

*Développements récents des concepts et
des modèles en Astronomie Fondamentale*

Nicole CAPITAINE

SYRTE/UMR8630 - CNRS

Observatoire de Paris

Introduction

Astronomie Fondamentale : détermination des positions et mouvements des objets célestes (de haute précision)

- définition, réalisation systèmes de référence espace/temps,
 - amélioration modèles représentant les observations,
 - détermination régulière de l'orientation de la Terre dans l'espace
-
- > Contribution essentielle du Temps atomique (TAI)
 - > Contribution essentielle de la technique VLBI
 - > Organisation internationale (UAI, IERS, IVS, etc.)

Nécessité de nouveaux concepts et nouveaux modèles

- **Accès** à un Système de référence céleste **quasi-idéal** (1998)
- **Précision** (pré-2000) des définitions insuffisante (i.e. moins bonne que la μ seconde de degré)
- **Modèle** précession-nutation de précision insuffisante
- **Observations** astrométriques *de référence* (VLBI) non sensibles à l'orientation de l'écliptique



Résolutions de l'UAI (1988, 1991, 1997, 2000)

Résolutions UAI 2000 sur les systèmes de référence

- **Résolution UAI B1.3**

Définition du BCRS et GCRS

But: définition des systèmes de référence astrométriques en RG

- **Résolution UAI B1.6**

IAU 2000 Modèle de Précession-Nutation

But: améliorer le modèle

- **Résolution UAI B1.7**

Définition du Pôle céleste intermédiaire

But: améliorer la réalisation du pôle dans le domaine des hautes fréquences

- **Résolution UAI B1.8**

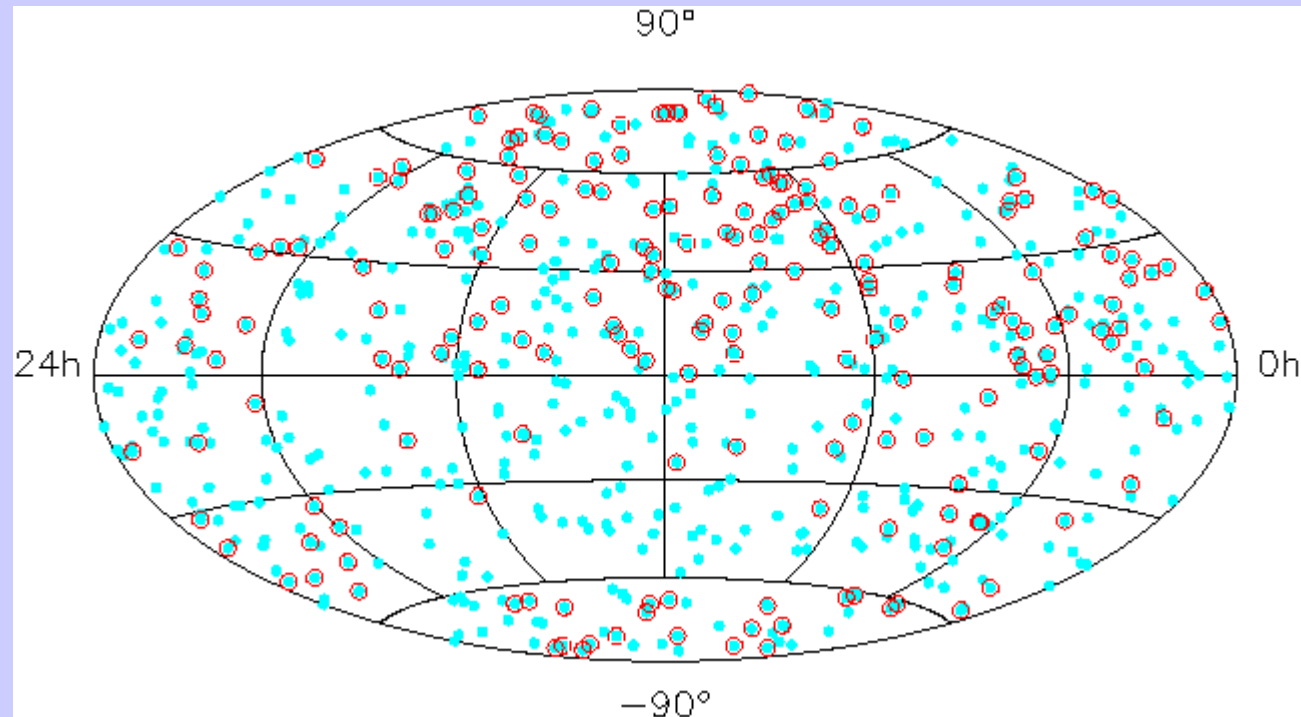
Définition et utilisation de la CEO et de la TEO

But: permettre une estimation plus précise des paramètres (UT1, Précession-nutation)

Implémentation: Conventions IERS 2003, software IERS, IAU/SOFA, Bureaux officiels d'Ephémérides

Réalisation de l'ICRS

Systeme de référence céleste international



ICRF: 608 sources (dont 212 sources de définition)

*période: 1979 – 1995.5; 1.6 million de mesures; IAU WG (JPL, USNO, GSFC, IERS)
(Ma et al. 1998)*

