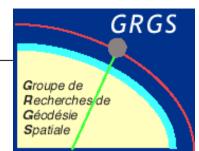


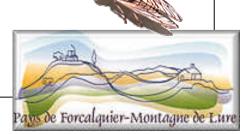
Systèmes de Référence Temps-Espace



Les repères d'espace

Anne-Marie Gontier SYRTE, Observatoire de Paris





Ecole d'été du GRGS, Forcalquier, 1-6 septembre 2002

Rôle des systèmes de référence d'espace et de temps

- Le repérage des directions à partir d'observation d'objets célestes depuis la Terre présente de nombreuses complexités car:
 - Les objets célestes sont en mouvement relatif
 - ♦ Aucune direction matérialisé n'est fixe dans l'espace, sauf les objets les + lointains
 - ♦ La Terre n'est pas rigide, les points de sa surface sont en mouvement relatif
 - Nécessité d'une référence pratique et cohérente des systèmes de référence Terrestre et céleste conventionnels servant de base à toutes les observations et à toutes les représentations d'un mouvement
- Un mouvement ne peut être conçu sans la notion de temps en fonction duquel on exprime les coordonnées, vitesse et accélération des points matériels
 - Rôle primordial de la référence temporelle

Rôle des systèmes de référence d'espace et de temps

- Suivant le problème à étudier il est intéressant d'utiliser l'un ou l'autre des systèmes de coordonnées suivants:
 - Système de coordonnées géodésiques: latitude, longitude
 - Système de coordonnées cartésiennes géocentriques
 - $\ref{Système}$ Système de coordonnées équatoriales sur la sphère céleste: α , δ
 - Système de coordonnées rapportées au plan de l'écliptique
- Les observations d'objets célestes effectuées depuis la Terre nécessitent en outre de tenir compte de l'orientation du repère terrestre par rapport au repère céleste.
 - La transformation de coordonnées entre ces 2 repères est un problème majeurs de l'astronomie fondamentale

Mécanique Newtonienne:

séparation des coordonnées spatiale et de la coordonnée temporelle

système de référence inertiel temps uniforme

temps: caractère absolu, intervalle de temps entre 2 événements est le même quelque soit le système de référence

espace euclidien: mesuré par des distances euclidienne entre 2 points infiniment voisins $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$

Description du mouvement par rapport aux axes à partir de conditions initiales

2 systèmes de référence inertiels se déduisent l'un de l'autre par un mouvement de translation de vitesse constante et les 2 variables de « temps uniforme » par une transformation affine

Mécanique relativiste:

Plus de véritable séparation entre coordonnées spatiales et temporelles

Relativité restreinte:

Le temps dépend du système de référence. Il existe une classe privilégié de système de référence dits inertiels, dans lequel les lois de la physique locale sont les mêmes et la vitesse de la lumière constante.

Espace-temps (quadri-dimensionel) plat mesuré par la métrique de Minkowski

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dt^2$$

Passage d'un système inertiel à un autre par une transformation de Lorentz (contraction des longueurs et dilatation des durées)

> Relativité générale:

Pas de système de référence privilégié (certains systèmes sont + appropriés à certains pbs)

Plus de systèmes de référence universel mais des systèmes locaux

Le caractère géométrique de l'espace-temps courbe dépend des phénomènes physiques dans cet espace-temps (répartition des masses)

Métrique de cet espace: (pseudo-)riemanienne: tenseur à 10 degrés de liberté

On peut définir **localement** un système de coordonnées privilégié (métrique Minkowskienne). Ce système n'est valable que localement et son transport en un autre point de l'espace ne peut être défini que si l'on connaît la distribution de masse dans tout l'espace dans lequel le transport s'effectue.

En astronomie: (astronomie fondamentale, géodésie spatiale, mécanique céleste)

Les phénomènes considérés sont relatif à des vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière ($v^2/c^2 \approx 10^{-8}$) et à des champs faibles ($U/c^2 \approx 10^{-9}$)

Dans le cas de la relativité générale le problème ne se simplifie que si l'on se place localement dans le voisinage d'un champs gravitationnel faible systèmes de référence centrés sur le système solaire

Les systèmes de référence localement inertiels au sens de la relativité (appelé **quasi-inertiel** en astronomie), peuvent être considéré comme globalement inertiels dans le système solaire avec des petites corrections relativistes exprimées par l'intermédiaire de l'écart à la métrique Minkowskienne.

Dans la pratique, on veut seulement avoir accès à un système de référence local pour lequel les effets relativistes peuvent être modélisés sous la forme de corrections post-newtoniennes.

