

A composite image of space. The Earth is on the left, showing blue oceans and white clouds. The Moon is on the right, showing its grey surface. A small Mars is in the top right corner. The background is black with many white stars.

# La Terre dans l'espace

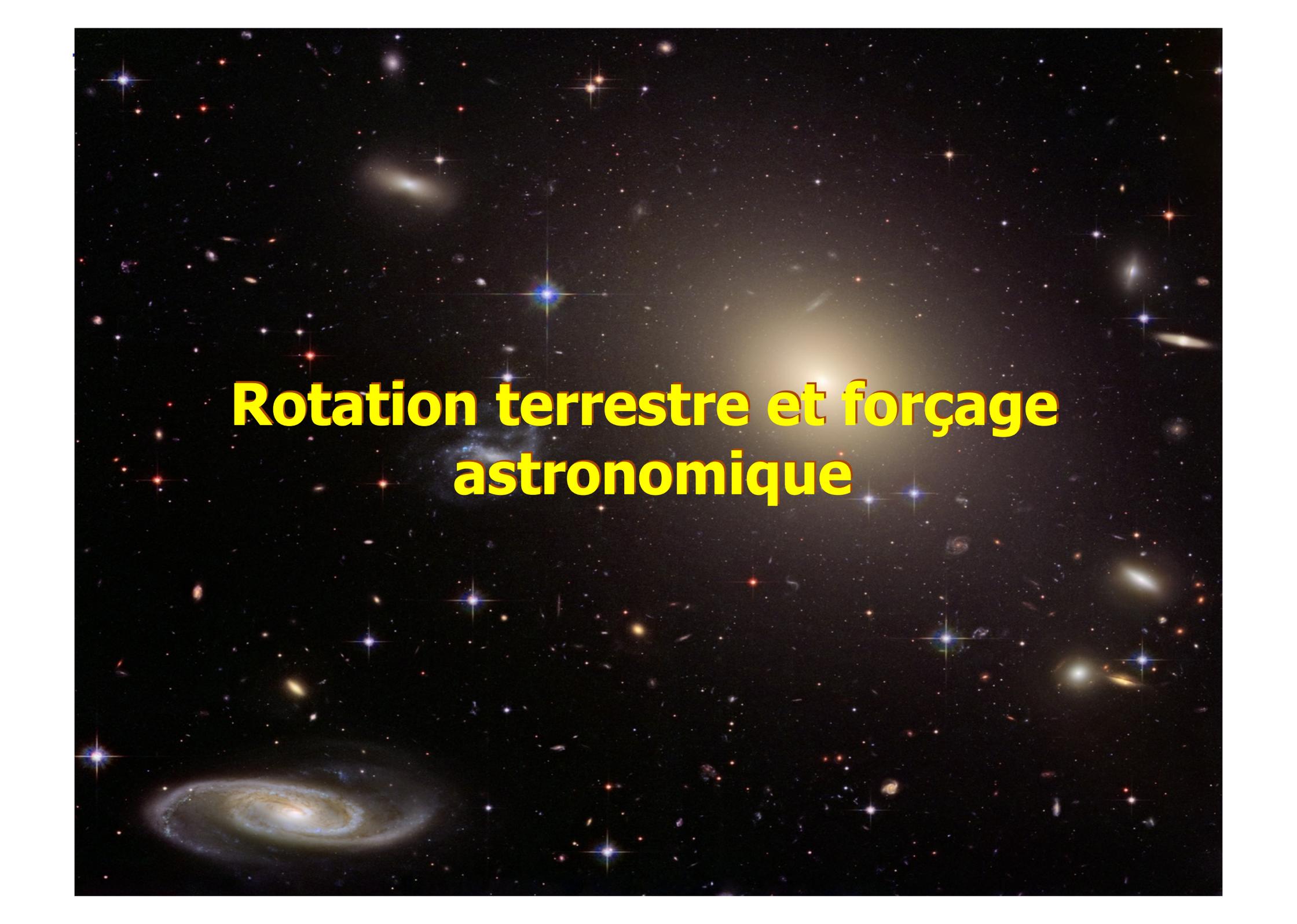
[Sebastien.Lambert@obspm.fr](mailto:Sebastien.Lambert@obspm.fr)

Observatoire de Paris

Tél. : 01 40 51 22 33

## Dans ce cours...

- Effets des marées sur la rotation d'une Terre à noyau fluide  
... ou comment la Terre répond au forçage astronomique...  
C'est la suite du cours de C. Bizouard.
- Un problème astronomique : le système de référence céleste  
... ou comment rattacher les observations depuis la Terre à un repère quasi inertiel réalisé  
par les observations VLBI de quasars...
- Les conventions et les principales banques logicielles destinées à l'utilisateur.

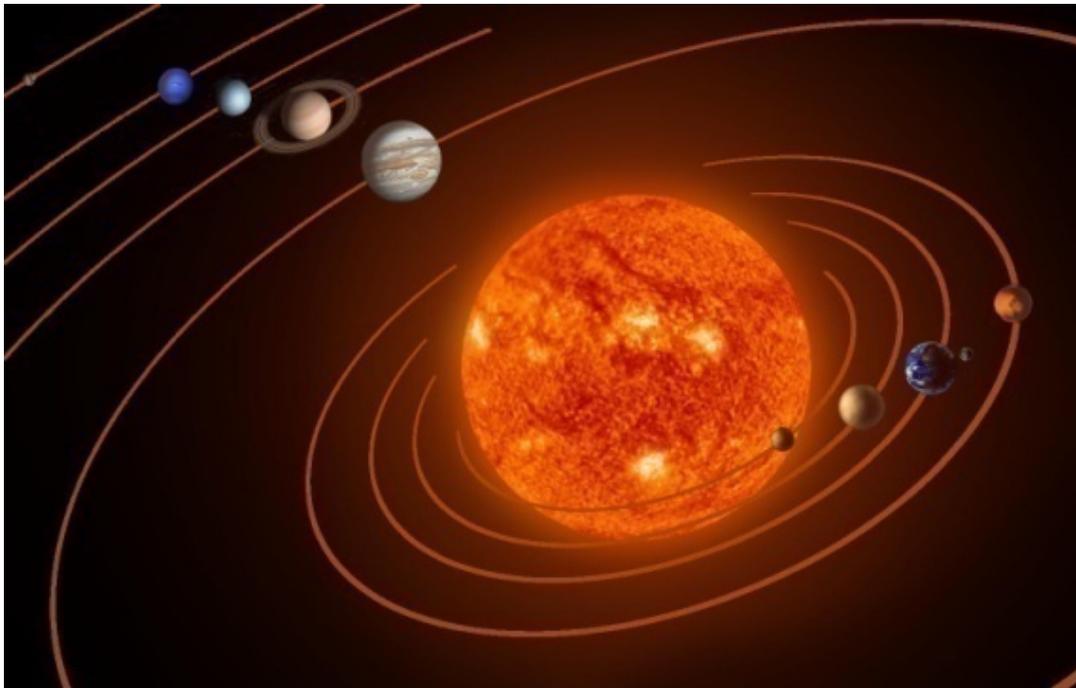
A deep space photograph of a galaxy cluster, featuring numerous galaxies of various shapes and sizes, including a prominent spiral galaxy in the lower-left corner. The background is filled with stars and distant galaxies. The text "Rotation terrestre et forçage astronomique" is overlaid in the center in a bold, yellow font.

**Rotation terrestre et forçage  
astronomique**



# Le forçage astronomique

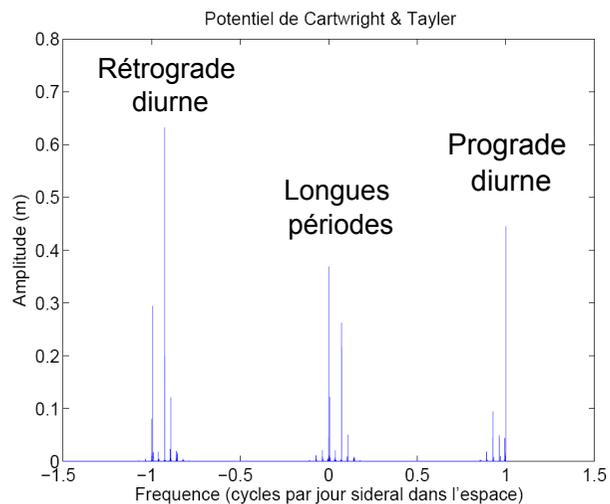
- C'est la conséquence de la gravitation lunisolaire et planétaire qui s'applique sur la forme de la Terre.



- Contributions :
  - Lune  $\sim 68\%$ ,
  - Soleil  $\sim 32\%$ ,
  - Planètes principales (Jupiter, Vénus)  $\sim 10^{-6}$ .

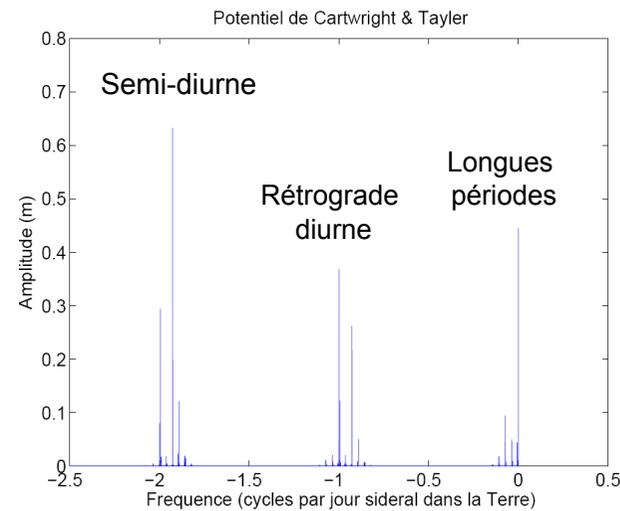
# Le forçage astronomique

- Le potentiel est périodique à un ensemble de fréquences qui sont des combinaisons entières des fréquences des éléments orbitaux des corps du système solaire.

