5} s) .

TCB − TDB = LB × (JD− 2433144.5) × 86400 + Po

essential for the reduction of observations in the solar system and for the link to the ICRF

The IAU 2000 NFA Glossary
a few examples of newly proposed terms

Celestial Intermediate Origin (CIO): origin for right ascension on the intermediate equator in the celestial intermediate reference system. It is the non-rotating origin in the GCRS that is recommended by the IAU 2000 Resolution B 1.8, where it was designated the Celestial Ephemeris Origin. The CIO was originally set close to the GCRS meridian and throughout 1900-2100 stays within 0.1 arcseconds of this alignment.

equation of the origins: distance between the CIO and the equinox along the intermediate equator; it is the CIO right ascension of the equinox; alternatively the difference between the Earth rotation angle and Greenwich apparent sidereal time (ERA – GAST).

CIO locator (denoted s) : the difference between the GCRS right ascension and the intermediate right ascension of the intersection of the GCRS and intermediate equators. The CIO was originally set close to the mean equinox at J2000.0. As a consequence of precession-nutation the CIO moves according to the kinematical property of the non-rotating origin. The CIO is currently located by using the quantity *s*.

TIO locator (denoted s′): the difference between the ITRS longitude and the instantaneous longitude of the intersection of the ITRS and intermediate equators. The TIO was originally set at the ITRF origin of longitude. As a consequence of polar motion the TIO moves according to the kinematical property of the non-rotating origin. The TIO is currently located using the quantity s′, whose rate is of the order of 50 mas/cy which is due to the current polar motion.

IAU WG *Nomenclature on Fundamental astronomy*
http://syrte.obspm.fr/iauWGnfa/

Les standards astro-géodésiques (1966-2010)

Standards successifs

1966: SmithonianStandard Standard Earth I (Gaposchkin)
1969: Smithonian Standard Earth II (Gaposchkin & Lambeck)
1973: Smithonian Standard Earth III

During the 1980ies: Project MERIT (*Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis*)

1983: MERIT Standards

1986: proposals for a new International Earth Rotation Service, prepared at a MERIT Workshop → the IERS established in 1988

(*International Earth Rotation and Reference Systems Service*)

1989: IERS Standards
1992: IERS Standards
1996: IERS Standards
2003: IERS Conventions
2010: IERS Conventions

1969 SMITHSONIAN STANDARD EARTH (II)

E. M. Gaposchkin and K. Lambeck
Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts 02138

1. INTRODUCTION

During 1966 the Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) published numerical parameters for the earth's gravity field and the coordinates of the satellite-tracking stations [Gaposchkin, 1967; Köhnlein, 1967a; Veis , 1967a, b; Whipple, 1967; Lundquist and Veis, 1966]. In 1967, a series of papers by Gaposchkin, Köhnlein, Kozai, and Veis [Lundquist, 1967] produced several refinements to the 1966 solution. This combined effort was the result of some years of improvement in analytical techniques, computer programs, and data acquisition, but since then a major revision of the process and theories has been undertaken. Some of the considerations of the new analysis were reviewed by Gaposchkin [1968], and preliminary results were presented by Gaposchkin [1969], Lambeck [1969a, b], and Gaposchkin and Lambeck [1969]. All these results have now been superseded by the solution presented here, and tests have indicated that these latest results are superior to any previous set of geodetic parameters.

These improvements are the consequences of several advances made since 1966. A significant amount of recent Baker-Nunn data is now available, data that are not only of higher accuracy but that also have a better geographic distribution. The latter is due in part to relocation of four Baker-Nunn cameras (9028, 9029, 9031, and 9091), cooperation with some additional observatories, and careful selection of observing periods that yield an optimum distribution and density of observations. The increase in available

Standard Earth II

« As before, the geodetic parameters are estimated from a combined solution of the results obtained by the geometric and dynamic methods. In addition, the combination solution includes station-position information determined by the Jet Propulsion Laboratory (JPL) for its Deep Space Tracking Network (DSN) and surface-gravity anomalies computed by Kaula [1966a]. The final solution yields harmonic coefficients in the potential expansion complete to degree and order 16, plus 14 pairs of higher degree coefficients and the coordinates for 39 stations. This solution has been compared with recent surface-gravity data and astrogeodetic data. Figure 1 gives the locations of the stations used in this analysis. »