Changement de système de référence céleste

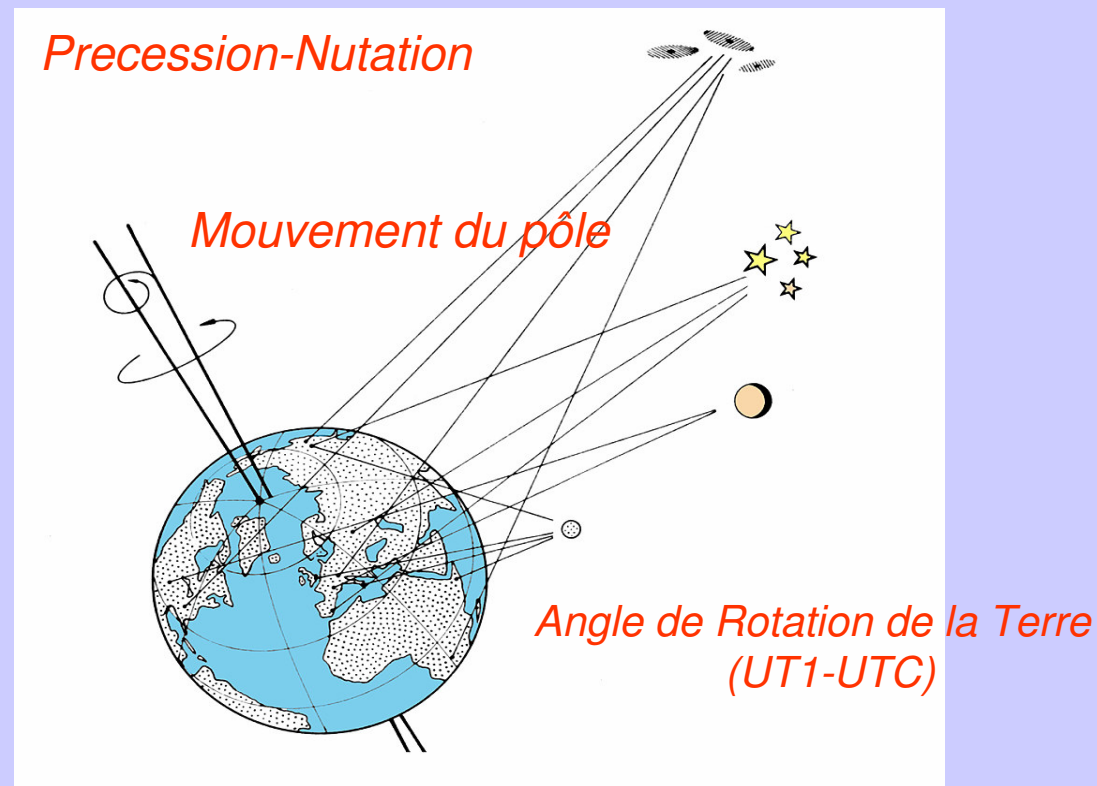
- FK5 -

- basé sur
 - définition dynamique
 - positions et mouvements propres d'étoiles brillantes
(précision : 0.02", 0.08"/c)
- positions rapportées à la meilleure estimation de la position du **pôle moyen et équinoxe moyen de l'époque**
- mouvements propres permettent accès le meilleur au **pôle moyen et équinoxe moyen de l'époque de référence (J2000) à toute date**
- *Système FK5*: catalogue FK5
+ précession IAU1976 + nutation IAU 1980
+ relation GMST/UT1

- ICRF-

- ICRS basé sur
 - définition cinématique
 - directions des objets **extragalactiques**
(précision : 0.4 mas)
- condition cinématique de non-rotation **globale des** directions par rapport aux objets définissant l'ICRS
- **sans référence** au pôle et à l'équinoxe moyens J2000
- ICRS: réalisé par ICRF
indépendent des modèles de precession-nutation

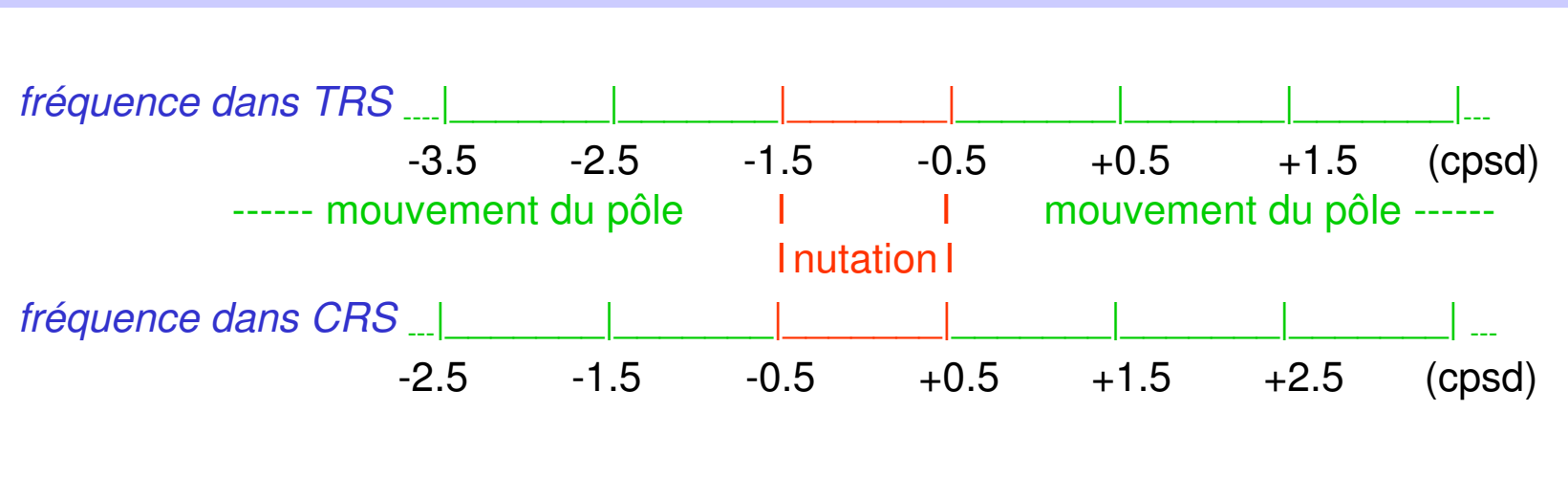
Paramètres d'orientation de la Terre



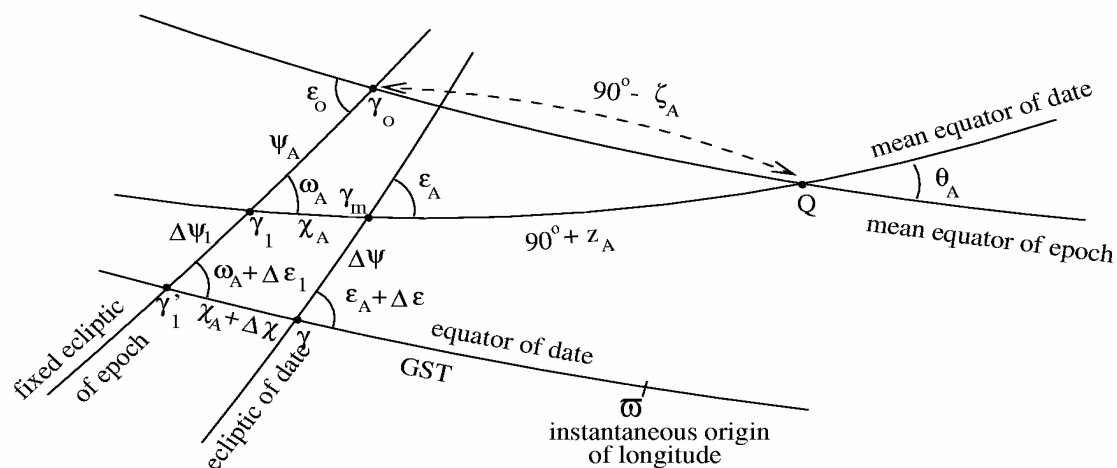
Définition du Pôle Céleste Intermédiaire (Résolution UAI B1.7)

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



Précession-nutation et Angle rotation de la Terre (pre-2003: catalogue FK5)



$\epsilon_A, \omega_A, z_A, \zeta_A, \theta_A, \psi_A, \chi_A$: précession ; $\Delta\psi, \Delta\epsilon$: nutation