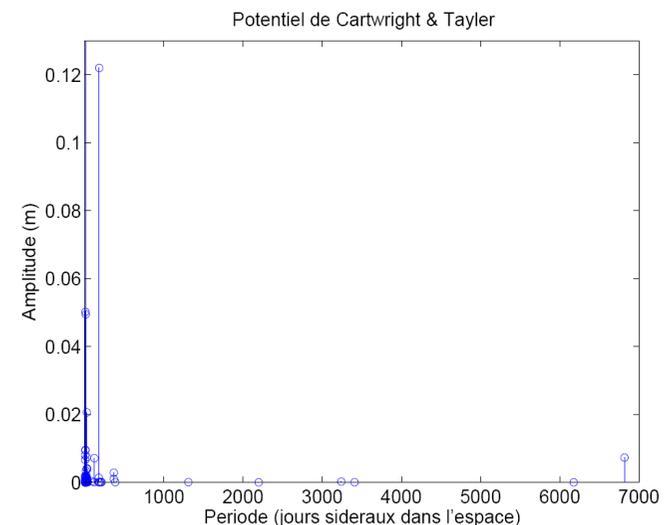


$$\sigma_{\text{Terre}} = \sigma_{\text{Espace}} - 1$$

cycle par jour

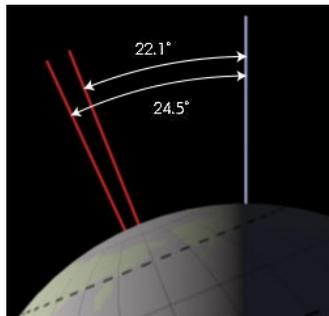
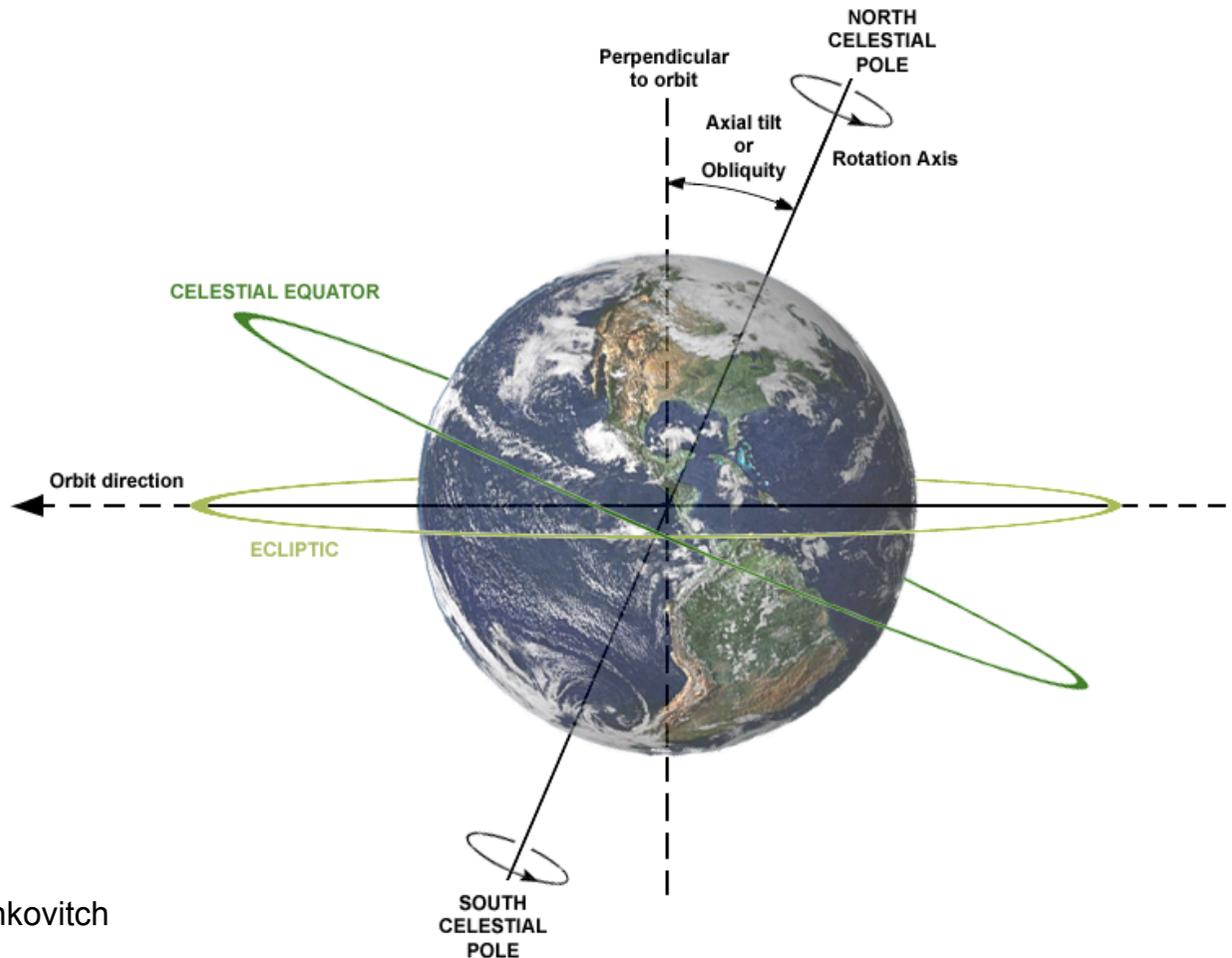
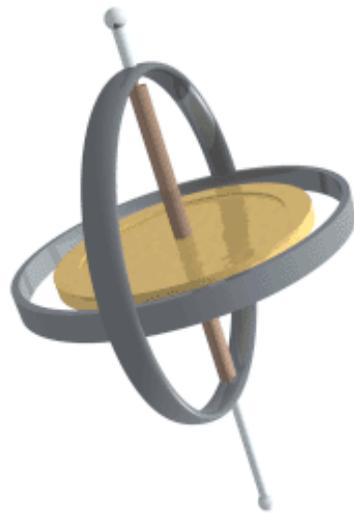


- Zoom sur la partie longue période dans l'espace :
  - Tout à gauche : les termes lunaires (13 j, 28 j),
  - Le plus gros terme à gauche est le semi-annuel,
  - On voit l'annuel, plus petit,
  - Tout à droite, le terme en 18.6 ans (mouvement du nœud de l'orbite lunaire).



# La Terre sur son orbite

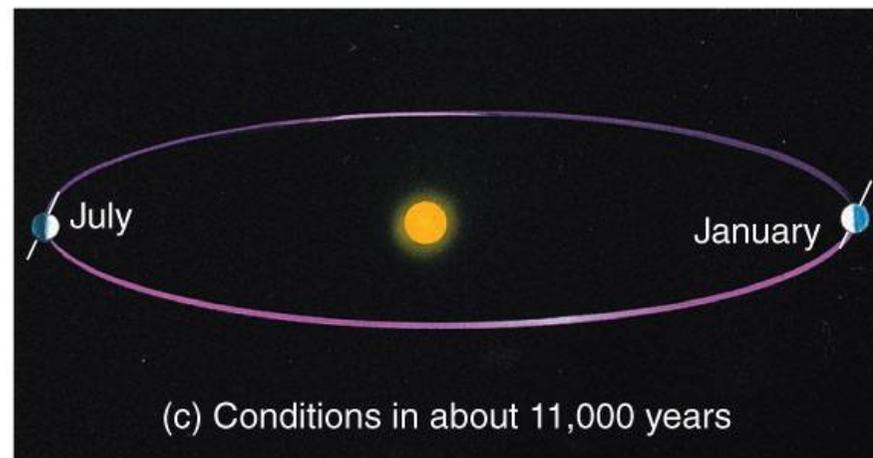
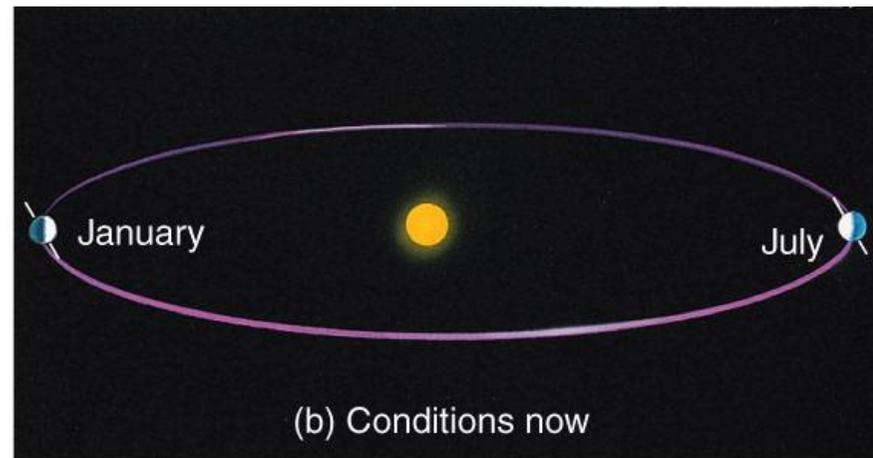
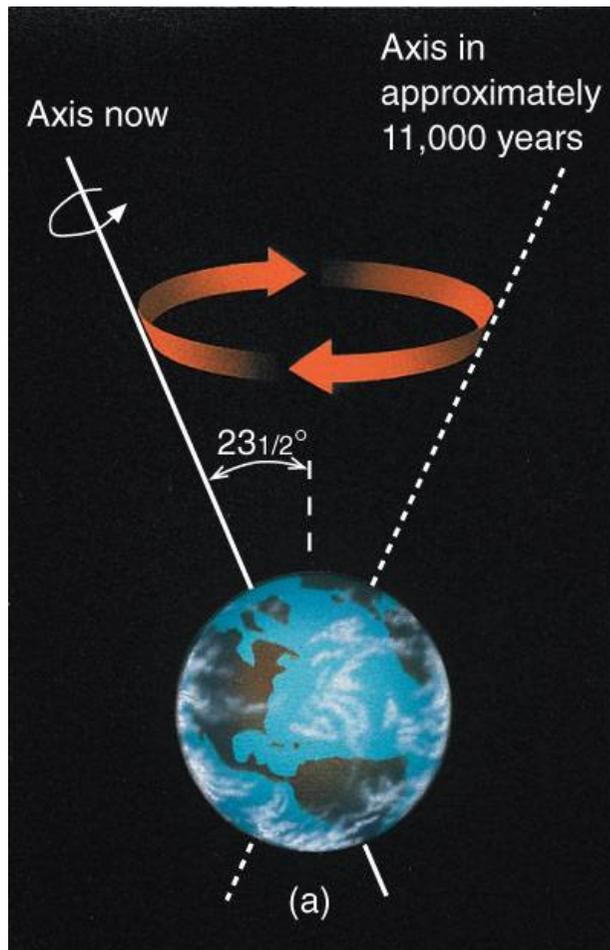
- Obliquité de l'équateur sur l'écliptique, mouvement de précession en 25800 ans (soit  $1^\circ$  en 72 ans dans le plan de l'écliptique) : résultat du couple exercé par les corps céleste sur le renflement équatorial de la Terre. Tentative d'aligner ce bourrelet dans le plan de l'écliptique.



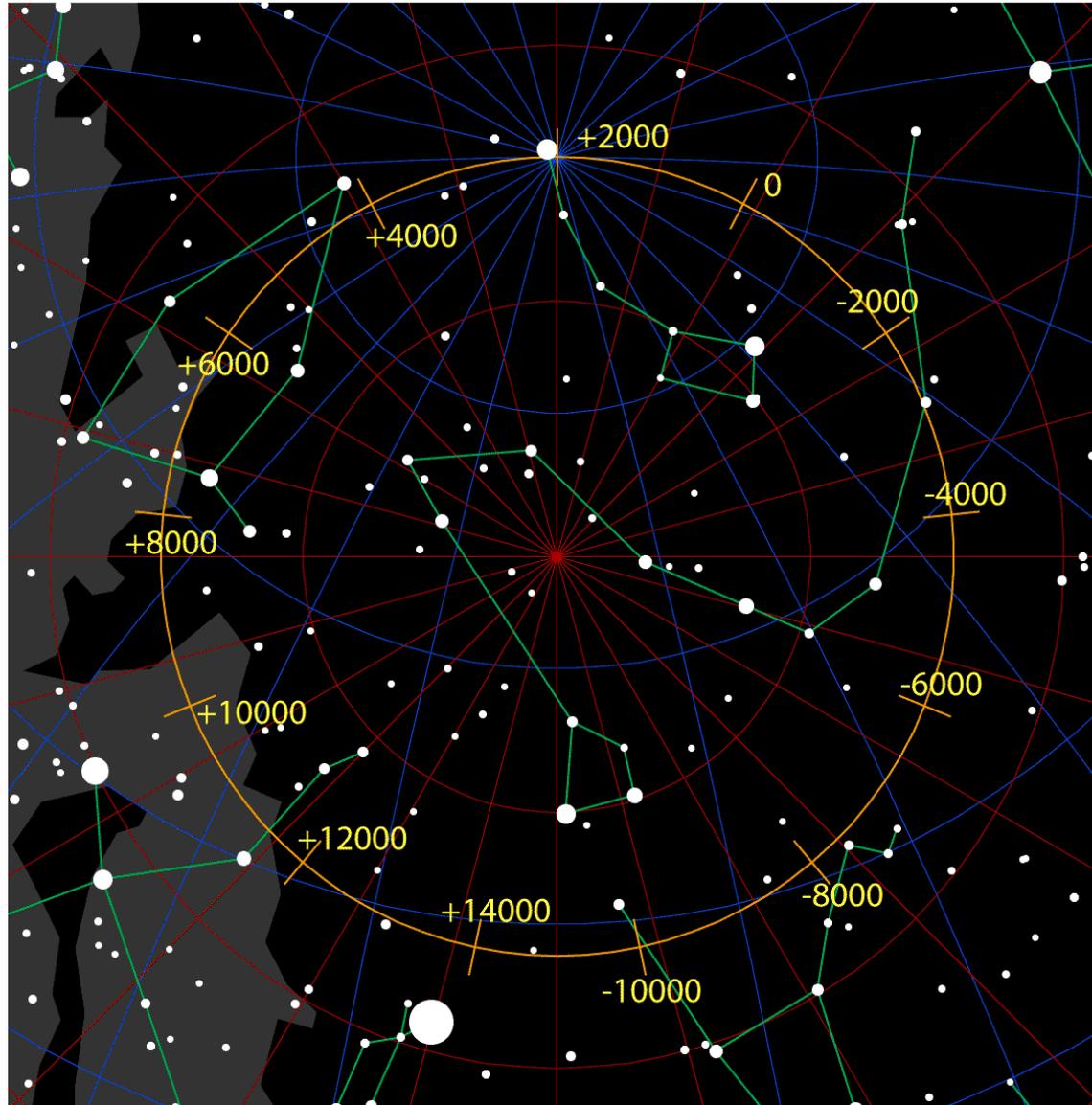
Cycles de Milankovitch en  $\sim 41000$  ans

# La Terre sur son orbite

- Alternance des saisons due à l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique :



# La Terre sur son orbite



Quand la polaire n'est plus la polaire...

# Action astronomique sur la Terre

- Potentiel sous forme générale ressenti en tout point de la Terre de coordonnées géocentriques  $(r, \theta, \lambda)$  :

$$V_{lm}(r, \theta, \lambda) = -\frac{1}{3}\Omega^2 r^2 \operatorname{Re}(\phi_{lm} Y_{lm})$$

- Le potentiel est fonction de la position relative de l'observateur et du corps perturbateur. Cette position est d'une part « terrestre » (position de l'observateur par rapport au repère terrestre), contenue dans les  $Y_{lm}$ . Et d'autre part « céleste » dans les  $\phi_{lm}$  où  $\beta$  et  $\Lambda$  sont les latitude et longitude du corps céleste perturbateur.

- Pour le degré 2 :

$$\phi_{20} = K \frac{3 \sin^2 \beta - 1}{2},$$

Zonal : longues périodes dans la Terre.

$$\tilde{\phi}_{21} = \phi_{21}^{\text{re}} + i\phi_{21}^{\text{im}} = K \sin \beta \cos \beta e^{i\Lambda},$$

Tesseral : rétrograde diurne dans la Terre.

$$\tilde{\phi}_{22} = \phi_{22}^{\text{re}} + i\phi_{22}^{\text{im}} = \frac{1}{4} K \cos^2 \beta e^{2i\Lambda},$$

Sectoriel : rétro semi diurne dans la Terre.