Etapes dans la construction des systèmes de référence

Kovalevsky 1989

1- Conception:

Enoncé d'une propriété générale que devra vérifier le système de référence \$\infty\$ système de référence idéal

2 – Choix d'une structure physique:

Ensemble physique sur lequel on fait porter la définition idéale \$\times\syst\text{eme de référence}\$

3 – Modélisation de la structure:

Evaluation des paramètres modélisant mathématiquement la structure en f(t) *\système de référence conventionnel*

4 – Matérialisation du système:

Application du modèle aux objets P_i de la structure \Rightarrow positions = f (t) \Rightarrow repère de référence conventionnel

5 – Extension du repère:

Ensembles d'objets S_i dont on détermine la position en fonction du temps relativement à P_i

∜repères secondaires

Construction d'un système de référence terrestre

1- Concept:

Doit représenter au mieux la surface de la Terre:

la croûte terrestre ne doit avoir ni translation, ni rotation d'ensemble / à ce système

$$\int_{D} \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} dv = 0 \quad et \quad \int_{D} (\overrightarrow{OM} \wedge \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}) dv = 0$$

🔖 système de référence terrestre idéal

2 – Choix de la structure physique:

Limite le domaine D à un certain nombre de points représentatifs du domaine stations d'observations VLBI, LLR, SLR, GPS, DORIS

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{d \overrightarrow{OM_i}}{dt} = 0 \quad et \quad \sum_{i=1}^{N} \left(\overrightarrow{OM_i} \wedge \frac{d \overrightarrow{OM_i}}{dt} \right) = 0$$

⋄ système de référence terrestre

Construction d'un système de référence terrestre

3 – Modélisation de la structure:

modèle de mouvement des plaques tectoniques modèle de tenseur de déformations dans chacune des plaques

🤝 système de référence terrestre conventionnel

4 – Réalisation:

Détermination de coordonnées rectangulaires des stations d'observations de géodésie Spatiale (position + vitesse)

♦ repère de référence terrestre:

ITRF

5 - Extensions:

Raccordements par observations variées d'une même station (co-localisation)

Positionnement relatif

réseaux géodésiques nationaux, régionaux

International Terrestrial Reference Frame: ITRF

✓ Dernière réalisation: **ITRF2000**

Combinaison de TRF élaborés avec contraintes minimum:

7 SLR: AUS, CGS, CRL, CSR, DEOS, DGFI, JCET 3 VLBI: GIUB, GSFC, SHA

6 GPS: CODE, GFZ, IGS, JPL, NCL, NOAA 2 DORIS: GRGS, IGN

2 multi-tech. (SLR + DORIS + PRARE): GRIM, CSR 1 LLR: FSG

✓ Densification GPS: Amérique du sud, EUREF, EUVN, Antarctique, CORS, REGAL

✓ Définition du système

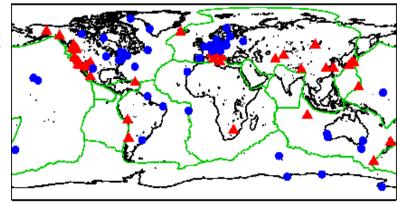
facteur d'échelle: moyenne pondérée des 3 VLBI + 5 SLR (CGS, CRL, CSR, DGFI, JCET)

origine: moyenne pondérée des 5 SLR

orientation: sélection de 54 sites de bonne qualité

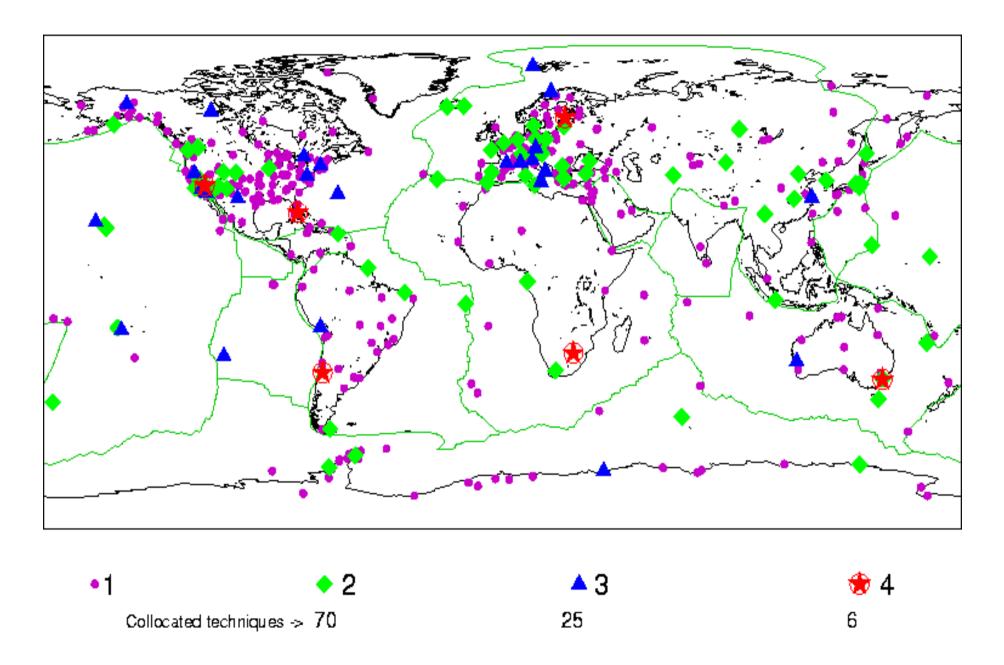
ITRF97 à l'époque 1997.0

no net rotation w.r.t. NNR-NUVEL1A



http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/

ITRF2000



Construction d'un système de référence céleste Cinématique dynamique

1- Concept:

Pas de rotation / à un ensemble de points de repère qui ne peuvent avoir de mvt propre observable Pas de termes d'accélération d'entraînement dans les équations décrivant le mvt des corps célestes

2- Choix de la structure physique:

- Quasars, noyaux de galaxies
- * Etoiles

- ? Planètes
- **(** Lune
- | Satellites artificiels

3- Modélisation de la structure:

- structure des sources
- * mouvements propres, distances

- système de constantes: UAI, JPL
- 1 champ de gravité terrestre

Construction d'un système de référence céleste

Cinématique

dynamique

4- Réalisation:

- catalogue astrométrique VLBI ICRF, ICRF-Ext.1
- * repère HIPPARCOS (40 000 étoiles)

Éphémérides:

- ? Terre, planètes
- **U**Lune
- Satellites artificiels

FK5 (étoiles observées avec le soleil ou des planètes)

5- Extension:

- catalogue HIPPARCOS (+80 000 étoiles)
- ★ catalogue TYCHO (400 000 étoiles)

FK5 (autres étoiles)

Catalogues SAO, IRS, etc

International Celestial Reference Frame: ICRF

✓ Dernière réalisation: ICRF-Ext.1 ICRF-Ext.2 en préparation

✓ 1 solution VLBI unique

observations: 1979 – avril 1999

2.2 millions, 3006 sessions, 667 sources

✓ Catégories:

définitions: bonnes qualité

candidates: potentiellement de définition

autres: rattachements, structure

✓ Définition du système

origine: barycentre du système solaire

orientation: contrainte statistique de non-rotation / à la réalisation précédente en utilisant les sources de définitions

origine en a: adoption du α moyen de 23 sources dans un groupe de catalogues (ayant fixés l' α du quasar 3C273B à sa valeur dans le FK5)

90°

Oh

-90°

http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/

Orientation de la Terre dans les repères de référence

- ✓ L'orientation de la Terre dans un repère non-tournant géocentrique est donnée mathématiquement par 3 paramètres. La position de l'axe instantané de rotation ne peut pas être déterminé à un instant donné à partir d'observations qui permettent, en fait, de situer la Terre dans le repère non-tournant à cet instant.
- ✓ Pôle céleste intermédiaire (CIP): pôle conventionnel, défini de façon à ne présenter aucun mouvement diurne, quasi-diurne dans la Terre ou dans l'espace.
 Il reste proche de l'axe de rotation écart < 0.02"
- ✓ **Phénomènes:** composante prévisible + non prévisible = 5 paramètres
 - Mouvement de l'axe de rotation dans la Terre
 mouvement du pôle
 - Rotation de la Terre

 UT1-UTC
 - Mouvement de l'axe de rotation dans l'espace
 ⇒ précession-nutation

✓ Transformations:

classique équateur, écliptique

NRO équateur

Le mouvement du pôle (x_p, y_p)

✓ Rotation des corps solides: Euler 1765

si l'axe de rotation d'un solide ne coïncide pas avec son axe d'inertie alors l'axe de rotation de déplace à l'intérieur du corps en décrivant un cône autour de l'axe d'inertie

PRECESSION

✓ Terre

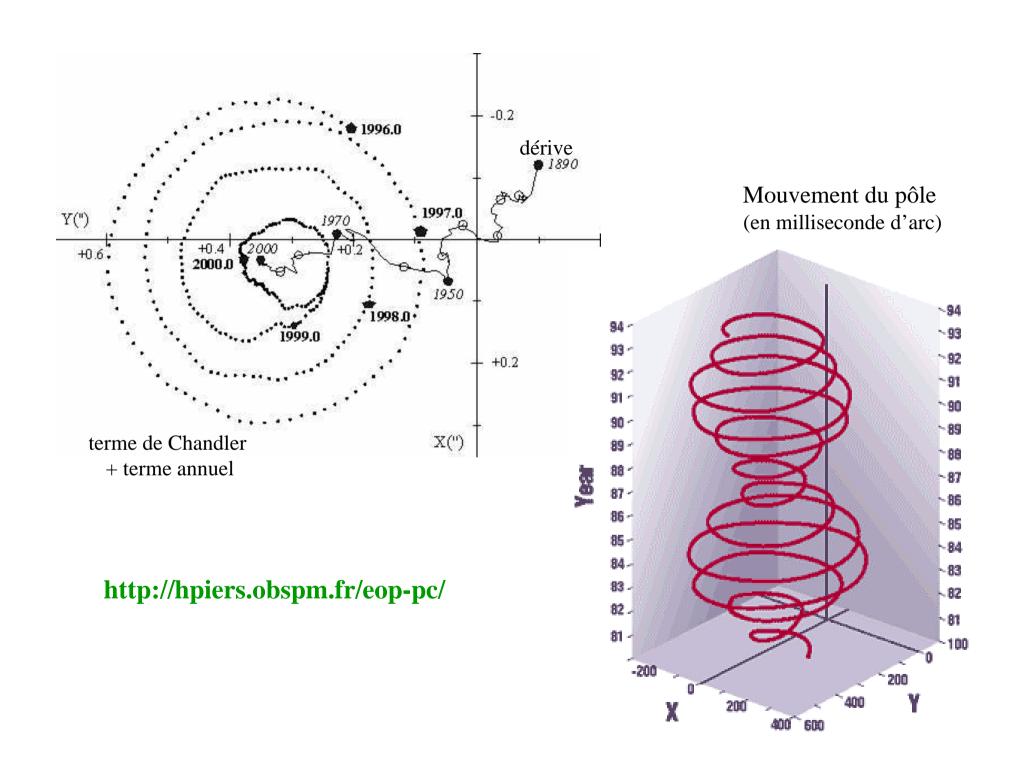
décalage de quelques mètre à la surface de la Terre