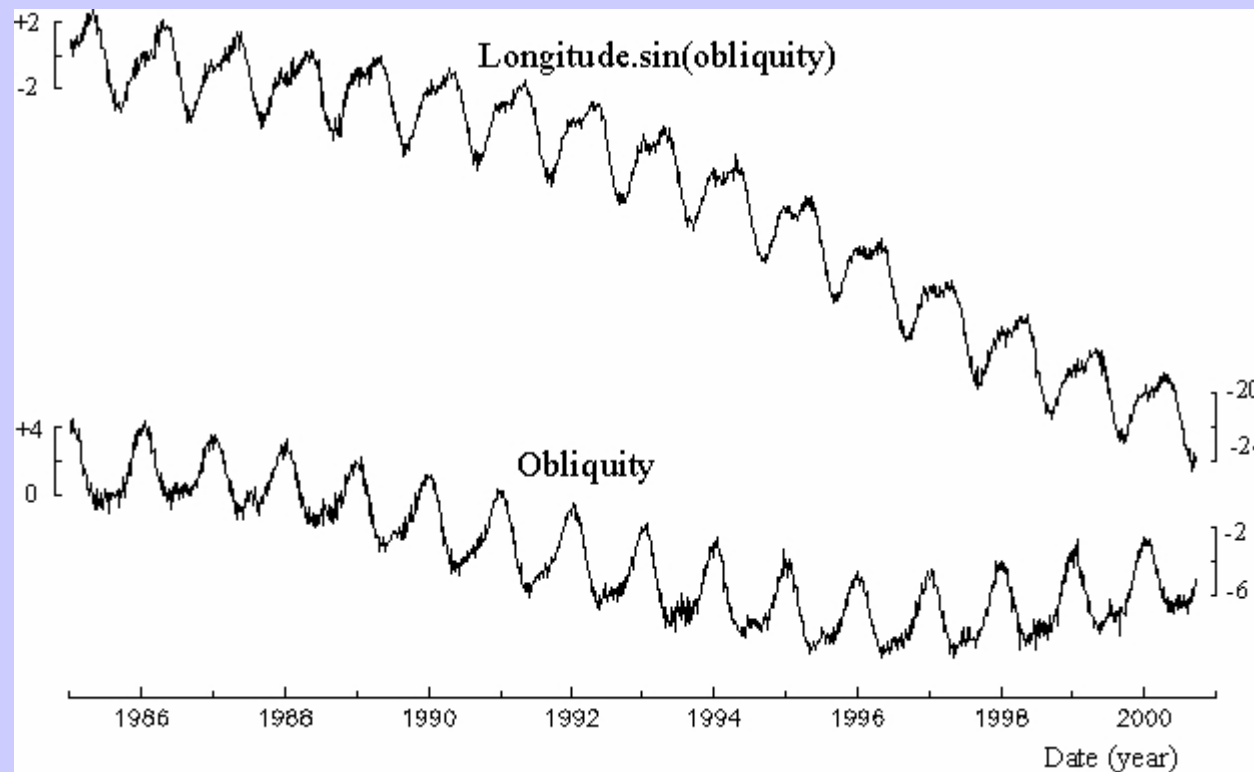
$$\text{GST}_{1982} (0\text{h}) = 24110.54841 + 8640184.812866 t + 0.093104 t^2 - 6.2 \cdot 10^{-6} t^3 \\ + \Delta\psi \cos \epsilon + 2 \text{ termes complémentaires} \quad (t = \text{UT})$$

Rotation de la Terre + précession + nutation + précession x nutation

$z_A, \epsilon_A, \chi_A, \Delta\psi, \Delta\epsilon, \text{GST}$: référence à γ et à écliptique de la date

Écart VLBI au pôle céleste calculé

(différences par rapport au modèle précession-nutation UAI 1976/1980)



VLBI  *position réelle du pôle intermédiaire*

Coordonnées GCRS et ITRS du Pôle

(Résolution UAI B1.8)

position du CIP
dans le GCRS : E, d

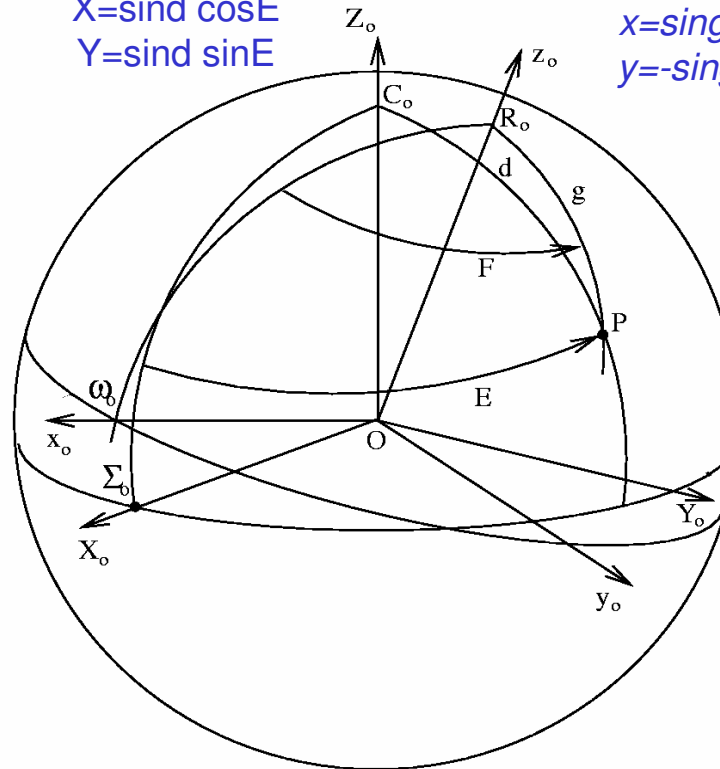
position du CIP
Dans l'ITRS : F, g

$$X = \sin d \cos E$$

$$Y = \sin d \sin E$$

$$x = \sin g \cos F$$

$$y = -\sin g \sin F$$



$$Q(t) = R_3(-E) \cdot R_2(d) \cdot R_3(E)$$

$$W(t) = R_3(-F) \cdot R_2(g) \cdot R_3(F)$$

(Capitaine 1990)

Modèle Précession-Nutation IAU 2000 (Résolution UAI B1.6)

Groupe de travail UAI/UGGI (1994-2000; Pres:V. Dehant, ORB)
Prix-Descartes UE 2003

- *Nutation*

(Terre rigide: Souchay et al. 1999 + transformation modèle de Terre: Mathews et al. 2002)

IAU2000A à 1 μas : 650 termes luni-solaires + 650 termes planétaires

IAU 2000 B (version abrégée à 1 **mas**) : 80 termes

- *Précession*

IAU 2000 : IAU 1976 + corrections (VLBI) aux vitesses de precession

$$d\psi_A \text{ (IAU 2000)} = - 0''.29965/\text{cy} \quad ; \quad d\omega_A \text{ (IAU 2000)} = - 0''.02524 /\text{cy}$$

- *Ecart au pôle céleste à J2000*

écarts **IAU 2000** (VLBI)

$$\xi_0 \text{ (IAU 2000)} = - 16.6 \text{ mas} \quad ; \quad \eta_0 \text{ (IAU 2000)} = - 6.8 \text{ mas}$$