IERS Standards 1989
Table of contents

TABLE OF CONTENTS

IERS Standards

November 1989

	Introduction	1
1.	Numerical Standards	3
2.	IERS Celestial Reference Frame (ICRF)	11
3.	IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF)	12
4.	Nutation	14
5.	Procedure for Computing Apparent Places	18
6.	Solid Earth Tides	22
7.	Ocean Tide Model	32
8.	Site Displacement Due to Ocean and Atmospheric Loading	37
9.	Plate Motion Model	45
10.	Tropospheric Model	49
11.	Tidal Variations in UT1	53
12.	Lunar and Planetary Ephemerides	56
13.	Geopotential	58
14.	Radiation Pressure Reflectance Model	65
15.	General Relativistic Dynamical Model	66
16.	General Relativistic Terms for Propagation, Time, and Coordinates	69

IERS Standards 1989

NUMERICAL STANDARDS

ITEM	RECOMMENDED VALUE	COMMENTS
ASTRONOMICAL CONSTANTS		
Defining Constants		
- Gaussian Gravitational Constant	$k = 0.01720209895$	
- Velocity of Light	$c = 2.99792458 \times 10^{8} ms^{-1}$	
Primary Constants		
- Astronomical Unit in Light-Seconds	$\tau_A = 499.00478370$ s	IAU (1976) Value = 499.004782 s.
- Equatorial Radius of the Earth	$a_e = 6378136$ m	IUGG Value; IAU Value = 6378140.
- Dynamical Form Factor for Earth	$J_2 = 0.001082626$ $\dot{J}_2 = -2.8 \times 10^{-11}$ yr^{-1}	Use value in adopted gravity model adjusted to include zero frequency tide.
- Geocentric Constant of Gravitation	$GM_\oplus = 3.98600440 \times 10^{14} m^3 s^{-2}$	IAU (1976) Value = $3.986005 \times 10^{14} m^3 s^{-2}$. Barycentric value given by $GM_{\oplus TDB} = (1-L)GM_\oplus$ where $L = 1.4808 \times 10^{-8}$.
- Constant of Gravitation	$G = 6.67259 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$	
- Earth-Moon Mass Ratio	$\mu = 0.012300034$	IAU (1976) Value = 0.0123002.
- General Precession in Longitude Per Century for J2000.0	$p = 5029\overset{''}{.}0966$	
- Obliquity of the Ecliptic for J2000.0	$\epsilon_0 = 23°\ 26'\ 21\overset{''}{.}4119$	IAU (1976) Value = $23°26'21\overset{''}{.}448$. Recommended values use rotating definition (see Chapter 4).
Derived Constants		
- Nutation Constant for J2000.0	This constant is superseded by the adoption of the IAU 1980 nutation based on the Wahr Nutation Model. See Ch. 4 for the recommended Nutation Series in longitude and obliquity.	
- Astronomical Unit	$A = c\tau_A = 1.4959787066 \times 10^{11}$ m	IAU (1976) Value = $1.49597870 \times 10^{11}$ m.
- Solar Parallax	$\pi_\odot = \mathrm{Sin}^{-1}(a_e/A) = 8\overset{''}{.}794144$	IAU (1976) Value = $8\overset{''}{.}794148$.
- Aberration Constant for J2000.0	The aberration corrections are calculated directly from ephemeris files.	IAU (1976) Value = $20\overset{''}{.}49552$.
- Earth Flattening	$f^{-1} = 298.257$	Uses the IAG (1975) value of $\omega = 7.292115 \times 10^{-5}$ rad s^{-1}.
- Heliocentric Constant for Gravitation	$GM_\odot = 1.32712440 \times 10^{20} m^3 s^{-2}$	IAU (1976) Value = $1.32712438 \times 10^{20} m^3 s^{-2}$.

IERS Conventions 2003

Table 1.1 IERS Numerical Standards.