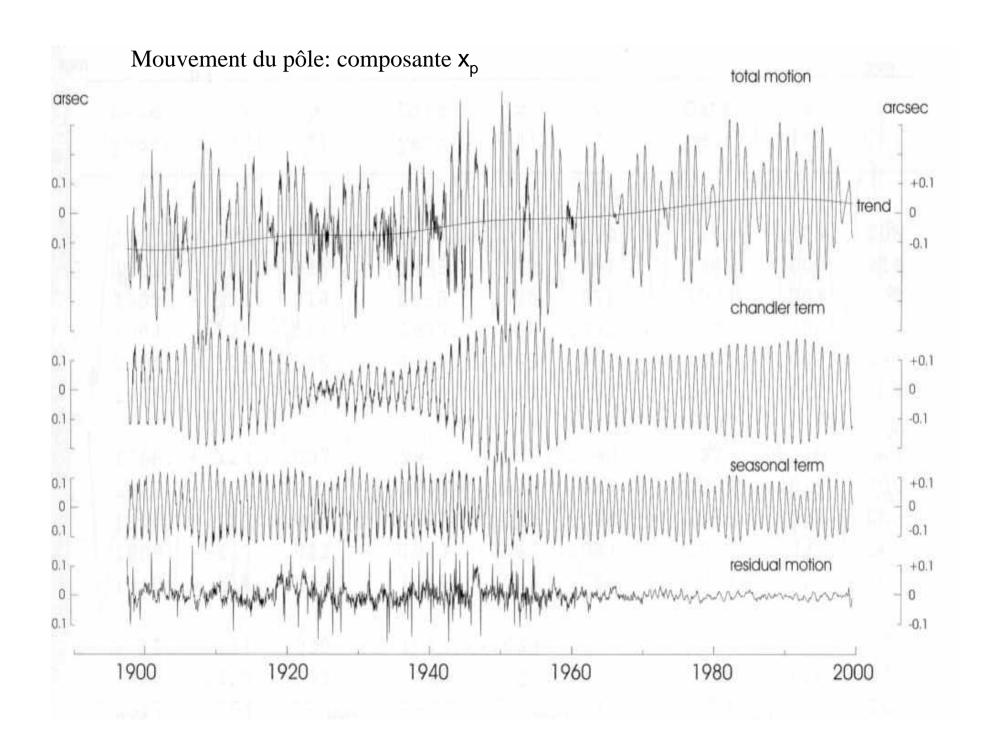
Use Euler: période de 305j donné (terre rigide)

Chandler: période de 14 mois (terre déformable)

✓ Il comporte 3 composantes majeures:

- ? terme de Chandler, mouvement libre 0.20"
- ? terme annuel forcé par le déplacement saisonnier des masses d'air et d'eaux 0.16" (atmosphère, océans)
- ? dérive irrégulière du pôle moyen dans la direction 80° ouest causé par les déformations lentes de la croûte 0.004"/an