# Action sur la Terre

- Interaction entre les moments multipolaires du potentiel externe et de la forme de la Terre ou du géopotential (Brzezinski & Mathews 2002) :

Forme de la Terre	Potentiel externe	Nutation	Mvt du pôle	Amplitude ( $\mu\text{as}$ )
$C_{1>1,0}$	$\phi_{1>1,0}$	Longues périodes	Rétro diurne	Nutation $> 10^7$ + précession
$C_{3,1}$	$\phi_{3,0}$	Pro diurne	Longues périodes	$\sim 90$
$C_{4,1}$	$\phi_{4,0}$			$5 \mu\text{as/an}$
$C_{2,2}$	$\phi_{2,1}$	Pro semi diurne	Pro diurne	$\sim 50$
$C_{3,2}$	$\phi_{3,1}$			$< 1$
$C_{3,3}$	$\phi_{3,2}$	Pro ter diurne	Pro semi diurne	$< 1$
$C_{3,1}$	$\phi_{3,2}$	Rétro diurne	Rétro semi diurne	$< 1$
$C_{3,2}$	$\phi_{3,3}$	Rétro semi diurne	Rétro ter diurne	$< 1$



$$\sigma_{MP} = \sigma_{nut} - 1 \text{ cycle par jour}$$

## Action sur la Terre

- Couple sur la Terre de densité  $\rho$  :

$$\vec{\Gamma} = - \int \vec{r} \times \vec{\nabla} V \rho dv,$$

- Dynamique de la Terre soumise à un tel couple : variation du moment cinétique (équation fondamentale pour l'étude de la rotation terrestre) :

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{\Gamma},$$

Dans l'espace

$$\frac{d\vec{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H} = \vec{\Gamma}.$$

Dans la Terre

où  $\vec{\omega}$  est le vecteur instantané de rotation de la Terre.

# Terre avec manteau et noyau

- Point de départ : équations du moment cinétique pour la Terre entière et le noyau (f) sur lesquels on applique des couples :

$$\frac{d\vec{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H} = \vec{\Gamma},$$

$$\frac{d\vec{H}_f}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H}_f = \vec{\Gamma}_f + \vec{K},$$

Couple d'interaction entre  
manteau et noyau

Couple externe exercé sur  
le noyau

## Terre avec manteau et noyau

- Le vecteur de rotation terrestre est une perturbation du vecteur de rotation uniforme (les  $m_i$  sont  $\sim 10^{-6}$ ). Le noyau tourne relativement au manteau.

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ 1 + m_3 \end{pmatrix}, \quad \vec{\omega}_f = \begin{pmatrix} m_{1,f} \\ m_{2,f} \\ m_{3,f} \end{pmatrix},$$

- Terre et noyau sont des ellipsoïdes perturbés :

$$\bar{I} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}, \quad \bar{I}_f = \begin{pmatrix} A_f & 0 & 0 \\ 0 & A_f & 0 \\ 0 & 0 & C_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11,f} & c_{12,f} & c_{13,f} \\ c_{21,f} & c_{22,f} & c_{23,f} \\ c_{31,f} & c_{32,f} & c_{33,f} \end{pmatrix},$$

- Les moments cinétiques de la Terre et du noyau sont :

$$\vec{H} = \bar{I}\vec{\omega}, \quad \vec{H}_f = \bar{I}_f\vec{\omega} + \vec{h}_f,$$

avec le moment cinétique relatif  $\vec{h}_f = \begin{pmatrix} A_f & 0 & 0 \\ 0 & A_f & 0 \\ 0 & 0 & C_f \end{pmatrix} \vec{\omega}_f,$

## Terre avec manteau et noyau

- En développant les équations pour le moment cinétique au premier ordre pour la composante équatoriale du vecteur de rotation, on obtient un système d'équations linéaires (équations d'Euler-Liouville) :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{m}} - ie\Omega\tilde{m} + \frac{\dot{\tilde{c}} + i\Omega\tilde{c}}{A} + \frac{A_f}{A}(\dot{\tilde{m}}_f + i\Omega\tilde{m}_f) &= \frac{\tilde{\Gamma}}{A\Omega}, \\ \dot{\tilde{m}} - ie_f\Omega\tilde{m} + \frac{\dot{\tilde{c}}_f + i\Omega\tilde{c}_f}{A_f} + \dot{\tilde{m}}_f + i\Omega\tilde{m}_f &= \frac{\tilde{\Gamma}_f + \tilde{K}}{A_f\Omega}, \end{aligned}$$

avec les notations complexes :

$$\tilde{m} = m_1 + im_2, \quad \tilde{\Gamma} = \Gamma_1 + i\Gamma_2, \quad \tilde{c} = c_{13} + ic_{23}$$

- Ce système prend en compte l'action directe du potentiel sur la forme statique de la Terre et l'effet inertiel des déformations.

## Terre avec manteau et noyau

- Les couples externes dérivent du potentiel de gravitation du système solaire :

$$\tilde{\Gamma} = -iAe\Omega^2\tilde{\phi},$$

$$\tilde{\Gamma}_f = -iA_f e_f \Omega^2 \tilde{\phi}.$$

- Les déformations sont produites par l'effet direct du potentiel externe, et des potentiels centrifuges résultants des mouvements (« wobbles ») de la Terre entière ( $m$ ) et du noyau ( $m_f$ ) (relations de Sasao et al. 1980) :

$$\tilde{c} = -A[\kappa(\tilde{\phi} - \tilde{m}) - \xi\tilde{m}_f],$$

$$\tilde{c}_f = -A_f[\gamma(\tilde{\phi} - \tilde{m}) - \beta\tilde{m}_f].$$

- Les  $\kappa$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$ ,  $\beta$  sont des « compliances » (admittances) proportionnelles aux nombres de Love adéquats exprimant la déformation sous l'effet d'un potentiel (gravitationnel ou centrifuge).

## Terre avec manteau et noyau

- La vitesse du fluide dans le noyau est la somme d'une rotation rigide et d'une vitesse additionnelle d'un ordre de grandeur en dessous :

$$\vec{v}_f = \vec{\omega}_f \times \vec{r} + \vec{v}$$

- La vitesse additionnelle exprime le fait que le champ de vitesse proche de l'interface est, en général, non tangentiel, de part la non sphéricité de cette interface. Les incréments de vitesse additionnelle causés par les déformations de la CMB sont d'une magnitude  $m$  plus petits que la vitesse totale.
- Le fluide du noyau subit :
  - La force de pression,
  - La gravitation due aux masses du manteau et des corps extérieurs à la Terre,
  - Les forces fictives (Coriolis, centrifuge),
  - Les forces de friction,
  - La force de Lorentz.
- Dans l'approximation  $v \ll v_f$  et lorsqu'on suppose le noyau homogène non visqueux (pas de friction), incompressible (pas de terme de divergence de la vitesse), et qu'on néglige les forces de Lorentz, on peut montrer que (Sasao et al. 1980) :

$$\tilde{K} = -iA_f e_f \Omega^2 (\tilde{m} + \tilde{m}_f) - \tilde{\Gamma}_f + i\Omega^2 \tilde{c}_f$$

## Terre avec manteau et noyau

- On obtient finalement les équations de la dynamique suivantes, régissant les mouvements de la Terre entière et du noyau :

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H} &= \vec{\Gamma}, \\ \frac{d\vec{H}_f}{dt} - \vec{\omega}_f \times \vec{H}_f &= 0,\end{aligned}$$

- Ou bien :

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{m}} - ie\Omega\tilde{m} + \frac{\dot{\tilde{c}} + i\Omega\tilde{c}}{A} + \frac{A_f}{A}(\dot{\tilde{m}}_f + i\Omega\tilde{m}_f) &= -ie\Omega\tilde{\phi}, \\ \dot{\tilde{m}} + \dot{\tilde{m}}_f + i(1 + e_f)\Omega\tilde{m}_f + \frac{\dot{\tilde{c}}_f}{A_f} &= 0.\end{aligned}$$

- On rappelle que l'on ici a exclu l'effet du potentiel de gravitation sur la redistribution des masses que l'on traitera plus loin.

## Terre avec manteau et noyau

- Résolution du système linéaire dans l'espace des fréquences, on obtient une solution sous la forme :

$$\begin{aligned}\tilde{m}(\sigma) &= \tilde{T}(\sigma)\tilde{\phi}(\sigma), \\ \tilde{m}_f(\sigma) &= \tilde{T}_f(\sigma)\tilde{\phi}(\sigma),\end{aligned}$$

où

$$\begin{aligned}\tilde{T}(\sigma) &= \kappa - \frac{A_f}{A}\gamma - \frac{A_m}{A}\frac{\sigma_{CW}}{\sigma - \sigma_{CW}} + \frac{A_f}{A}(e - \gamma)\frac{\sigma'_{NDFW}}{\sigma - \sigma_{NDFW}}, \\ \tilde{T}_f(\sigma) &= \kappa - \gamma - \frac{A_m}{A}\frac{\sigma_{CW}^2/\Omega}{\sigma - \sigma_{CW}} - (e - \gamma)\frac{\Omega}{\sigma - \sigma_{NDFW}}.\end{aligned}$$

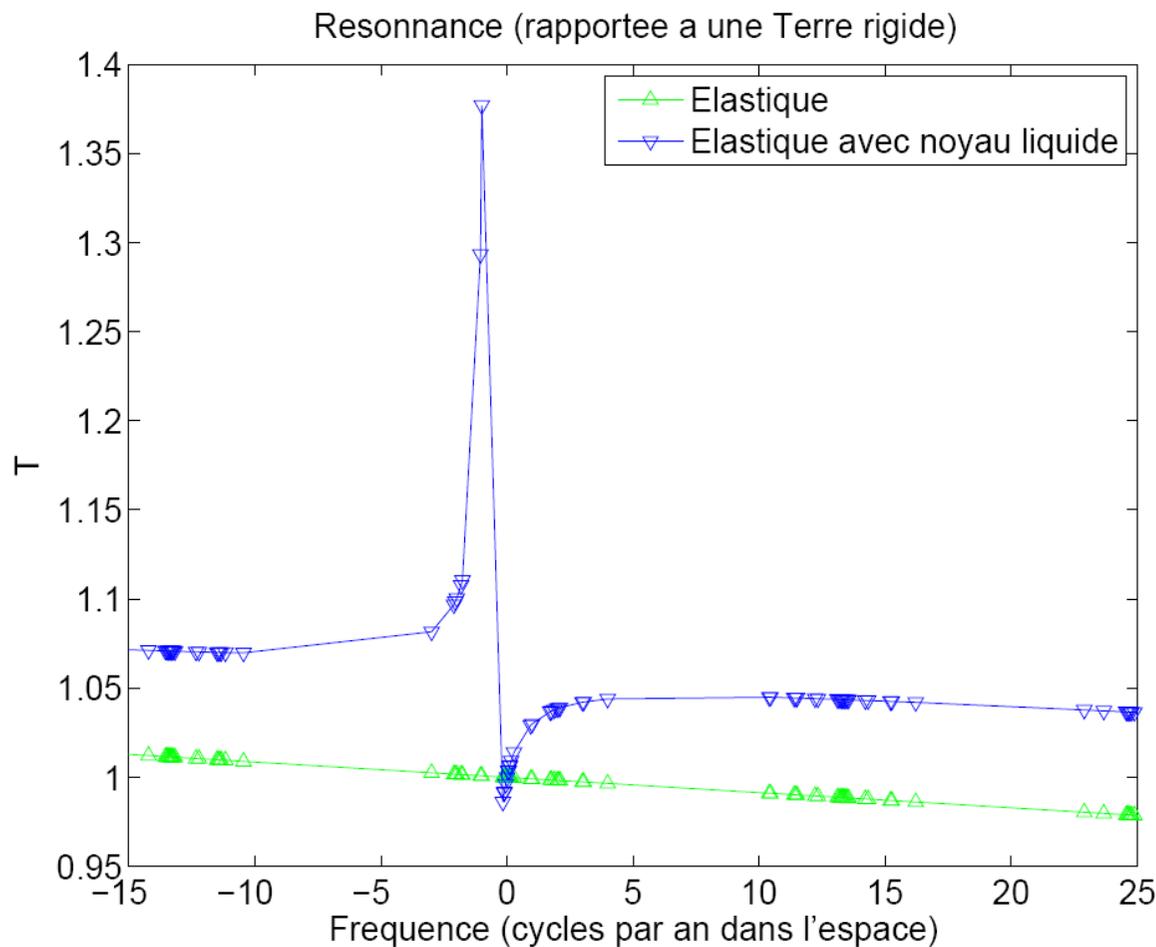
et

$$\begin{aligned}\sigma_{CW} &= \Omega\frac{A}{A_m}(e - \kappa), \\ \sigma_{NDFW} &= -\Omega - \Omega\frac{A}{A_m}(e_f - \beta),\end{aligned}$$

- Les valeurs de ces fréquences propres du système, obtenues avec PREM, sont :
  - CW : Chandler wobble, manteau, ~400 jours dans la Terre (sans océans !!!),
  - NDFW : nearly diurnal free wobble (free core nutation), ~458 jours rétrograde dans l'espace.

# Terre avec manteau et noyau

- Résonance causée par l'élasticité et le noyau fluide :



Facteur d'échelle rapporté à l'amplitude « rigide ».



L'élasticité amplifie très peu les amplitudes pour les ondes dont les fréquences sont proches du rétro diurne.