Expressions UAI 2000 pour X et Y

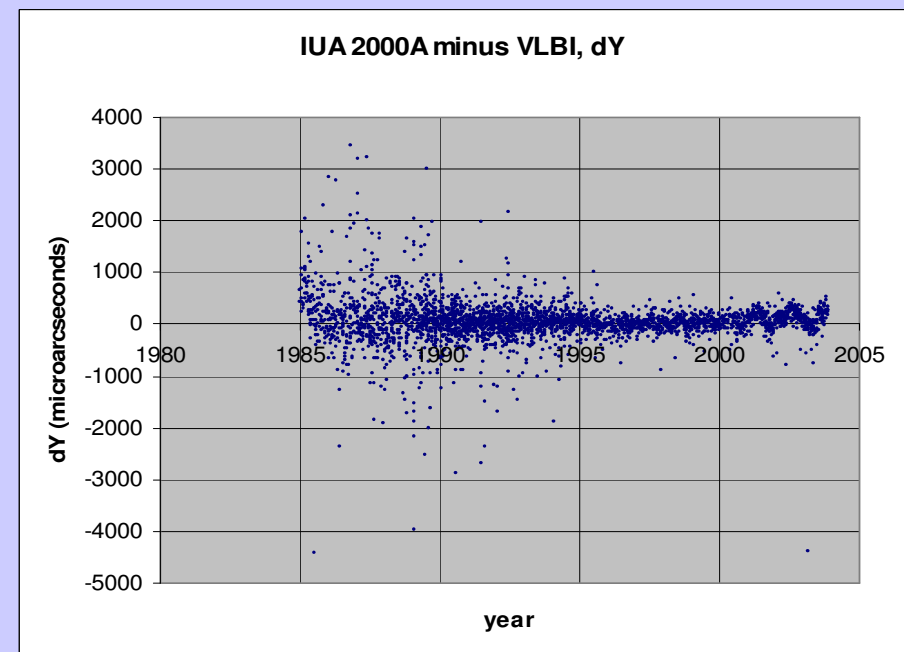
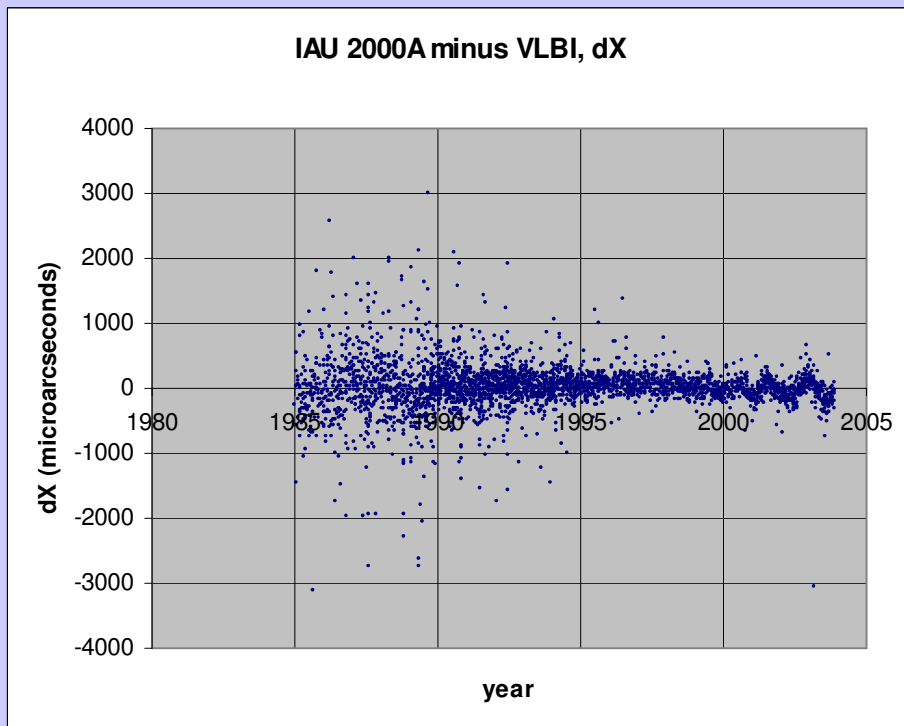
(Capitaine, Chapront, Lambert, Wallace 2003, A&A 400)

$$\begin{aligned} X = & - 0."016617 + 2004."191743 t - 0."4272190 t^2 \\ & - 0."1986205 t^3 - 0."0000460 t^4 + 0."0000060 t^5 \\ & + \sum_i [(a_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(a_{s,1})_i t \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,1})_i t \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(a_{s,2})_i t^2 \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,2})_i t^2 \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y = & - 0."006951 - 0."025382 t - 22."4072510 t^2 \\ & + 0."0018423 t^3 + 0."0011131 t^4 + 0."0000099 t^5 \\ & + \sum_i [(b_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(b_{c,1})_i t \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,1})_i t \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(b_{c,2})_i t^2 \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,2})_i t^2 \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \dots \end{aligned}$$

précession; effets des biais ICRS; nutation; termes croisés précession x nutation

Écart VLBI au pôle céleste par rapport au modèle précession-nutation IAU 2000



Réalisation de la nouvelle origine équatoriale

(Résolution UAI B1.8)

Nouvelle transformation recommandée: CEO/TEO

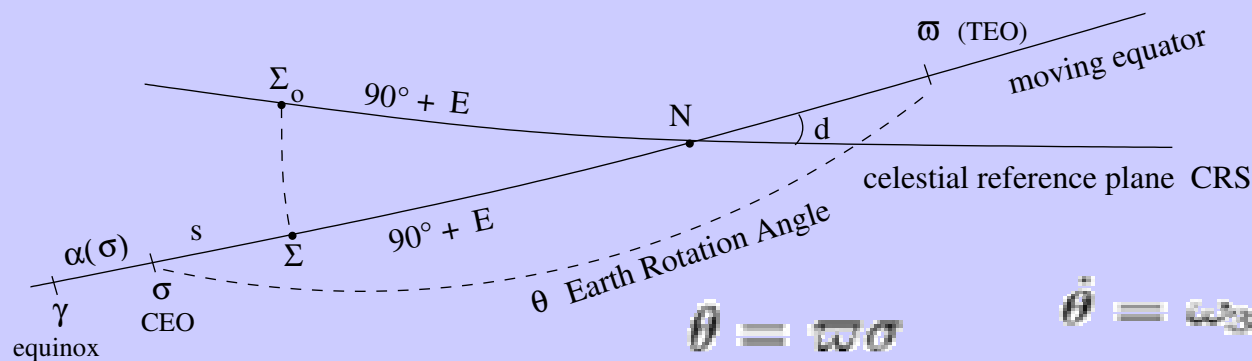
- *CEO/CIO et TEO/TIO: origine « non-tournante » (Guinot 1979)
définition cinématique dépendant du mouvement du CIP*

Position du CEO dans GCRS : $s = \sigma \Sigma$; TEO dans ITRS: $s' = \varpi \Pi$

Lien linéaire entre angle de rotation de la Terre θ et UT1 (Capitaine et al. 2000):

$$\text{ERA} = 2\pi (0.7790572732640 + 1.00273781191135448 \times (\text{UT1} - \text{UT10}))$$