La rotation de la Terre

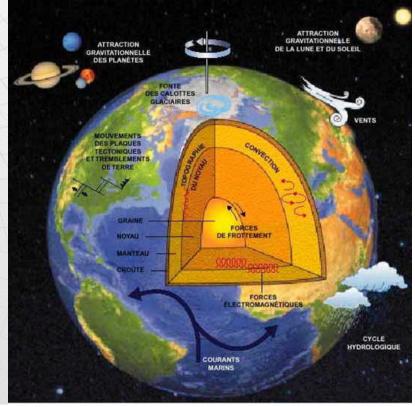
Variation de la vitesse de rotation

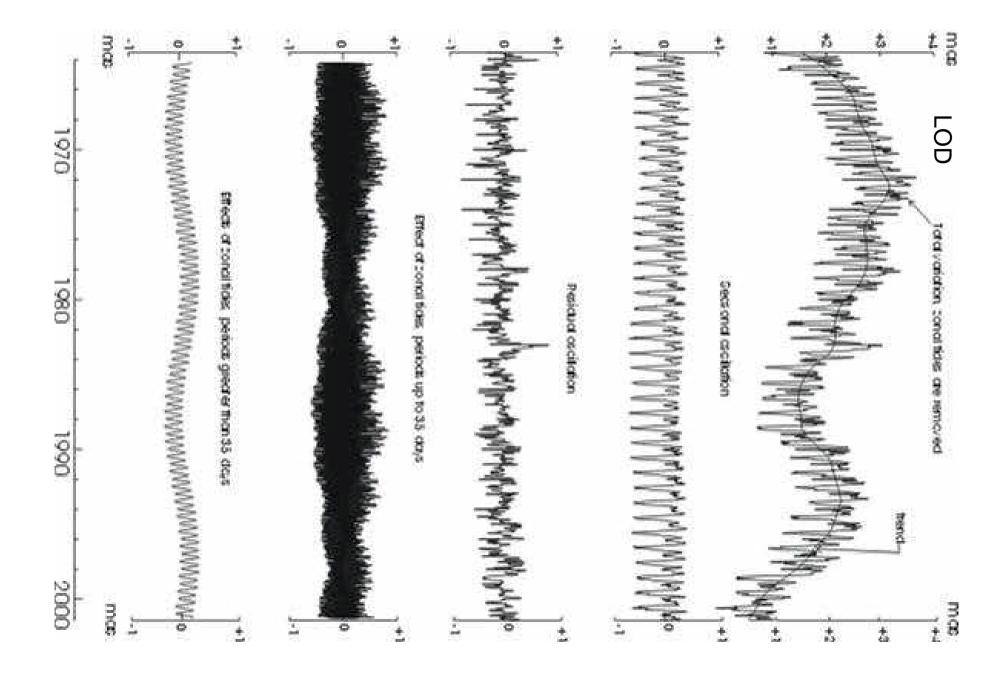
ralentissement séculaire (Halley): LOD s'allonge de 1 à 2 ms / siècle marées

Annuelle et semi-annuelle: amplitude environ 1ms sur la durée du jour (LOD)

déplacements saisonnier des masses d'air

Irrégularités:d'origine atmosphérique: El Ninoeffets de couplage noyau - manteau





Précession - Nutation

✓ Définitions:

- * sphère céleste = sphère de rayon arbitraire dont le centre est celui du système considéré
- * équateur = plan _ à l'axe de rotation de la Terre
- * écliptique moyen = plan contenant le rayon vecteur Soleil-Terre et le vecteur vitesse orbitale de la Terre
- * obliquité = inclinaison de l'écliptique sur l'équateur $e_0 = 23^{\circ} 26' 21''.448$
- * équinoxe = nœud ascendant de l'écliptique sur l'équateur (g)

✓ Effet de l'attraction luni-solaire sur la Terre consiste:

- ➤ Une force qui fait graviter le barycentre du système Terre-Lune autour du Soleil et le centre de masse de la Lune autour de la Terre.
- ➤ Un couple appliqué à l'ensemble des masses de la Terre (bourrelet équatorial => le couple n'est pas nul) qui tend à faire coïncider le plan de l'équateur avec l'écliptique.

Précession - nutation

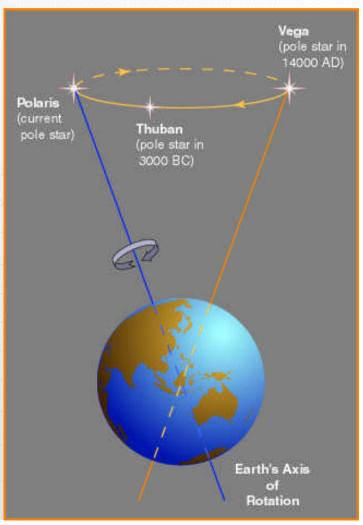
Partie constante du couple luni-solaire total