La présence d'un noyau fluide amplifie les amplitudes : d'une part à cause d'un facteur  $A_f/A$  qui représente le « vide » du noyau dans la Terre, d'autre part par résonance pour les ondes dont les fréquences sont proches de la résonance à -0.84 cycles par an (-432 jours) dans l'espace.

# Terre avec manteau et noyau

- Le wobble de la Terre en réponse à une excitation du potentiel de marée est donc plus ou moins grand suivant si :
  - L'amplitude du potentiel est grande (e.g., termes lunaires mensuels),
  - La fonction de transfert T est amplificatrice (i.e., si on est à une fréquence proche d'une résonance),
  - Suivant la fréquence : le wobble est solution d'une équation du premier ordre → division par la fréquence lors de l'intégration (e.g., 18.6 ans).
- Cette forme résonnante est à comparer à celle relative à la Terre rigide sans noyau qui bat à la fréquence d'Euler (période de 305 jours dans la Terre) :

$$\tilde{m}_R(\sigma) = -\frac{e_R \Omega}{\sigma - e_R \Omega} \tilde{\phi}(\sigma),$$

- Il existe des mouvements libres associés à chaque résonances :
  - Mouvement libre de Chandler dans le mouvement du pôle, qui est la principale périodicité observée,
  - Mouvement libre du noyau (free core nutation), observée dans la nutation par VLBI (cette observation est une preuve non sismique et non gravimétrique de l'existence du noyau).

# Terre avec manteau, noyau dissipatif, graine et forces de Lorentz

- Equation supplémentaire pour la graine (solid inner core), et couples de friction  $T_f$  et  $T_s$ , respectivement à la CMB et à l'ICB (Mathews et al. 1991) :

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H} &= \vec{\Gamma}, \\ \frac{d\vec{H}_f}{dt} - \vec{\omega}_f \times \vec{H}_f &= \vec{T}_f, \\ \frac{d\vec{H}_s}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{H}_s &= \vec{\Gamma}_s + \vec{T}_s,\end{aligned}$$

- Buffet et al. (1992) :

$$\begin{aligned}\tilde{T}_f &= i\Omega^2 A_f \tilde{m}_f K_{\text{CMB}}, \\ \tilde{T}_s &= i\Omega^2 A_s (\tilde{m}_s - \tilde{m}_f) K_{\text{ICB}}.\end{aligned}$$

- Déformations : Sasao et al. (1980) étendu

$$\begin{aligned}\tilde{c} &= -A[\kappa(\tilde{\phi} - \tilde{m}) - \xi\tilde{m}_f - \zeta\tilde{m}_s], \\ \tilde{c}_f &= -A_f[\gamma(\tilde{\phi} - \tilde{m}) - \beta\tilde{m}_f - \delta\tilde{m}_s], \\ \tilde{c}_s &= -A_s[\theta(\tilde{\phi} - \tilde{m}) - \chi\tilde{m}_f - \nu\tilde{m}_s].\end{aligned}$$

# Terre avec manteau, noyau dissipatif, graine et forces de Lorentz

- Pour une Terre avec graine : apparition de 2 fréquences de résonance liées à la graine :
  - La free inner core nutation (FICN), presque diurne, analogue de la FCN,
  - L'inner core wobble (ICW) qui est un basculement de la graine par rapport au manteau (donc dans la bande de fréquence du Chandler wobble,
  - Les mouvements libres associés à la FICN et à l'ICW ne sont pas observés à l'heure actuelle.
- Les expressions théoriques des fréquences de résonance du noyau et de la graine deviennent (Mathews et al. 1991, 2002) :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{NDFW}} &= -\Omega - \Omega \left( 1 + \frac{A_f}{A_m} \right) \left( e_f - \beta + K_{\text{CMB}} + \frac{A_s}{A_f} K_{\text{ICB}} \right), \\ \sigma_{\text{FICN}} &= -\Omega - \Omega \left( 1 + \frac{A_s}{A_m} \right) (\alpha_2 e_s + \nu - K_{\text{ICB}}), \\ \sigma_{\text{ICW}} &= \Omega(1 - \alpha_2) e_s.\end{aligned}$$

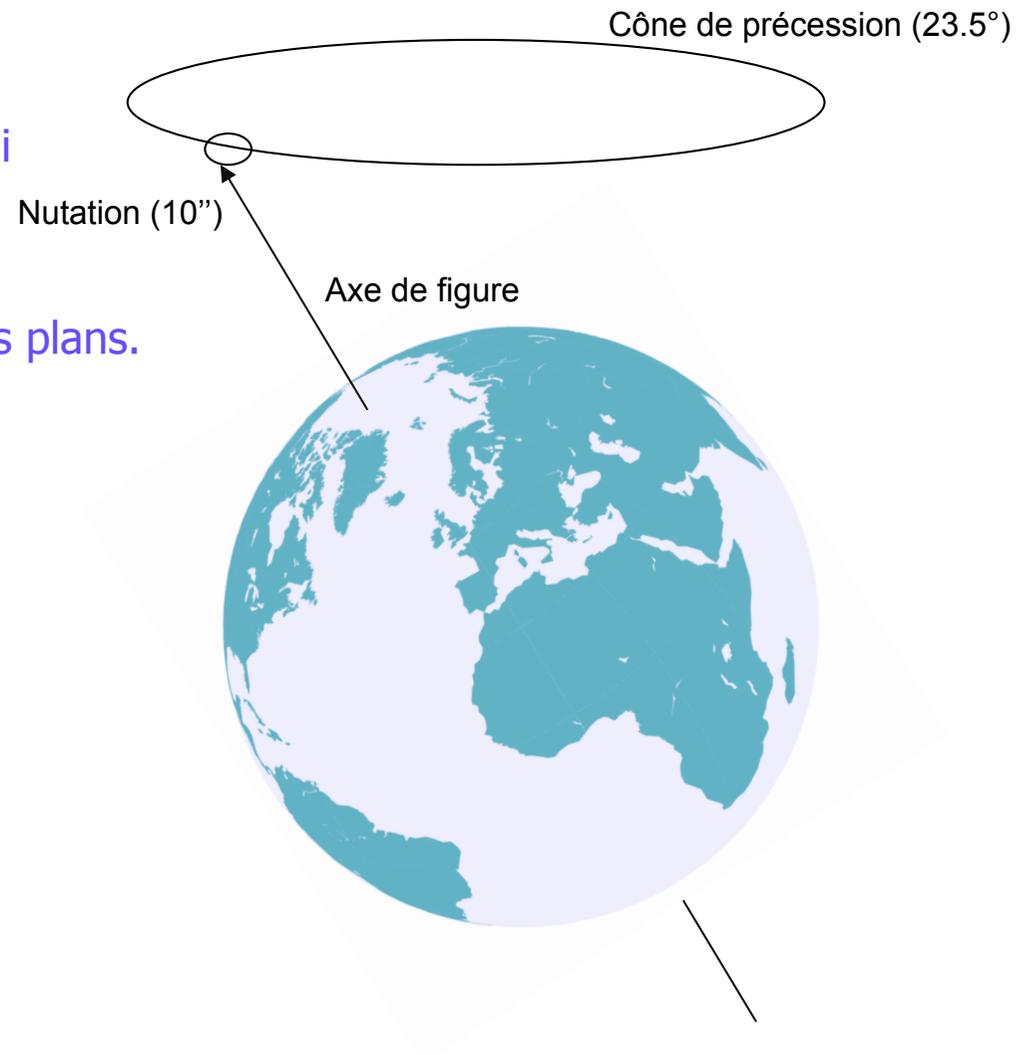
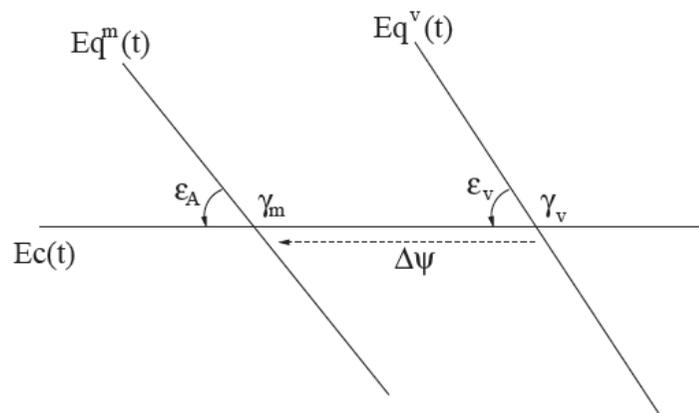
- Valeurs théoriques des fréquences obtenues avec PREM :
  - FICN = 477 jours dans l'espace,
  - ICW = 2413 jours dans la Terre.

# Passage aux angles de nutations

- Nutation (mouvement de l'axe de figure de la Terre dans l'espace) :

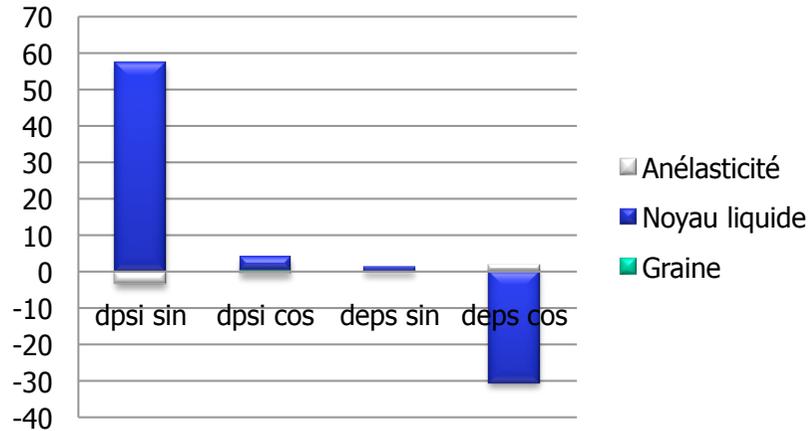
$$\tilde{\eta}(\sigma) = \Delta\epsilon(\sigma) - i\Delta\psi(\sigma) \sin \epsilon_0 = -\frac{\tilde{m}(\sigma)}{\sigma'}$$

- $\Delta\psi$  = distance entre équateur vrai et équateur moyen le long de l'écliptique,
- $\Delta\epsilon$  = angle entre ces deux mêmes plans.