(en secondes: $\text{ERA} (0h) = 24110.54841 + 8639877.317376 t$)



Expression UAI 2000 pour GST

(Capitaine, Wallace, McCarthy 2003, A&A 406)

$$\text{GST} = \theta + \int_{t_0}^t (\dot{\psi}_A + \Delta\dot{\psi}_1) \cos(\omega_A + \Delta\varepsilon_1) dt - \chi_A + \Delta\psi \cos \varepsilon_A + \Delta\psi_1 \cos \omega_A$$

$$\text{GMST}_{2000} = \theta (\text{UT1}) + 0''.014506$$

$$+ 4612''.15739966 t + 1''.39667721 t^2 - 0''.00009344 t^3 + 0''.0000188 t^4$$

accumulated precession in RA (in TT)

$$\text{EE}_{2000} = + \Delta\psi \cos \varepsilon_A - \sum_k C_k \sin \alpha_k - 0.87 \mu\text{as } t \sin \Omega$$

kinematical equation of equinoxes

Implémentation dans Conventions IERS 2003

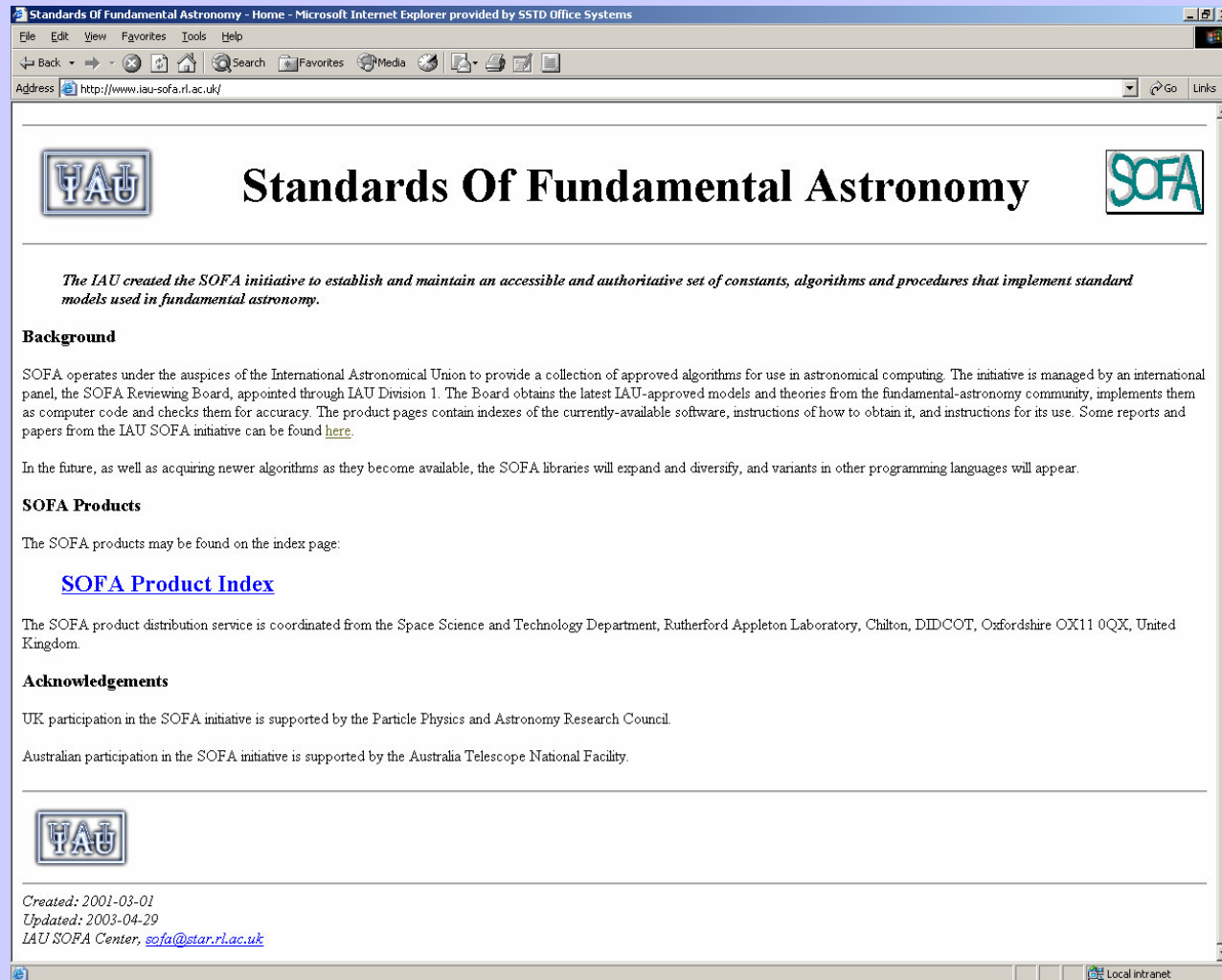
<http://maia.usno.navy.mil/ch5subs.html>

NOUVELLE (CEO) < *équivalence* > CLASSIQUE RIGOUREUX

- SP2000: s'
- POM2000: matrice mouvement du pôle
- ERA2000: Angle rotation de la Terre
- XYs2000A: X, Y, s
- BPN2000: matrice N•P•B nouvelle
- SP2000: s'
- POM2000: matrice mouvement du pôle
- GST2000: GST
- GMST2000: GMST
- EE2000: équation des équinoxes
- EECT2000: termes complémentaires
- NU2000A: nutation, IAU 2000A
- CBPN2000: matrice N•P•B classique

T2C2000: matrice TRS ->CRS

Implémentation dans SOFA



The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer browser window displaying the homepage of the Standards of Fundamental Astronomy (SOFA) initiative. The browser's address bar shows the URL <http://www.iau-sofa.rl.ac.uk/>. The page features the IAU logo on the left and the SOFA logo on the right, with the title "Standards Of Fundamental Astronomy" centered between them. Below the logos, a paragraph states: "The IAU created the SOFA initiative to establish and maintain an accessible and authoritative set of constants, algorithms and procedures that implement standard models used in fundamental astronomy." The page is organized into sections: "Background", "SOFA Products", and "Acknowledgements". The "SOFA Products" section includes a link to the "SOFA Product Index". The "Acknowledgements" section mentions support from the Particle Physics and Astronomy Research Council in the UK and the Australia Telescope National Facility. At the bottom of the page, there is a footer with the IAU logo, the text "Created: 2001-03-01", "Updated: 2003-04-29", and "IAU SOFA Center, sofa@star.rl.ac.uk". The browser's status bar at the bottom right indicates "Local intranet".

Standards Of Fundamental Astronomy

The IAU created the SOFA initiative to establish and maintain an accessible and authoritative set of constants, algorithms and procedures that implement standard models used in fundamental astronomy.