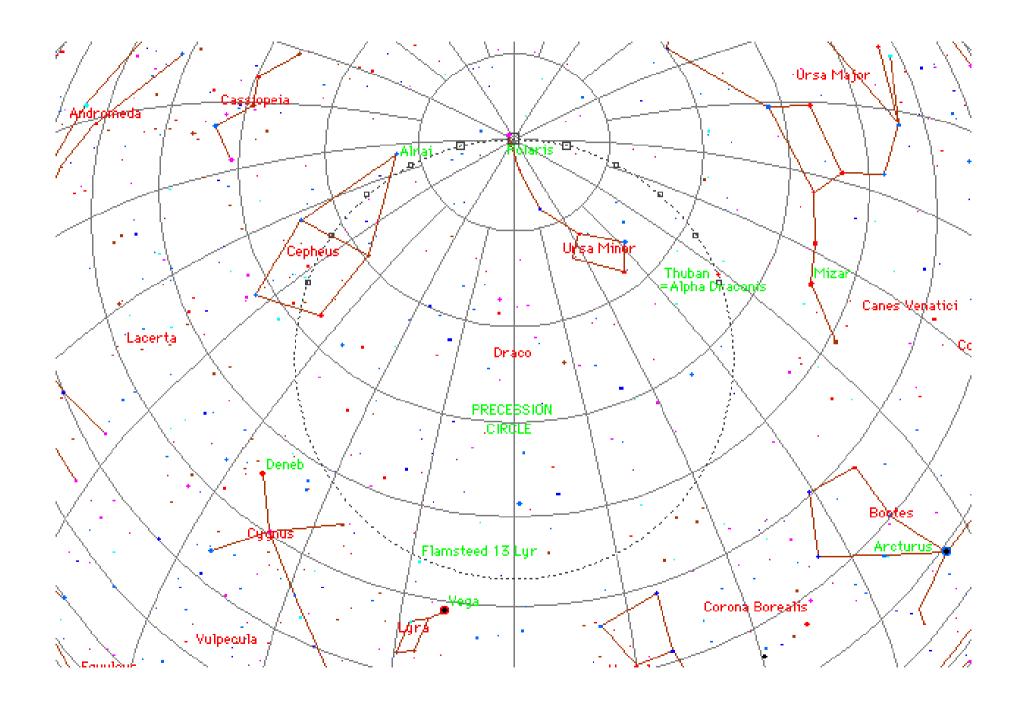
L'axe de rotation décrit un cône de demi ouverture ε_0 autour du pôle de l'écliptique en

25 700 ans

\$\to\$ déplacement de γ de 50"/ an (Hipparque)

- Pôle moyen = CIP animé du seul mouvement de précession
- Équateur moyen de la date = grand cercle de la sphère céleste _ à la direction du pôle moyen
- équinoxe dynamique moyen de la date = nœud ascendant de l'écliptique moyen de la date sur l'équateur moyen de la date





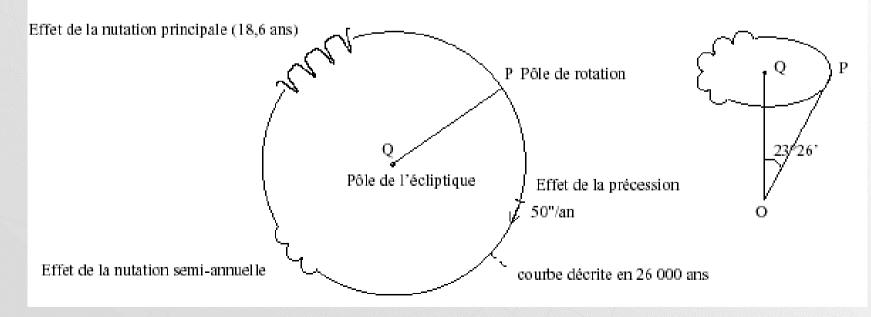
Précession - Nutation

Ensemble des termes périodiques du couple luni-solaire
 Chaque terme de nutation fait décrire au CIP une ellipse autour du pôle moyen de demi-grand axe:
 9".20 période de 18.61 ans

0 ".57 période semi-annuelle

0 ".098 période semi-mensuelle

- Equateur vrai de la date = grand cercle de la sphère céleste _ à la direction du CIP
- Equinoxe dynamique vrai de la date = nœud ascendant de l'écliptique moyen de la date sur l'équateur vrai de la date



Précession - Nutation

• Action des planètes sur le plan de l'écliptique:

- ? Précession: lent mouvement de l'écliptique dû à l'action gravitationnelle des planètes sur la Terre
 - ♥ précession additionnelle de γ 10" / siècle + variation de ε de 47" / siècle
- ? Nutation: perturbations planétaires à courtes périodes de l'équateur amplitudes < 0".0004 (Vénus, Jupiter)

Non-rigidité de la Terre:

modification des amplitudes de certains termes de nutation

Transformation du repère terrestre au repère céleste

http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html

Classique:

[CRS] =
$$R_3(\mathbf{a}_0) R_2(-\mathbf{x}_0) R_1(\mathbf{h}_0)$$

$$\alpha_0=\alpha$$
 de l'équateur moyen à J2000.0 $\xi_0,\,\eta_0=$ écart du pôle céleste à J2000 / au pôle de l'ICRF

$$R_3(\mathbf{z}_A) R_2(-\mathbf{q}_A) R_3(z_A) R_1(-\mathbf{e}_A - \mathbf{d}\mathbf{w}_A) R_3(\Delta \mathbf{y}) R_1(\Delta \mathbf{e} + \mathbf{e}_A + \mathbf{d}\mathbf{w}_A) R_3(-GST) R_1(y_p) R_2(x_p) [TRS]$$