ITEM	VALUE	UNCERTAINTY	REF.	COMMENTS
c	$299792458 ms^{-1}$	Defining	[2]	Speed of light
L_B	$1.55051976772 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}	[4]	Average value of 1-d(TT)/d(TCB)
L_C	$1.48082686741 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}	[4]	Average value of 1-d(TCG)/d(TCB)
L_G	$6.969290134 \times 10^{-10}$	Defining	[4]	1-d(TT)/d(TCG)
G	$6.673 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$	$1 \times 10^{-13} m^3 kg^{-1} s^{-2}$	[2]	Constant of gravitation
$GM_\odot$	$1.32712442076 \times 10^{20} m^3 s^{-2}$	$5 \times 10^{10} m^3 s^{-2}$	[from 3]	Heliocentric gravitational constant
τ_A†	$499.0047838061 s$	$0.00000002 s$	[3]	Astronomical unit in seconds
$c\tau_A$†	$149597870691 m$	$6 m$	[3]	Astronomical unit in meters
ψ_1†	$5038.47875''/c$	$0.00040''/c$	[6]	IAU(1976) value of precession of the equator at J2000.0 corrected by $-0.29965''$. See Chapter 5.
ϵ_0	$84381.4059''$	$0.0003''$	[5]	Obliquity of the ecliptic at J2000.0. See Chapter 5 for value used in IAU precession-nutation model.
$J_{2\odot}$	2×10^{-7}	(adopted for DE405)		Dynamical form-factor of the Sun
μ	0.0123000383	5×10^{-10}	[3]	Moon-Earth mass ratio
$GM_\oplus$	$3.986004418 \times 10^{14} m^3 s^{-2}$	$8 \times 10^5 m^3 s^{-2}$	[1]	Geocentric gravitational constant (EGM96 value)
a_E‡	$6378136.6 m$	$0.10 m$	[1]	Equatorial radius of the Earth
$1/f$‡	298.25642	0.00001	[1]	Flattening factor of the Earth
$J_{2\oplus}$‡	1.0826359×10^{-3}	1.0×10^{-10}	[1]	Dynamical form-factor
ω	$7.292115 \times 10^{-5} rads^{-1}$	variable	[1]	Nominal mean angular velocity of the Earth
g_e‡	$9.7803278 ms^{-2}$	$1 \times 10^{-6} ms^{-2}$	[1]	Mean equatorial gravity
W_0	$62636856.0 m^2 s^{-2}$	$0.5 m^2 s^{-2}$	[1]	Potential of the geoid
R_0††	$6363672.6 m$	$0.1 m$	[1]	Geopotential scale factor

† The values for τ_A, $c\tau_A$, and ψ_1 are given in "TDB" units (see discussion above).

‡ The values for a_E, $1/f$, $J_{2\oplus}$ and g_E are "zero tide" values (see the discussion in section 1.1 above). Values according to other conventions may be found from reference [1].

†† $R_0 = GM_\oplus / W_0$

[1] Groten, E., 1999, Report of the IAG. Special Commission SC3, Fundamental Constants, XXII IAG General Assembly.

[2] Mohr, P. J. and Taylor, B. N., 1999, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **28, 6**, p. 1713.

[3] Standish, E. M., 1998, JPL IOM 312-F.

[4] IAU XXIV General Assembly. See Appendix 1.

[5] Fukushima, T., 2003, Report on astronomical constants, *Highlights of Astronomy*, in press.

[6] Mathews, P. M., Herring, T. A., and Buffett, B. A., 2002, Modeling of nutation-precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior, *J. Geophys. Res.* **107, B4**, 10.1029/2001JB00390.

IERS Conventions 2010
Table of contents (1)

Table of Contents

0 Introduction **6**
0.1 Models in the IERS Conventions . . . 7
0.1.1 Classification of models . . . 7
0.1.2 Criteria for choosing models . . . 7
0.2 Differences between this document and IERS Technical Note 32 . . . 8
0.3 Conventions Center . . . 14

1 General definitions and numerical standards **15**
1.1 Permanent tide . . . 15
1.2 Numerical standards . . . 16

2 Conventional celestial reference system and frame **21**
2.1 The ICRS . . . 21
2.1.1 Equator . . . 21
2.1.2 Origin of right ascension . . . 22
2.2 The ICRF . . . 22
2.2.1 Optical realization of the ICRF . . . 23
2.2.2 Availability of the frame . . . 25