Background

SOFA operates under the auspices of the International Astronomical Union to provide a collection of approved algorithms for use in astronomical computing. The initiative is managed by an international panel, the SOFA Reviewing Board, appointed through IAU Division 1. The Board obtains the latest IAU-approved models and theories from the fundamental-astronomy community, implements them as computer code and checks them for accuracy. The product pages contain indexes of the currently-available software, instructions of how to obtain it, and instructions for its use. Some reports and papers from the IAU SOFA initiative can be found [here](#).

In the future, as well as acquiring newer algorithms as they become available, the SOFA libraries will expand and diversify, and variants in other programming languages will appear.

SOFA Products

The SOFA products may be found on the index page:

[SOFA Product Index](#)

The SOFA product distribution service is coordinated from the Space Science and Technology Department, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, DIDCOT, Oxfordshire OX11 0QX, United Kingdom.

Acknowledgements

UK participation in the SOFA initiative is supported by the Particle Physics and Astronomy Research Council.

Australian participation in the SOFA initiative is supported by the Australia Telescope National Facility.

Created: 2001-03-01
Updated: 2003-04-29
IAU SOFA Center, sofa@star.rl.ac.uk

www.iau-sofa.rl.ac.uk

Journées SFSA, Paris, 14 juin 2004

Changement d'origine sur l'équateur intermédiaire

Groupe de travail UAI “Nomenclature for fundamental astronomy”
créé à l'AG UAI 2003 (Pres: N. Capitaine) chargé de proposer une
nomenclature associée aux nouvelles définitions

(i) Référence CEO/CIO

a) $ERA = \theta = k UT1 ; d\theta/dt = \omega_3$

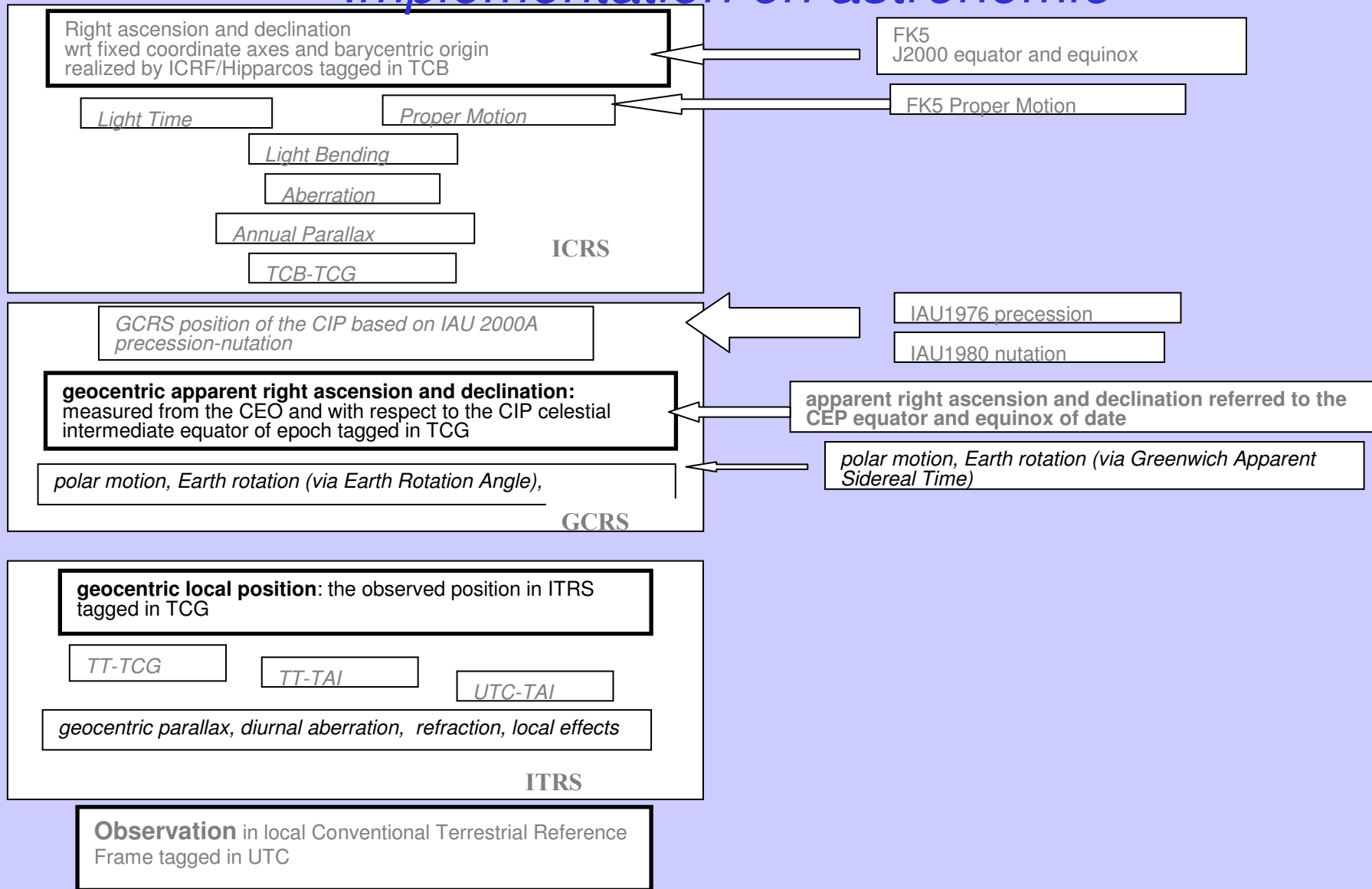
b) “*ascensions droites intermédiaires*” ou $RA_{CEO/CIO}$

(ii) Référence équinoxiale (avec utilisation implicite CEO/CIO)

a) $Temps Sidéral = \theta (UT1) + \text{“equation of the origins”}$
 $= GMST (UT1) + \text{“equation of the equinoxes”}$

b) *ascensions droites* rapportées à l'équinoxiale

Implémentation en astronomie



Exemple

(source: P. Wallace, Juin 2004)

31 Mai 2004, 22h UTC

Etoile fictive, latitude 40°, 6.6 h longitude E

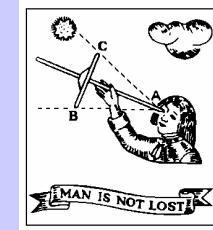
Prédiction classique basée sur le Temps sidéral

ICRS	23 32 55.171	+52 16 38.29
Position apparente	23 33 06.176	+52 17 43.50
Local HA,Dec	+ 8 05 50.276	+52 17 43.66

Prédiction nouvelle basée sur l'angle de rotation de la Terre

ICRS	23 32 55.171	+52 16 38.29
CIS position	23 32 53.329	+52 17 43.50
Local HA,Dec	+ 8 05 50.276	+52 17 43.66

Astronomical Almanac 2006 (USNO/HMNAO)

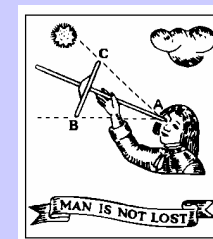


(source: C. Hohenkerk, Avril 2004)