$$= R_3(\boldsymbol{a}_0) R_2(-\boldsymbol{x}_0) R_1(\boldsymbol{h}_0)$$

$$R_{1}(-\boldsymbol{e}_{0}) R_{3}(\boldsymbol{y}_{A}+\boldsymbol{d}\boldsymbol{y}_{A}) R_{1}(\boldsymbol{w}_{A}+\boldsymbol{d}\boldsymbol{w}_{A}) R_{3}(-\boldsymbol{c}_{A}) R_{1}(-\boldsymbol{e}_{A}-\boldsymbol{d}\boldsymbol{w}_{A}) R_{3}(\Delta \boldsymbol{y}) R_{1}(\Delta \boldsymbol{e}+\boldsymbol{e}_{A}+\boldsymbol{d}\boldsymbol{w}_{A}) R_{3}(-GST) R_{1}(\boldsymbol{y}_{p}) R_{2}(\boldsymbol{x}_{p}) [TRS]$$

$$GST = GMST(UT1) + \Delta\Psi\cos(e) + \text{termes complémentaires}$$

© NRO:

[CRS] =
$$R_3(-E) R_2(-d) R_3(E) R_3(s) R_3(-q) R_3(-s') R_1(y_p) R_2(x_p)$$
 [TRS]

=
$$PN(t) R_3(s) R_3(-q) R_3(-s') R_1(y_p) R_2(x_p)$$
 [TRS]

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

 $Y = \sin d \sin E$

$$PN(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} \qquad \begin{aligned} \mathbf{q} &= \mathbf{q}_o + k \left(UT1 - UT1_o \right) \\ s(t) &= -1/2 \left[X(t)Y(t) - X(t_o)Y(t_o) \right] + \int_{t_o}^t X(t)Y(t) dt \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{8} \left(X^2 + Y^2 \right) = \frac{1}{1 + \cos(d)} \end{aligned}$$

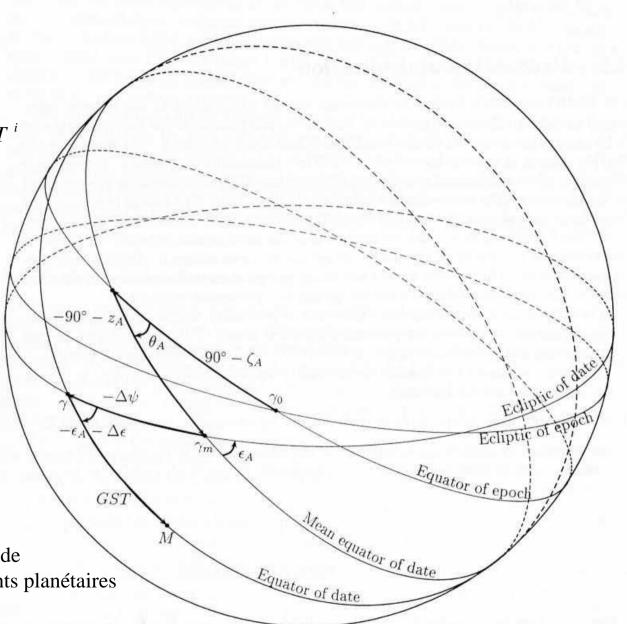


$$z_A, \boldsymbol{q}_A, \boldsymbol{z}_A, \boldsymbol{e}_A = \sum_{i=0}^n a_i T^i$$

$$\Delta\Psi, \Delta\boldsymbol{e} = \sum_{i=1}^{N} b_{1i} \sin(\boldsymbol{a}_{i}) + b_{2i} \cos(\boldsymbol{a}_{i}) + c_{1i}T \sin(\boldsymbol{a}_{i}) + c_{2i}T \cos(\boldsymbol{a}_{i})$$

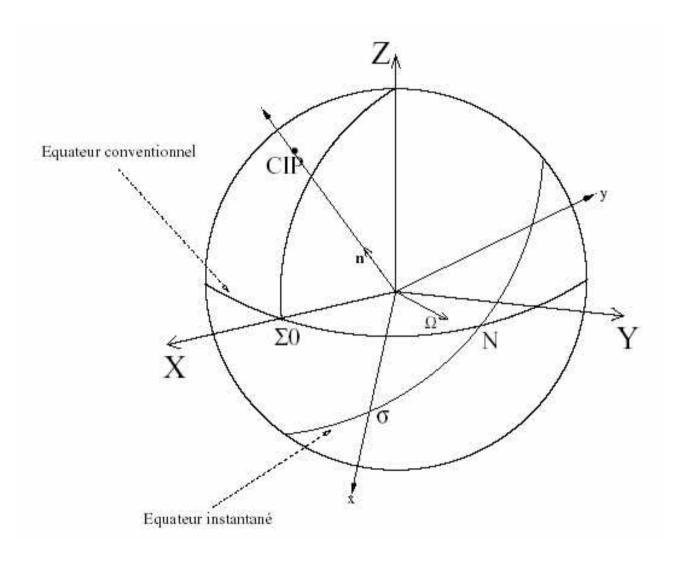
 $T = t - t_0$ en siècle

 α_i = combinaison linéaire de l, l', F, D, Ω , arguments planétaires



NRO

Introduite par B. Guinot (1979), point défini par une condition cinématique: $\overrightarrow{\Omega} \cdot \overrightarrow{n} = 0$



BIBLIOGRAPHIE:

Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G.H., Kinoshita, H., McCarthy, D.D., Seidelmann, P.K., 1982: "The new definition of universal time", *Astron. Astrophys.*, **105**, p. 359-361.