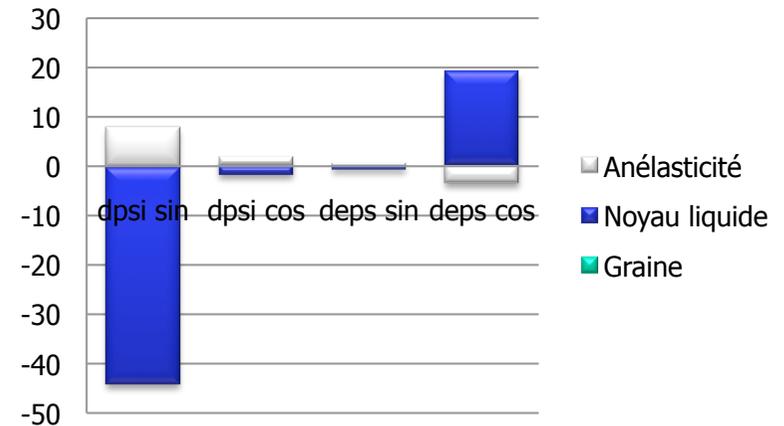


# Idée des contributions respectives : écarts à la Terre rigide

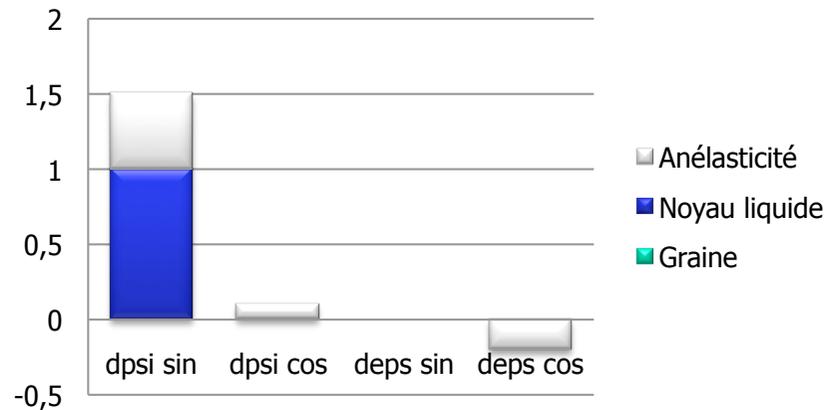
**-18.6 ans ~ 10''**



**Semi-annuel prograde ~ 1''**



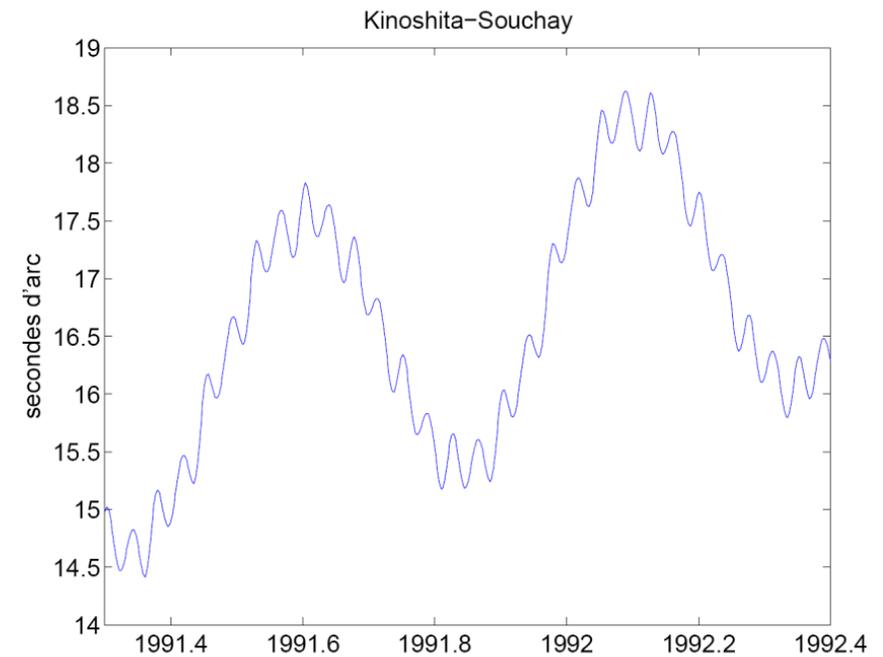
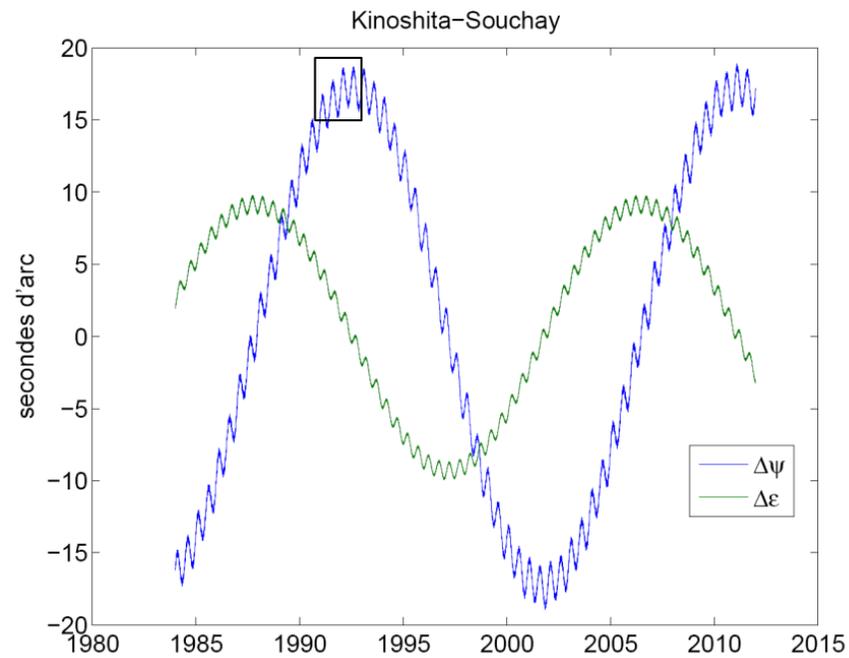
**Tri-annuel prograde ~ 50 mas**



Contribution de la graine reste < 0.5 mas

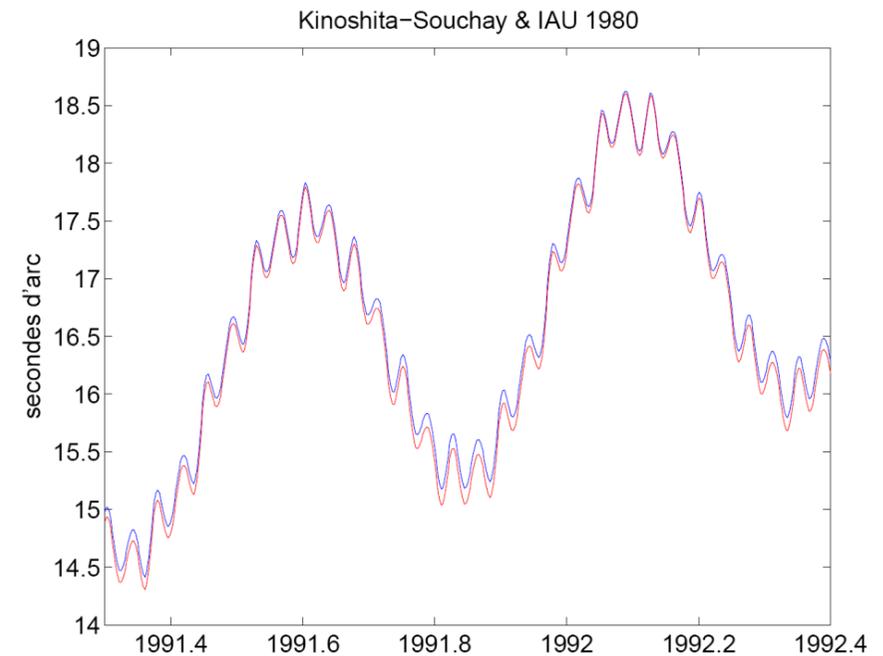
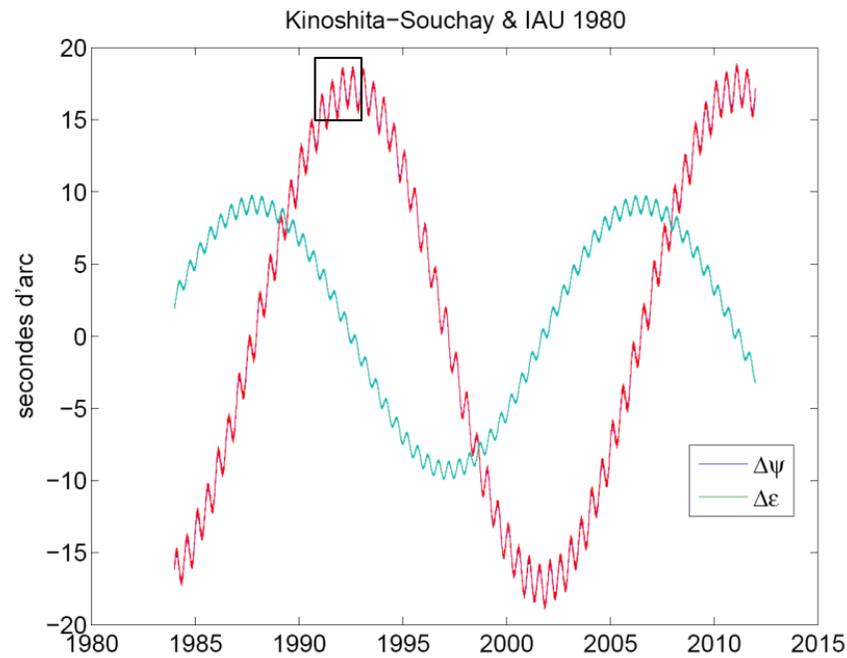
# Nutation pour la Terre rigide

- Souchay et al. (1997), terre rigide



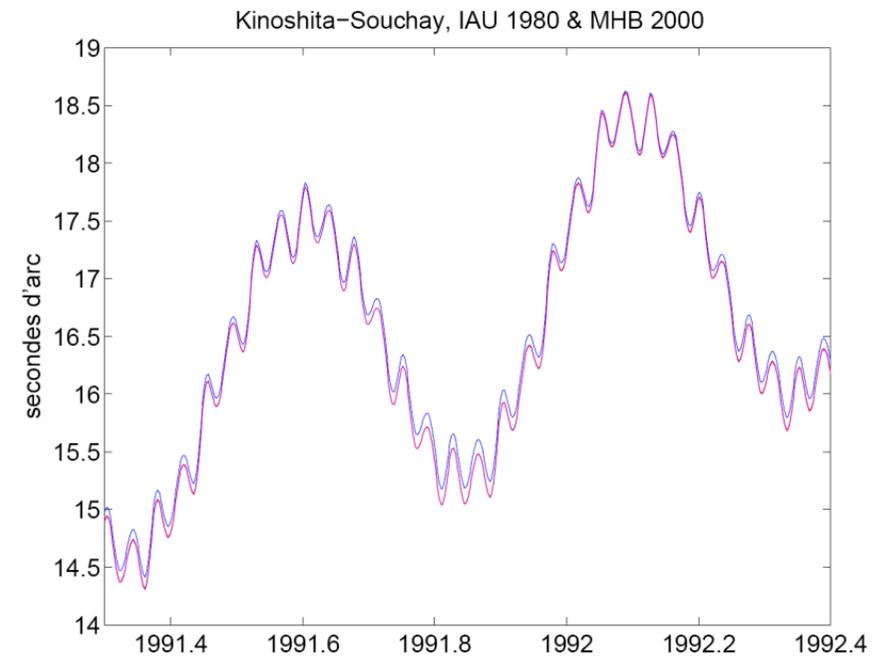
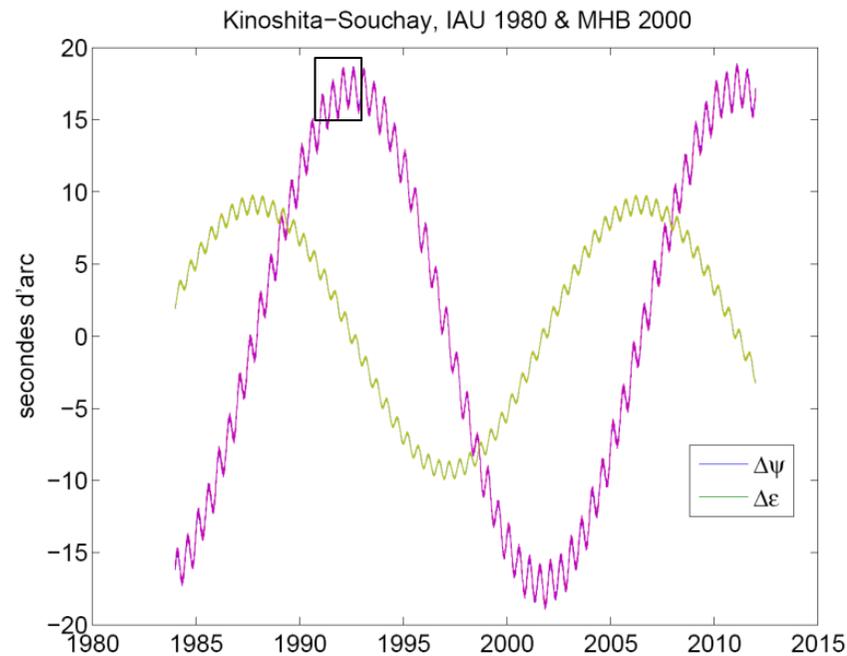
# Nutation pour une Terre non rigide

- IAU 1980 (Wahr 1980), terre non rigide avec noyau liquide



# Nutation pour une Terre non rigide

- MHB 2000 : Terre non rigide avec noyau liquide, graine solide et océans

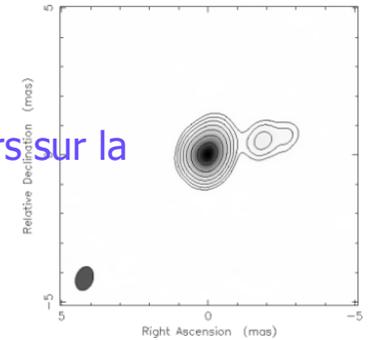
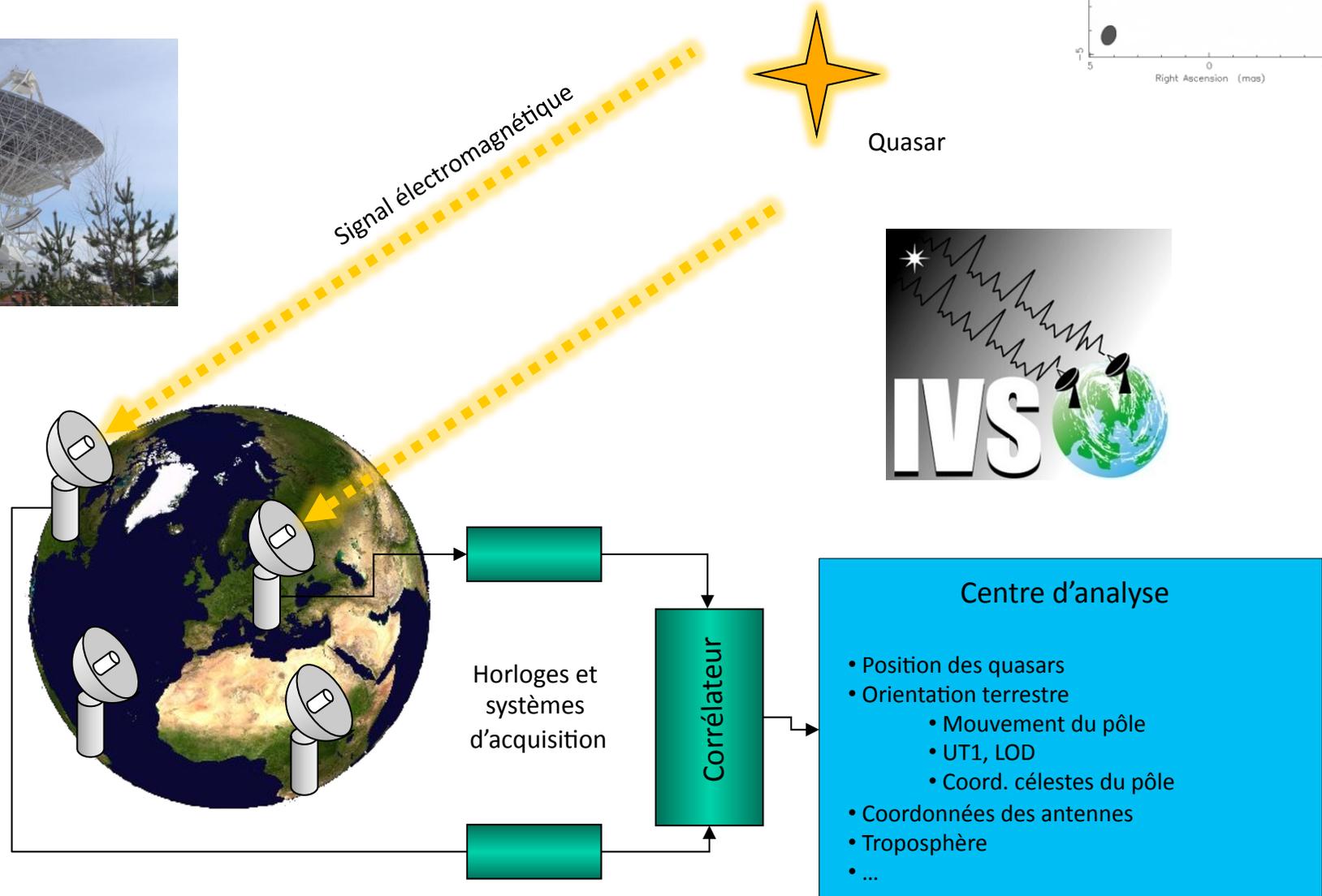