3 Conventional dynamical realization of the ICRS **28**

4 Terrestrial reference systems and frames **31**
4.1 Concepts and terminology . . . 31
4.1.1 Basic concepts . . . 31
4.1.2 TRF in space geodesy . . . 32
4.1.3 Crust-based TRF . . . 34
4.1.4 The International Terrestrial Reference System . . . 34
4.1.5 Realizations of the ITRS . . . 35
4.2 ITRF products . . . 35
4.2.1 The IERS network . . . 35
4.2.2 History of ITRF products . . . 36
4.2.3 ITRF2005 . . . 37
4.2.4 ITRF2008, the current reference realization of the ITRS . . . 39
4.2.5 ITRF as a realization of the ITRS . . . 39
4.2.6 Transformation parameters between ITRF solutions . . . 40
4.3 Access to the ITRS . . . 40

5 Transformation between the ITRS and the GCRS **43**
5.1 Introduction . . . 43
5.2 The framework of IAU 2000/2006 resolutions . . . 43
5.2.1 IAU 2000 resolutions . . . 44
5.2.2 IAU 2006 resolutions . . . 45
5.3 Implementation of IAU 2000 and IAU 2006 resolutions . . . 45
5.3.1 The IAU 2000/2006 space-time reference systems . . . 45
5.3.2 Schematic representation of the motion of the Celestial Intermediate Pole (CIP) 45
5.3.3 The IAU 2000/2006 realization of the Celestial Intermediate Pole (CIP) . . . 46
5.3.4 Procedures for terrestrial-to-celestial transformation consistent with IAU 2000/2006 resolutions . . . 47
5.4 Coordinate transformation consistent with the IAU 2000/2006 resolutions . . . 47
5.4.1 Expression for the transformation matrix for polar motion . . . 48
5.4.2 Expression for the CIO based transformation matrix for Earth rotation . . . 48

IERS Conventions 2010
Table of contents (2)

5.4.3 Expression for the equinox based transformation matrix for Earth rotation . . 48
5.4.4 Expression for the transformation matrix for the celestial motion of the CIP . 48
5.4.5 Expression for the equinox-based transformation matrix for precession-nutation 49
5.5 Parameters to be used in the transformation 49
5.5.1 Motion of the Celestial Intermediate Pole in the ITRS 49
5.5.2 Position of the Terrestrial Intermediate Origin in the ITRS 51
5.5.3 Earth Rotation Angle 52
5.5.4 Forced motion of the Celestial Intermediate Pole in the GCRS 54
5.5.5 Free Core Nutation 57
5.5.6 Position of the Celestial Intermediate Origin in the GCRS 59
5.5.7 ERA based expressions for Greenwich Sidereal Time 59
5.6 Description of the IAU 2000/2006 precession-nutation model 61
5.6.1 The IAU 2000A and IAU 2000B nutation model 61
5.6.2 Description of the IAU 2006 precession 63
5.6.3 IAU 2006 adjustments to the IAU 2000A nutation 64
5.6.4 Precession developments compatible with the IAU 2000/2006 model 64
5.6.5 Summary of different ways of implementing IAU 2006/2000A precession-nutation 65
5.7 The fundamental arguments of nutation theory 66
5.7.1 The multipliers of the fundamental arguments of nutation theory 66
5.7.2 Development of the arguments of lunisolar nutation 66
5.7.3 Development of the arguments for the planetary nutation 67
5.8 Prograde and retrograde nutation amplitudes 68
5.9 Algorithms for transformations between ITRS and GCRS 69
5.10 Notes on the new procedure to transform from ICRS to ITRS 71

6 Geopotential 79
6.1 Conventional model based on the EGM2008 model 79
6.2 Effect of solid Earth tides 81
6.2.1 Conventional model for the solid Earth tides 81
6.2.2 Treatment of the permanent tide 88
6.3 Effect of the ocean tides 89
6.3.1 Background on ocean tide models 90
6.3.2 Ocean tide models 91
6.4 Solid Earth pole tide 93
6.5 Ocean pole tide 94
6.6 Conversion of tidal amplitudes defined according to different conventions 96

7 Displacement of reference points 99
7.1 Models for conventional displacement of reference markers on the crust 99
7.1.1 Effects of the solid Earth tides 99
7.1.2 Local site displacement due to ocean loading 108
7.1.3 S_1-S_2 atmospheric pressure loading 112
7.1.4 Rotational deformation due to polar motion 114
7.1.5 Ocean pole tide loading 116
7.2 Models for other non-conventional displacement of reference markers on the crust . . . 118
7.3 Models for the displacement of reference points of instruments 118
7.3.1 Models common to several techniques 118
7.3.2 Very long baseline interferometry 119
7.3.3 Global navigation satellite systems 119