Arias, E.F., Charlot, P., Feissel, M., Lestrade, J.-F., 1995: "The extragalactic reference system of the International Earth Service, ICRS", *Astron. Astrophys.*, **303**, p. 604-608.

Capitaine, N., 1999: "Cours A1, astronomie fondamentale", Cours de DEA astronomie fondamentale, mécanique céleste et géodésie, observatoire de Paris.

Capitaine, N., 1998: "Cours UVA1, système de référence spatio-temporels", Cours de DEA astronomie fondamentale, mécanique céleste et géodésie, observatoire de Paris.

Capitaine, N., Chapront, J., Lambert, S., Wallace, P., 2003: "Expressions for the coordinates of the CIP and the CEO using the IAU 2000 precession-nutation model", *Astron. Astrophys.*, accepté.

Capitaine, N., Guinot, B., McCarthy, D.D., 2000: "Definition of the Celestial Ephemeris Origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame", *Astron. Astrophys.*, **355**, p. 398-405.

Chapront-Touzé, M., Francou, G., Morando, B., "Les systèmes de référence utilisé en astronomie", Notes Scientifiques et Techniques du Bureau des Longitudes, **S046**, novembre 1994.

Gontier, A.-M., Ma, C., Arias, E.F., Eubanks, T.M., Fey, A.L., Jacobs, C.S., Sovers, O.J., Archinal, B. A., Charlot, P., 2002: "Establishment of the ICRF", *Adv. Space Res.*, Vol 30, No. 2, p. 185-193.

Guinot, B., 1979, in Time and the Earth's Rotation, D.D. McCarthy and J.D. Pilkington (eds.), D. Reidel Publ., p.7-18.

IERS Conventions 1996, IERS Technical Note nº 21, D.D. McCarthy (ed.), Observatoire de Paris, p.20-39.

IERS Conventions 2000, http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html

"Introduction aux éphémérides astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps", sous la direction de J.-L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot, Bureau Des Longitudes, Les éditions de physiques, 1997.

Kovalevsky, J., Mueller, I.I., Kolaczek, B., 1989, Astronomy and Geophysics, Kluwer Academic Publishers.

Kovalevsky, J., Lindegren, L., Perryman, M.A.C., Hemenway, P.D., Johnston, K.I., Kislyuk, V.S., Lestrade, J.-F., Morrison, L.V., Platais, I., Röser, S., Schilbach E., Tucholke, H.J., de Vegt., C., Vondrak, J., Arias, F., Gontier, A.-M., Arenou, F., Brosche, P., Florkowski, D.R., Garrington, S.T., Preston, R.A., Ron, C., Rybka, S.P., Scholz, R.-D., Zacharias, N., 1997: "The Hipparcos catalogue as a realization of the extragalactic reference system", *Astron. Astrophys.*, **323**, p. 620-633.

Lieske, J.H., Lederle, T., Fricke, W. Morando, B., 1977: "Expressions for the Precession Quantities based upon the IAU (1976) System of astronomical Constants", *Astron. Astrophys.*, **58**, p. 1-16.

Ma, C., Arias, E.F., Eubanks, T.M., Fey, A.L., Gontier, A.-M., Jacobs, C.S., Sovers, O.J., Archinal, B.A., Charlot, P., 1998:"The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry", *Astronomical Journal*, **116**, p. 516-546.

Ma, C., Arias, E.F., Eubanks, T.M., Fey, A.L., Gontier, A.-M., Jacobs, C.S., Sovers, O.J., 1997: "The International Celestial Reference Frame realized by VLBI", IERS Technical Note no 23, C. Ma and M. Feissel (eds.), Observatoire de Paris, Paris France.

Mathews, P.M., Herring, T.A., Buffet, B.A., 2002: "Modelling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior", *Journal of Geophysical Research*, **107**, **No B4**.

Seidelmann, P.K., 1982: "1980 IAU Nutation: The Final report of the IAU Working Group on Nutation", *Celest. Mech.*, **27**, p. 79-106.

Wallace, P., 2002: "Software for implementing the IAU 2000 resolutions", IERS Technical Note n° 29, N. Capitaine, D. Gambis, D.D. McCarthy, G. Petit, J. Ray, B. Richter, M. Rothacher, E.M. Standish and J. Vondrak (eds.), Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geoäsie, Frankfurt am Main, p. 65-69.