# Le modèle MHB 2000

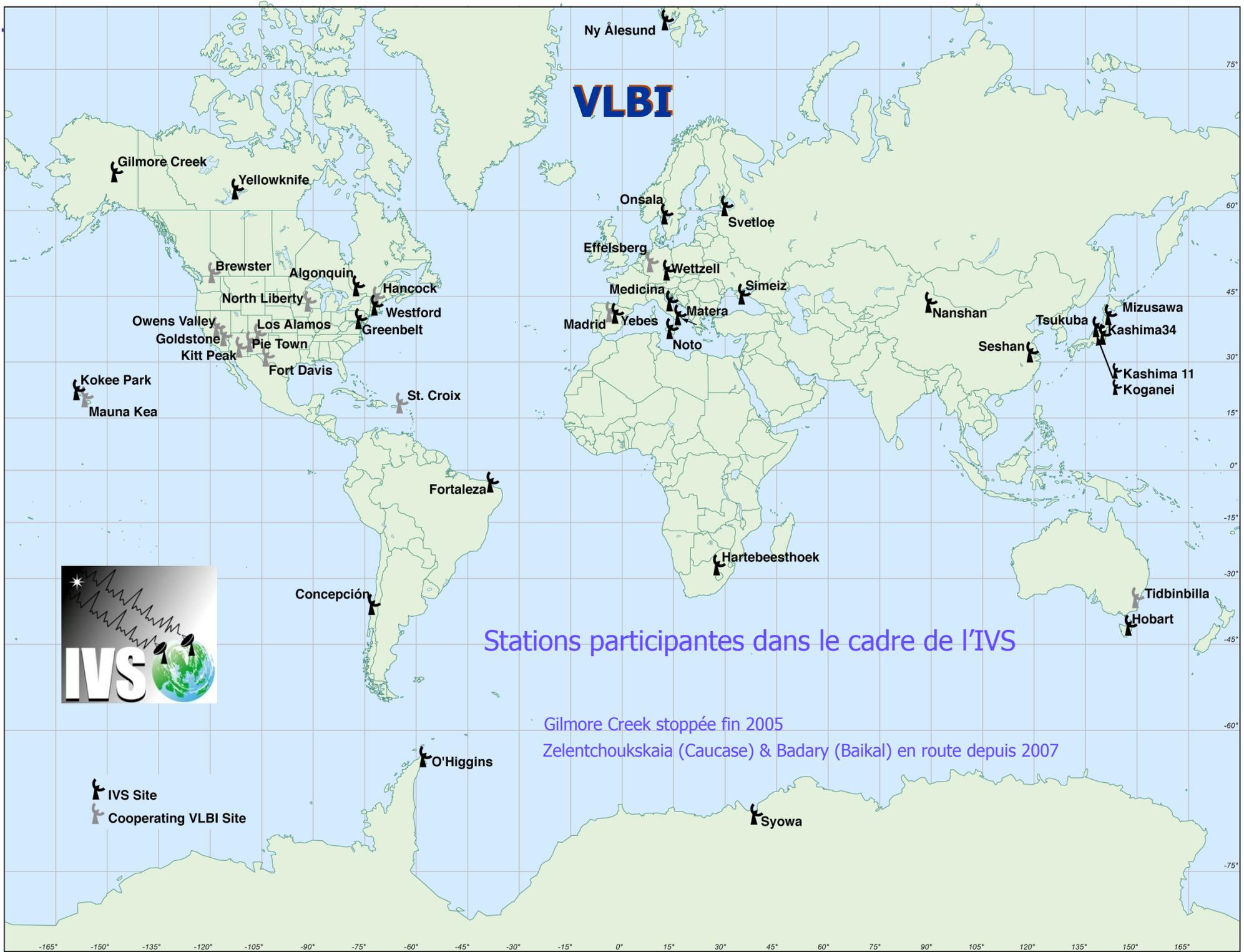
- P.M. Mathews (Chennai), T.A. Herring (MIT), B.A. Buffett (UBC, Vancouver).
- Terre anélastique à noyau liquide, graine et océans.
- Résolution d'un système d'équations linéarisées exprimant les coordonnées de l'axe de figure en fonction du potentiel externe et d'un petit nombre de paramètres géophysiques.
- Choix des paramètres géophysiques à ajuster :
  - On ne peut pas tout estimer ni TROP en estimer,
  - Ils ont choisi :
    - $e$  : aplatissement global,
    - $e_f$  : aplatissement du noyau,
    - $\kappa$  : valeur nominale de la compliance exprimant la redistribution de masse en surface sous l'action du potentiel ( $= ek/k_s$ ),
    - $\gamma$  : idem mais à la CMB,
    - $\text{Im } K_{\text{CMB}}$  : couplage EM à la CMB,
    - $\text{Re } K_{\text{ICB}}$  : couplage EM à l'ICB,
    - $\text{Im } K_{\text{ICB}}$  : couplage EM à l'ICB.
- Autres paramètres fixés aux valeurs de PREM.
- Etape suivante : ajustement aux observations VLBI.

# VLBI

- Rattacher le maillage des stations sur la croûte terrestre au maillage des quasars sur la voûte céleste → rattacher les observations au sol à un repère inertiel.



# VLBI



-  IVS Site
-  Cooperating VLBI Site

## Stations participantes dans le cadre de l'IVS

Gilmore Creek stoppée fin 2005  
Zelentchoukskaia (Caucase) & Badary (Baikal) en route depuis 2007

Gilmore Creek

Yellowknife

Brewster

Algonquin

Hancock

North Liberty

Owens Valley

Los Alamos

Westford

Goldstone

Pie Town

Greenbelt

Kokee Park

Mauna Kea

Fort Davis

St. Croix

Fortaleza

Concepción

O'Higgins

Ny Ålesund

Onsala

Svetloe

Effelsberg

Wetzell

Simeiz

Medicina

Madrid

Yebes

Matera

Noto

Nanshan

Tsukuba

Mizusawa

Kashima34

Kashima 11

Koganei

Seshan

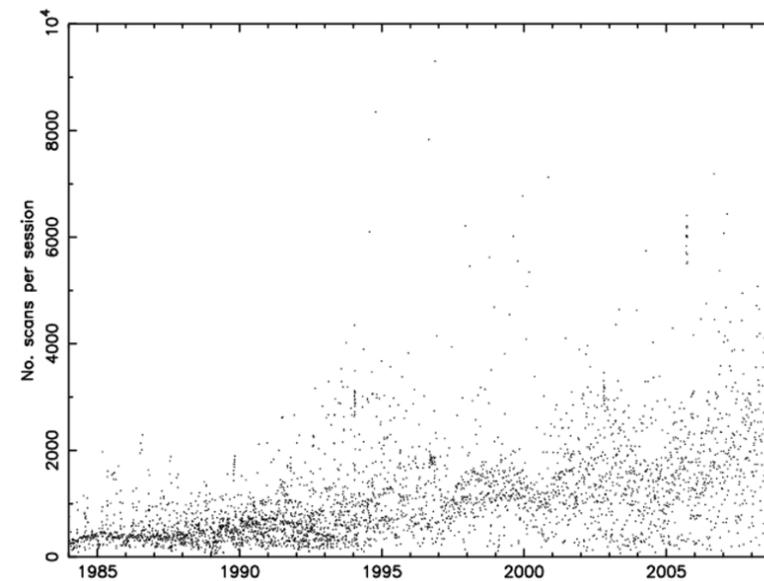
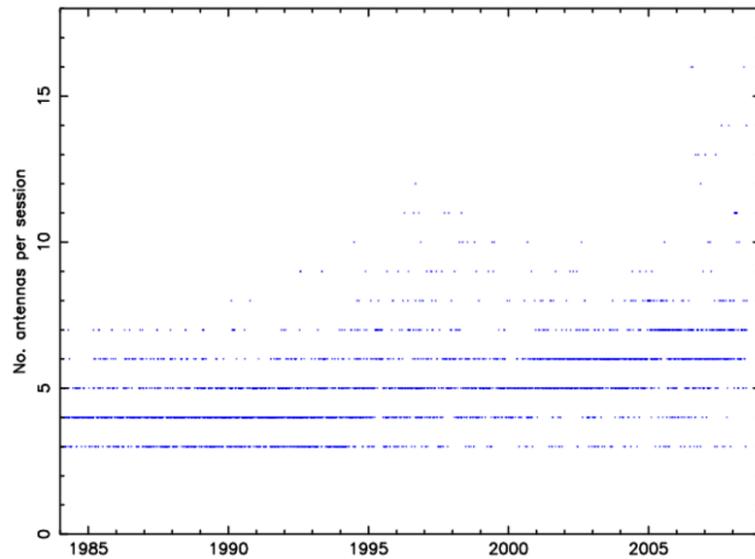
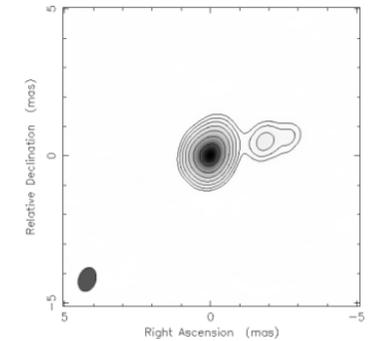
Tidbinbilla

Hobart

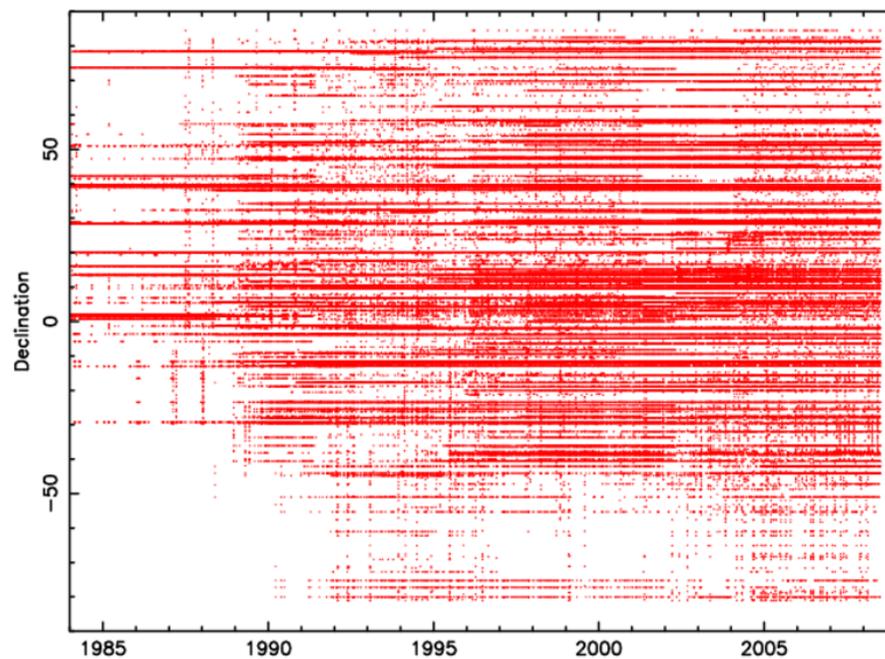
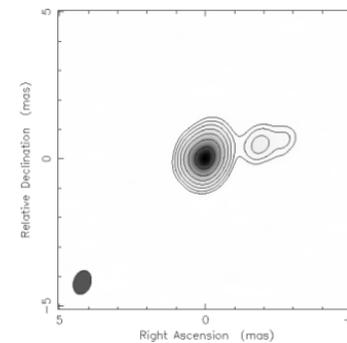
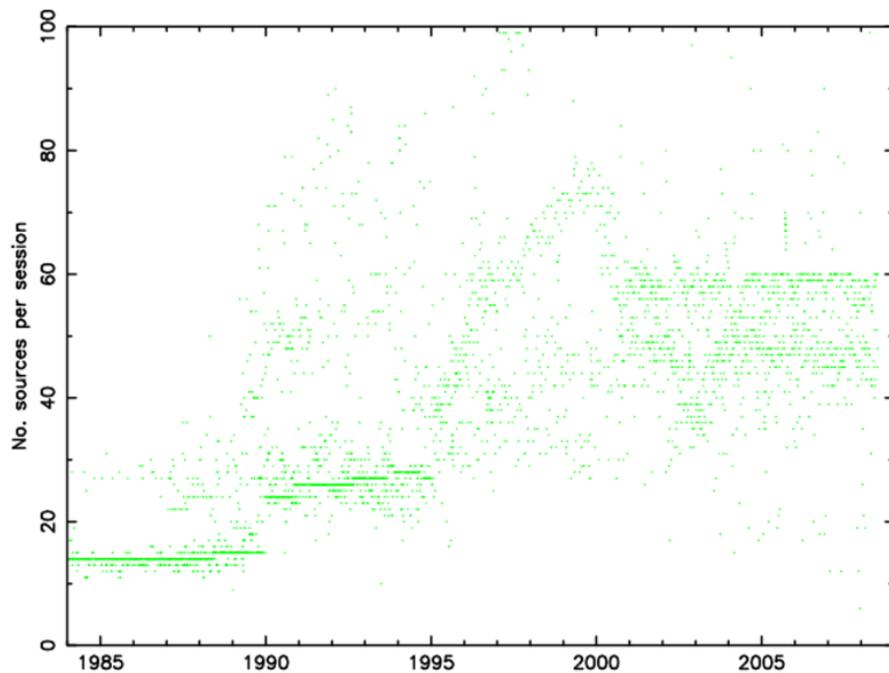
Syowa