8 Tidal variations in the Earth's rotation **123**
8.1 Effect of the tidal deformation (zonal tides) on Earth's rotation . . . 123
8.2 Diurnal and semi-diurnal variations due to ocean tides . . . 124
8.3 Tidal variations in polar motion & polar motion excitation due to long period ocean tides 124

9 Models for atmospheric propagation delays **132**
9.1 Tropospheric model for optical techniques . . . 132
9.1.1 Zenith delay models . . . 132
9.1.2 Mapping function . . . 133
9.1.3 Future developments . . . 134
9.2 Tropospheric model for radio techniques . . . 135
9.3 Sources for meteorological data . . . 136
9.4 Ionospheric model for radio techniques . . . 137
9.4.1 Ionospheric delay dependence on radio signals including higher order terms . . 137
9.4.2 Correcting the ionospheric effects on code and phase . . . 142

10 General relativistic models for space-time coordinates and equations of motion **151**
10.1 Time coordinates . . . 151
10.2 Transformation between proper time and coordinate time in the vicinity of the Earth . 153
10.3 Equations of motion for an artificial Earth satellite . . . 155
10.4 Equations of motion in the barycentric frame . . . 156

11 General relativistic models for propagation **159**
11.1 VLBI time delay . . . 159
11.1.1 Historical background . . . 159
11.1.2 Specifications and domain of application . . . 159
11.1.3 The analysis of VLBI measurements: definitions and interpretation of results . 160
11.1.4 The VLBI delay model . . . 160
11.2 Ranging techniques . . . 164

A IAU NFA WG Recommendations **166**

B IAU Resolutions Adopted at the XXVIth General Assembly (2006) **168**
B.1 IAU 2006 Resolution B1 on Adoption of the P03 Precession Theory & Definition of the Ecliptic . . . 168
B.2 IAU 2006 Resolution B2 on Supplement to IAU 2000 Resolutions on reference systems 168
B.3 IAU 2006 Resolution B3 on the Re-definition of Barycentric Dynamical Time, TDB . 170

C IUGG Resolution 2 Adopted at the XXIVth General Assembly (2007) **171**

D IAU Resolutions Adopted at the XXVIIth General Assembly (2009) **172**
D.1 IAU 2009 Resolution B2 on IAU 2009 astronomical constants . . . 172
D.2 IAU 2009 Resolution B3 on Second Realization of International Celestial Reference Frame 172

Glossary **174**

IERS Conventions 2010
Table of contents (3)

Interrelations entre Standards UAI et Conventions IERS

- Groupes de travail de l'UAI créés en 1985, rapport en 1988
  - garder un systèmes de constantes de définition pour définir les unités (RG)
  - liste de valeurs recommandées par l'UAI
- Project MERIT (*Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis*), qui a mené à la création de l'IERS (1988)
- *MERIT Standards 1983; puis IERS Standards 1989, 1992, 1996*
- Groupes de travail de l'UAI créés en 1997: rapport en 2000 menant à des résolutions UAI.
- Résolutions UAI 2000
  - définition des systèmes de référence célestes (BCRS et GCRS) dans le cadre de la Relativité générale,
  - nouveau modèle de précession-nutation IAU 2000,
  - nouvelle définition de l 'angle de rotation de la Terre et du pôle céleste.
- *IERS Conventions 2003 (appliquant les Résolutions UAI 2000)*
- Résolutions UAI 2006
  - nouveau modèle de précession IAU 2006
  - nouvelle définition de l'échelle de temps TDB
- Groupes de travail UAI « *Numerical standards for fundamental astronomy* » et UAI + IERS/IVS « Second realization of the ICRF », créés en 2006.
- Résolutions UAI 2009
  - nouveau Système de constantes astronomiques,
  - nouvelle réalisation ICRF2 de l'ICRS
- *IERS Conventions 2010 (appliquant les Résolutions UAI 2006 et UAI 2009)*
- Résolution UAI 2012 B2
  - Re-définition de l'unité astronomique de longueur.