B20 UNIVERSAL TIME AND EARTH ROTATION ANGLE, 2006

Date 0 ^h UT1	Julian Date 245	Earth Rotation Angle			Equation of the Origins		Date 0 ^h UT1	Julian Date 245	Earth Rotation Angle			Equation of the Origins			
		°	'	"	'	"			°	'	"	'	"		
Jan. 0	3735.5	99	26	39.6076	-	4	34.6091	Feb. 15	3781.5	144	46	57.0025	-	4	41.9679
1	3736.5	100	25	47.8118	-	4	34.9270	16	3782.5	145	46	05.2067	-	4	41.9872
2	3737.5	101	24	56.0160	-	4	35.2004	17	3783.5	146	45	13.4109	-	4	42.0010
3	3738.5	102	24	04.2203	-	4	35.4072	18	3784.5	147	44	21.6152	-	4	42.0258
4	3739.5	103	23	12.4245	-	4	35.5460	19	3785.5	148	43	29.8194	-	4	42.0771
5	3740.5	104	22	20.6287	-	4	35.6349	20	3786.5	149	42	38.0236	-	4	42.1679
6	3741.5	105	21	28.8330	-	4	35.7030	21	3787.5	150	41	46.2279	-	4	42.3065
7	3742.5	106	20	37.0372	-	4	35.7807	22	3788.5	151	40	54.4321	-	4	42.4937
8	3743.5	107	19	45.2414	-	4	35.8911	23	3789.5	152	40	02.6364	-	4	42.7206
9	3744.5	108	18	53.4457	-	4	36.0466	24	3790.5	153	39	10.8406	-	4	42.9676
10	3745.5	109	18	01.6499	-	4	36.2482	25	3791.5	154	38	19.0448	-	4	43.2059
11	3746.5	110	17	09.8542	-	4	36.4870	26	3792.5	155	37	27.2491	-	4	43.4034
12	3747.5	111	16	18.0584	-	4	36.7477	27	3793.5	156	36	35.4533	-	4	43.5359
13	3748.5	112	15	26.2626	-	4	37.0119	28	3794.5	157	35	43.6575	-	4	43.5984
14	3749.5	113	14	34.4669	-	4	37.2617	Mar. 1	3795.5	158	34	51.8618	-	4	43.6093

Astronomical Almanac 2006 (USNO/HMNAO)
 from C. Hohenkerk, Avril 2004)



B34 NUTATION, OBLIQUITY & INTERMEDIATE FRAME, 2006
 FOR 0^h TERRESTRIAL TIME

Date 0 ^h TT	NUTATION		True Obl. of Ecliptic ϵ 23° 26'	Julian Date 0 ^h TT	CELESTIAL INTERMEDIATE FRAME		
	in Long. $\Delta\psi$	in Obl. $\Delta\epsilon$			Pole X	Y Y	Origin S
	"	"	"		"	"	"
Jan. 0	- 2.1954	+ 8.3424	26.9813	3735.5	+ 119.3163	+ 8.2546	- 0.002 508
1	- 1.9865	+ 8.3810	27.0186	3736.5	+ 119.4543	+ 8.2931	- 0.002 517
2	- 1.8262	+ 8.4452	27.0815	3737.5	+ 119.5731	+ 8.3570	- 0.002 533
3	- 1.7383	+ 8.5198	27.1548	3738.5	+ 119.6630	+ 8.4316	- 0.002 552
4	- 1.7246	+ 8.5872	27.2209	3739.5	+ 119.7234	+ 8.4989	- 0.002 571
5	- 1.7653	+ 8.6328	27.2653	3740.5	+ 119.7621	+ 8.5445	- 0.002 583
6	- 1.8287	+ 8.6496	27.2808	3741.5	+ 119.7918	+ 8.5612	- 0.002 587
7	- 1.8817	+ 8.6388	27.2687	3742.5	+ 119.8256	+ 8.5503	- 0.002 583
8	- 1.8990	+ 8.6079	27.2365	3743.5	+ 119.8736	+ 8.5193	- 0.002 574
9	- 1.8672	+ 8.5679	27.1952	3744.5	+ 119.9410	+ 8.4793	- 0.002 561

Amélioration de la précession

Précession de l'équateur: (i) Solution équations dynamiques de la rotation de la Terre
(ii) basée sur modèle de précession de l'écliptique amélioré par rapport à UAI 1976

-> *Nécessité d'un modèle dynamique compatible avec UAI 2000*

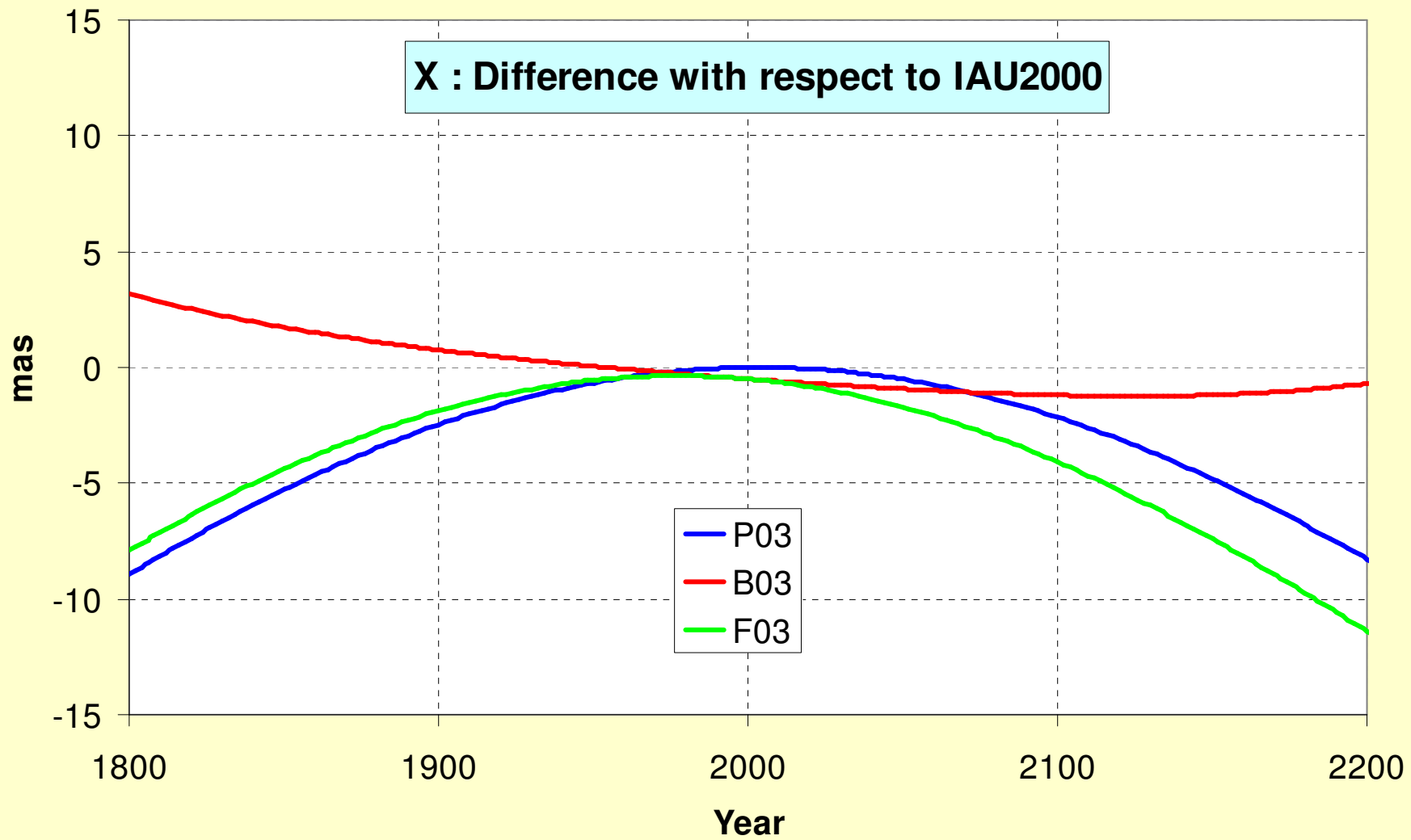
- Bretagnon P., Fienga A., Simon J.L. (2003, *A&A* 400): **B03**
écliptique *VSOP87* + nutation *RE SMART 97* + vitesse de précession *MHB 2000* en longitude