# VLBI

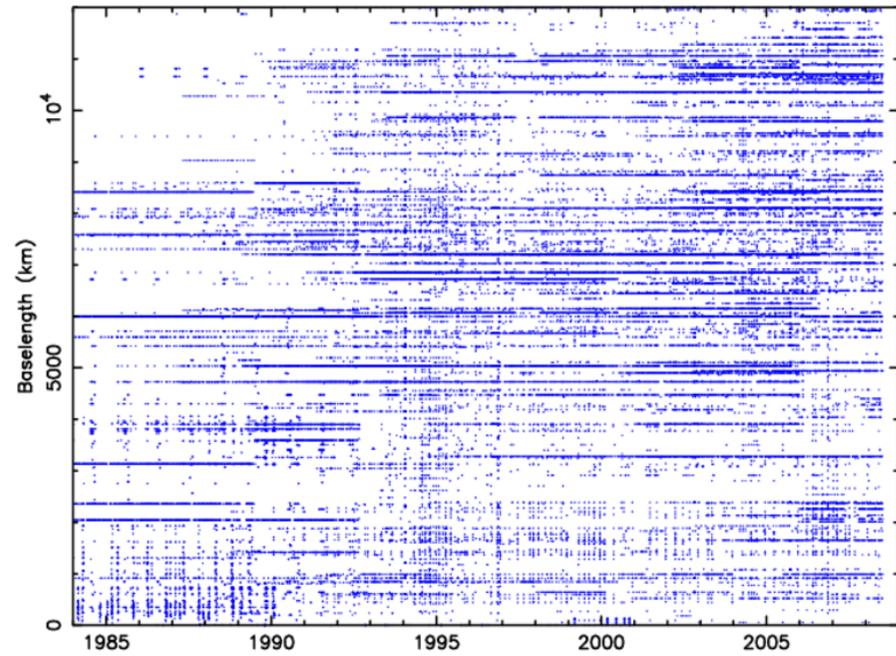
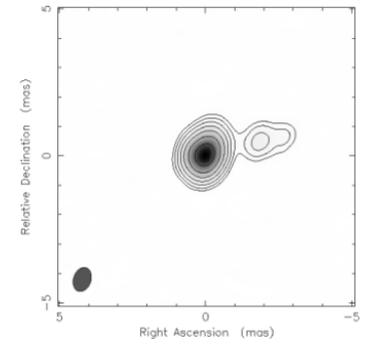
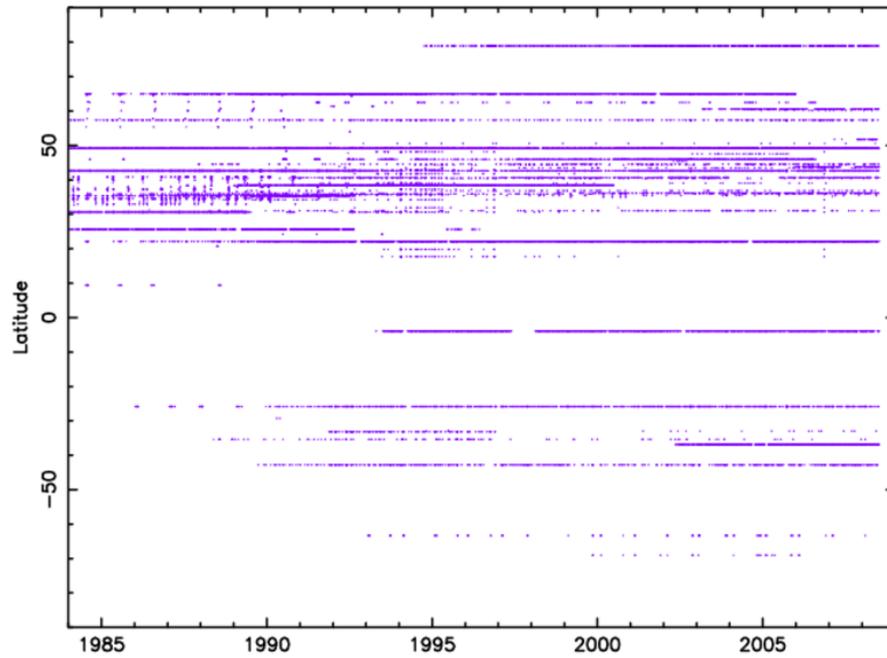
- Performances du VLBI :
  - Réseaux de 6 à 12 antennes observant pendant 24 h,
  - Une session tous les 3 jours en moyenne,
  - Aujourd’hui, nombre total d’observations > 5 millions (1979 – 2008),
  - Précision (répétabilité)  $\sim 6 \text{ mm} \sim 0.2 \text{ mas} \sim 20 \text{ ps}$ ,
  - Donne les 5 paramètres d’orientation terrestre, et les systèmes céleste et terrestre.



# VLBI

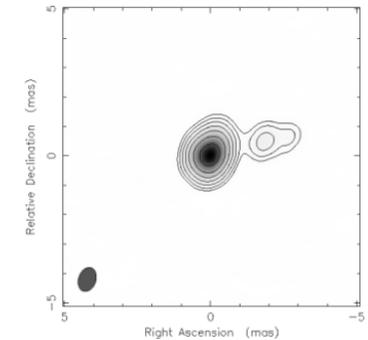


# VLBI

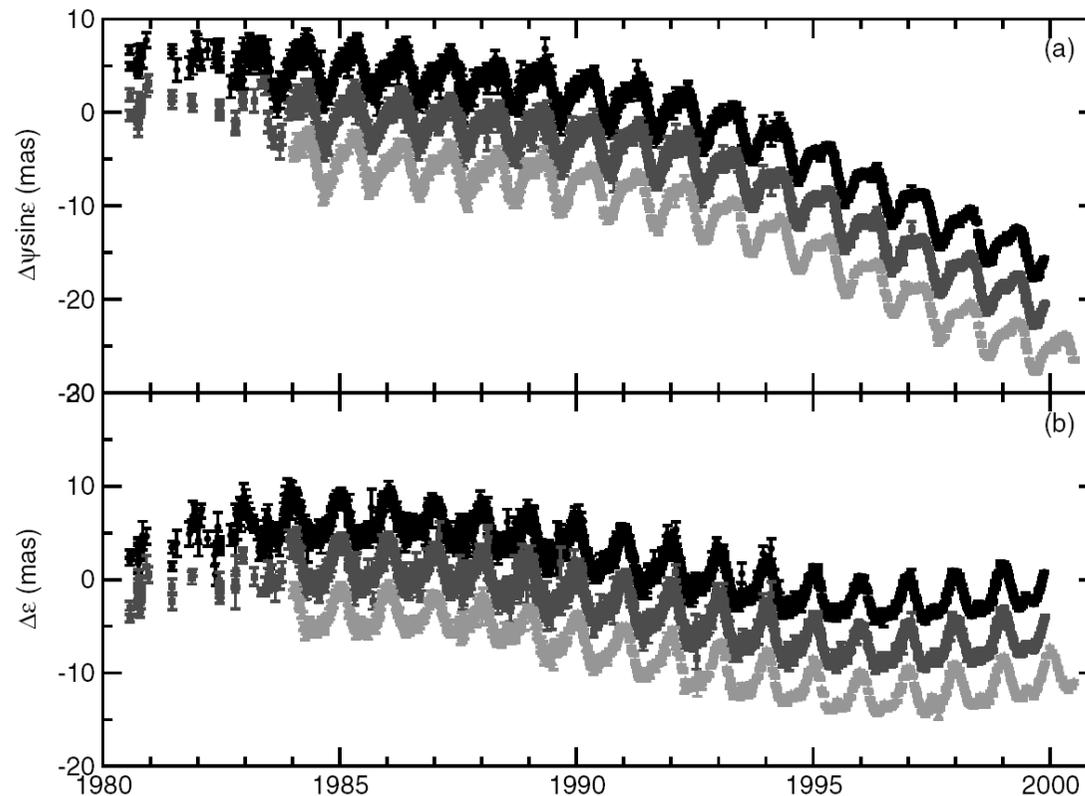


# VLBI et nutations

- Ajustement d'un modèle aux observations :
  - On obtient les coordonnées célestes du pôle sous forme de séries temporelles,
  - Quand MHB a été fait : 1980 — 2000,
  - Dans ces séries temporelles, on ajuste les amplitudes des termes périodiques de la nutation à certaines fréquences de marée,
  - MHB : 42 fréquences de marée (18.6 ans → 7 jours).

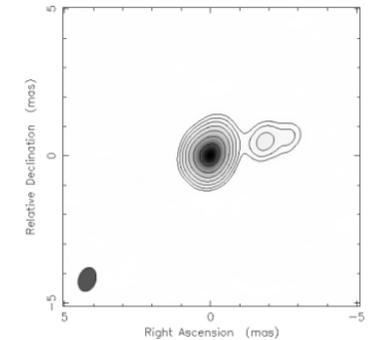


Ecarts à IAU 1980 pour 3 centres d'analyse (GSFC, USNO, IAA). D'après Herring et al. (2002)

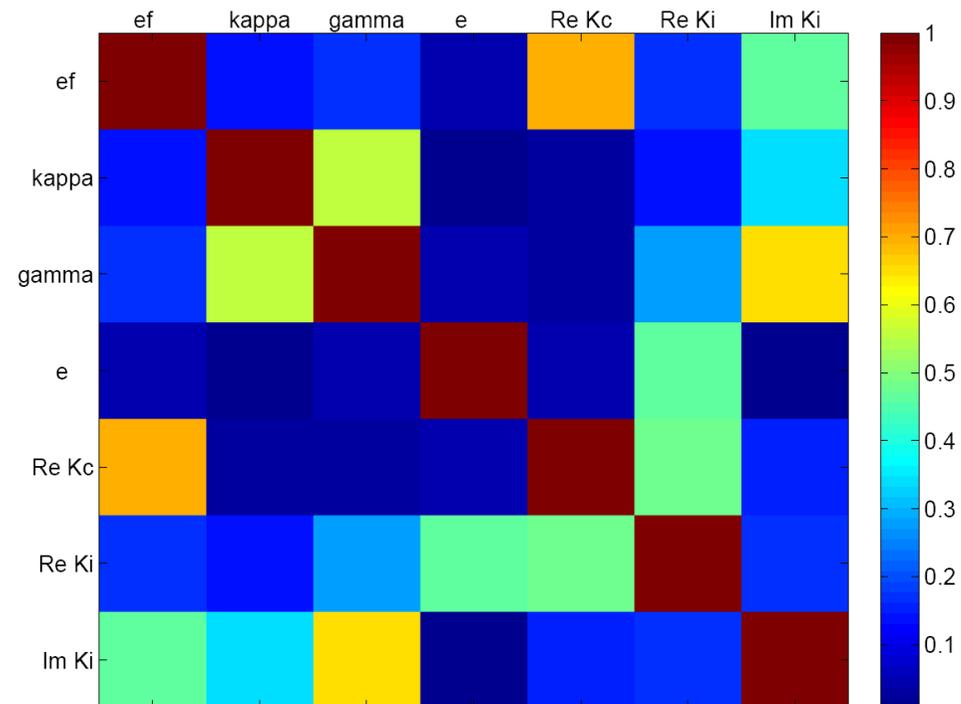


# VLBI et nutations

- Ajustement d'un modèle aux observations (suite)
  - On retire des amplitudes ajustées tous les effets non liés à la non-rigidité :
    - Effet du couplage entre potentiel et redistribution de masse (second ordre),
    - Nutation géodésique,
    - Effet thermique pour S1,
  - On ajuste les paramètres (moindres carrés comme dans MHB, Bayésien comme dans Koot et al. 2008),
  - On itère jusqu'à convergence de la solution.