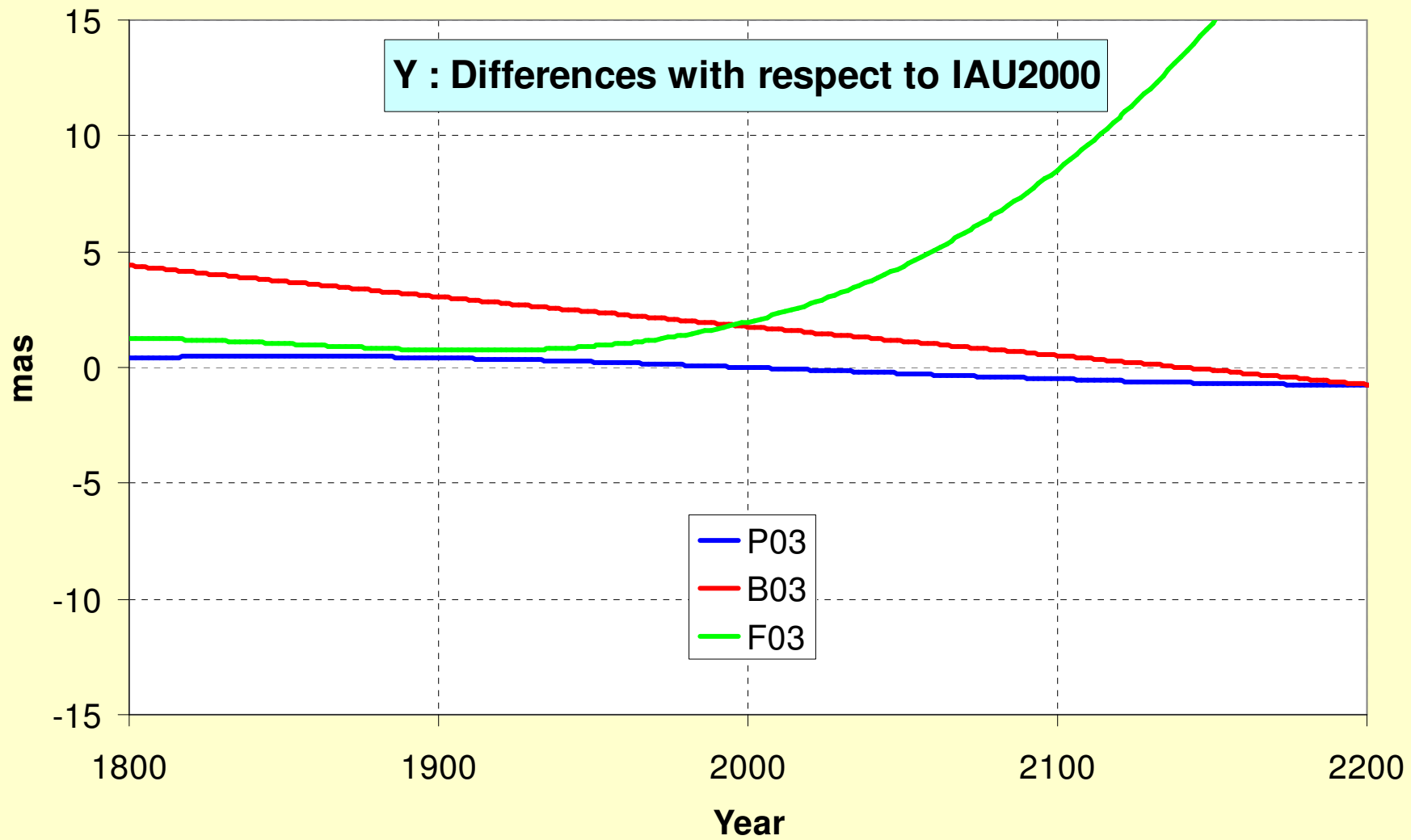
- Fukushima (2003, *A.J.* 126): **F03**
écliptique ajusté à *DE405* (1600-2200) + nutation *NRE SF01* + ajustement quadratique au VLBI
+ Harada & Fukushima (2004, *A.J.* 127): **HF04** écliptique

- Capitaine N., Wallace P., Chapront J. (2003, *A&A* 412): **P03**
écliptique *VSOP87* + ajustement *DE406* (2000-yr interval) + intégration équations dynamiques
précession *NRE* + vitesse de précession *MHB 2000* en longitude et obliquité améliorées

- Capitaine N., Wallace P.W., Chapront J. (2004, *A&A* sous presse)
Comparison between precession models

→ *Groupe de travail UAI (Division I) « Precession and ecliptic » créé à l'AG UAI 2003
(Pres: J. Hilton) qui est chargé de recommander un nouveau modèle*





Conclusions

- *Résolutions UAI 2000 ont introduit nouveaux concepts et nouveaux modèles*
 - formulation améliorée de la précession-nutation
 - définitions rigoureuses pour la réalisation système de référence
- *Conséquences pour la communauté astronomique*
 - amélioration modèle UAI précession-nutation
 - réalisation du Système Céleste International (BCRS/GCRS)
 - nouvelle définition Temps Universel et de sa relation avec Temps sidéral
 - abandon référence intermédiaire à l'écliptique et l'équinoxe
 - réalisation système de référence *intermédiaire* (pôle et origine équatoriale)
- *Implémentation Résolutions*
 - 2003: Service International de la Rotation Terrestre et Systèmes de référence (IERS)
 - IERS software, IAU/SOFA
 - 2006: Ephémérides internationales (Almanacs)
- *Futures recommandations des Groupes de travail de l'UAI (2006)*
 - nouveau modèle de précession
 - nouvelle nomenclature en Astronomie Fondamentale