Corrélations entre les paramètres estimés. (P.M. Mathews, comm. priv.)

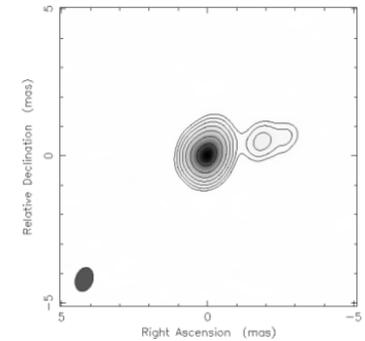


# VLBI et nutations

- Ajustement aux observations VLBI (fin) :
  - Résultats pour MHB :

**Table 2.** Estimates for BEP From Least Squares Fit

BEP	Estimate	Adjustment
$e_f$	$0.0026456 \pm 20^a$	0.0000973
$\kappa$	$0.0010340 \pm 92$	-0.0000043
$\gamma$	$0.0019662 \pm 14$	0.0000007
$e$	$0.0032845479 \pm 12$	0.000037
$\text{Im } K^{\text{CMB}}$	$-0.0000185 \pm 14$	...
$\text{Re } K^{\text{ICB}}$	$0.00111 \pm 10$	...
$\text{Im } K^{\text{ICB}}$	$-0.00078 \pm 13$	...
RMS (sd) <sub>input</sub>	0.0039	...
RMS residuals	0.0132	...



D'après Mathews et al. (2002).

Champ mag : ~6.9 gauss à la CMB et ~72 gauss à l'ICB.



## VLBI et nutations

**Table 3a.** Resonance Frequencies, Periods (Uncertainty Limits), and  $Q^a$

Mode	Re $\sigma_\alpha$	Im $\sigma_\alpha$	Period	$Q$
1 (CW)	$0.002601 \pm 10$	$-0.0001361489 \pm 28$	(381.9, 385.0)	...
2 (RFCN)	$-1.0023181 \pm 15$	$0.0000250 \pm 15$	(-429.93, -430.48)	20000
3 (PFCN)	$-0.99903 \pm 10$	$0.00078 \pm 13$	(930, 1140)	677
4 (ICW)	$0.000413471 \pm 42$	$0.000000319 \pm 53$	(2411.7, 2412.2)	...

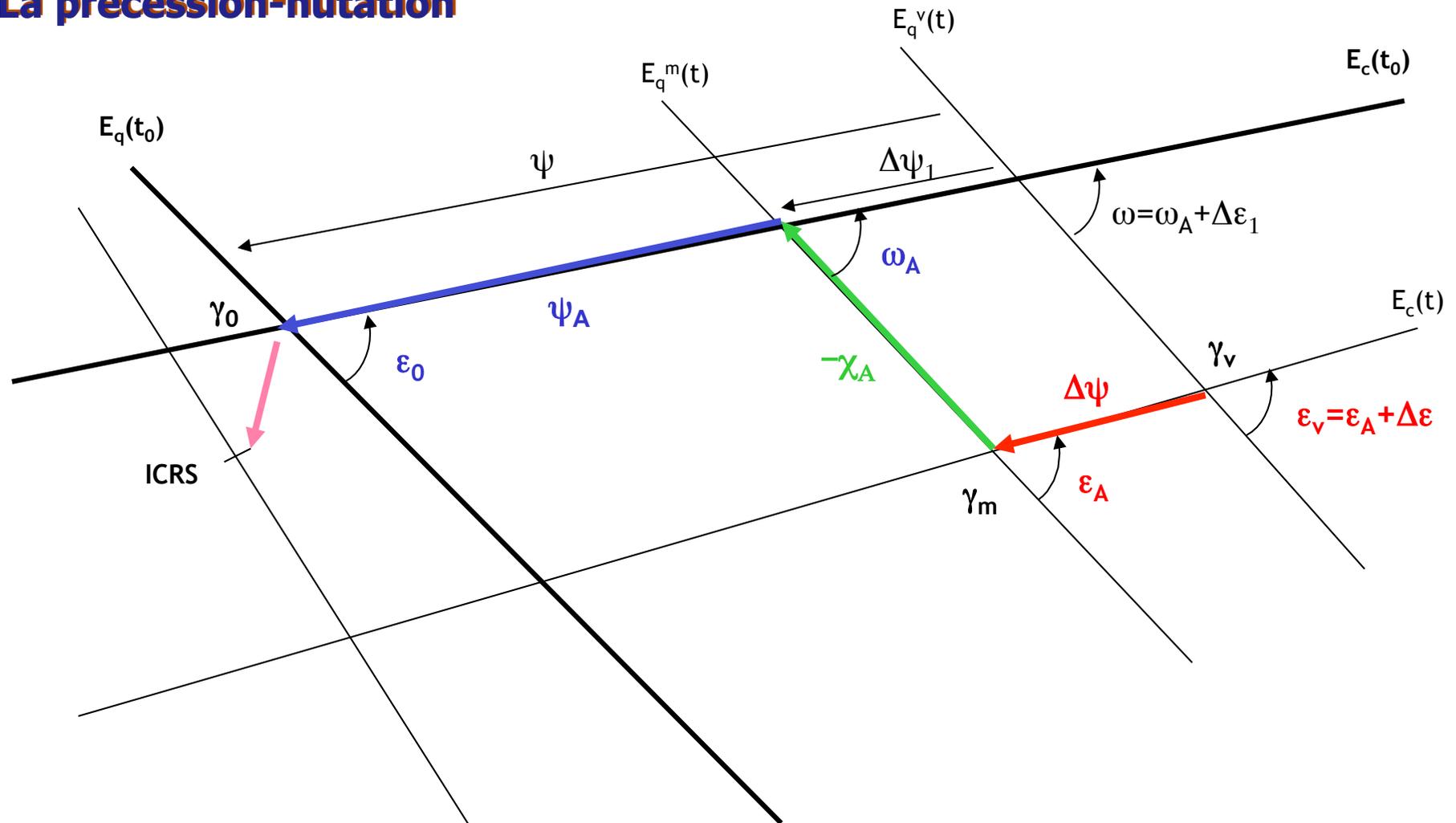
- Il apparaît que les fréquences de résonances « observées » sont sensiblement différentes des valeurs théoriques (pour lesquelles il n’y avait pas de couplage électromagnétique ) :
  - FCN : 458 → 430 jours,
  - FICN : 477 → 1000 jours.
  
- Contribution non hydrostatique qui augmente de  $\sim 3\%$  l’aplatissement du noyau fluide.
  
- Koot et al. (2008) : inversion indépendante de MHB. Déviation significative pour Im  $K_{ICB}$ .

# Le modèle MHB 2000 ou IAU 2000A

- Adoption par l'UAI comme modèle conventionnel : dénomination
  - IAU 2000A pour la version complète,
  - IAU 2000B pour la version tronquée à 1 mas (moins précis mais plus rapide).
- Tables de nutation :
  - 1323 ( $\Delta\psi$ ) et 1037 ( $\Delta\varepsilon$ ) termes de Fourier de périodes  $> 2$  jours,
  - Les termes de périodes  $< 2$  jours sont conventionnellement exclus et comptés dans l'ITRS,
  - 37 ( $\Delta\psi$ ) et 19 ( $\Delta\varepsilon$ ) termes de Poisson de degré 1,
  - La phase astronomique est donnée par une combinaison linéaire des arguments de Delaunay et planétaires (voir IERS Conventions 2003, Chap. 5),
  - Ne contient pas la nutation libre du noyau car non prédictible.
- Tables de nutation en coordonnées cartésiennes du CIP (Capitaine et al. 2003) :
  - IERS Conventions 2003, Chap. 5 + routines SOFA,
  - Fortran disponible dans les routines SOFA et sur le site des conventions IERS.

sin ( $\mu$ as)	cos ( $\mu$ as)	l	l'	F	D	$\Omega$
0.153770000000000D+04	0.92052331000000D+07	0	0	0	0	1
-0.458700000000000D+03	0.57303360000000D+06	0	0	2	-2	2
0.137400000000000D+03	0.97846100000000D+05	0	0	2	0	2
-0.291000000000000D+02	-0.89749200000000D+05	0	0	0	0	2
-0.174000000000000D+02	0.22438600000000D+05	0	1	2	-2	2
0.318000000000000D+02	0.20073000000000D+05	0	0	2	0	1
0.367000000000000D+02	0.12902600000000D+05	1	0	2	0	2
...						

# La précession-nutation



Ecart ICRS/Eq. J2000.0

$$R_3(-\alpha_0) R_2(-\xi_0) R_1(\eta_0)$$

Prec. de l'équateur

$$R_1(-\epsilon_0) R_3(\psi_A) R_1(\omega_A)$$

Prec. planétaire

$$R_3(-\chi_A)$$

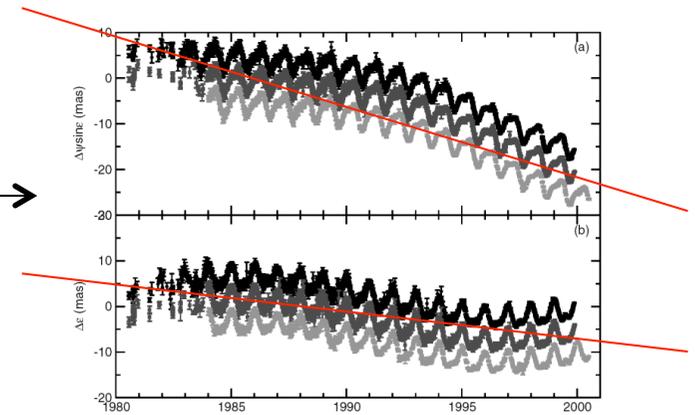
Nutation

$$R_1(-\epsilon_A) R_3(\Delta\psi) R_1(\epsilon_A + \Delta\epsilon)$$

# La précession associée à MHB 2000

- MHB 2000 (ou IAU 2000A) est un modèle de nutation :
  - Les écarts VLBI à IAU 1980/IAU 1976 montrent une pente qui est, au moins en partie, signe que la précession IAU 1976 doit être corrigée,

Écarts à IAU 1980 pour 3 centres d'analyse (GSFC, USNO, IAA).  
D'après Herring et al. (2002)



- MHB propose des corrections à IAU 1976 :

$$\delta\psi_A = -0''29965 \times t$$

$$\delta\omega_A = -0''02524 \times t$$

- Le « modèle de précession-nutation » IAU 2000 est donc la réunion de la nutation IAU 2000A et de la précession IAU 1976 (Lieske et al. 1977) corrigée :

$$\psi_A = 5038''47875 \times t - 1''07259 \times t^2 - 0''001147 \times t^3$$

$$\omega_A = \epsilon_0 - 0''02524 \times t + 0''05127 \times t^2 - 0''007726 \times t^3$$

$$\epsilon_A = \epsilon_0 - 46''8150 \times t - 0''00059 \times t^2 + 0''001813 \times t^3$$

$$\chi_A = 10''5526 \times t - 2''38064 \times t^2 - 0''001125 \times t^3$$

$$\epsilon_0 = 84381''448$$

## La précession associée à MHB 2000

- Toutefois, incohérence physique : les nouvelles valeurs de précession doivent être calculées à partir des équations dynamiques prenant en compte les nouvelles valeurs des paramètres géophysiques données par MHB,
  - Encouragements de l'UAI en 2003 pour développer une nouvelle précession cohérente avec la nutation IAU 2000A.
- Modèles développés post IAU 2000 :
    - Bretagnon et al. (2003) : SMART97 + variation séculaire du  $J_2$ ,
    - Fukushima (2003) : autre paramétrisation,
    - Capitaine et al. (2003) : équations de Williams (1994) + var. séc.  $J_2$ ,

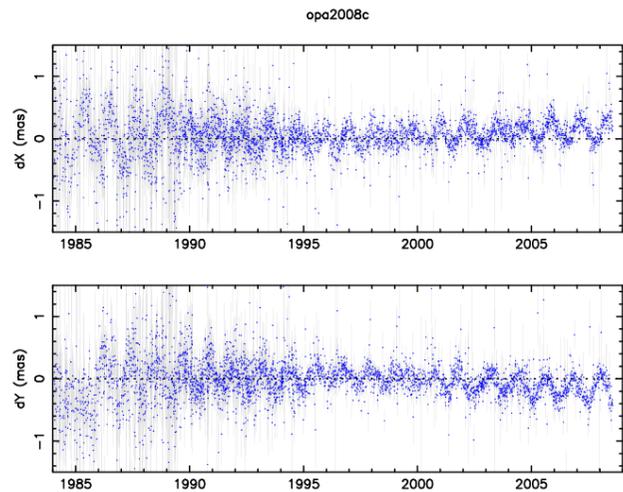
$$\psi_A = 5038''.481507 t - 1''.0790069 t^2 - 0''.00114045 t^3 \\ + 0''.000132851 t^4 - 0''.0000000951 t^5$$

$$\omega_A = \epsilon_0 - 0''.025754 t + 0''.0512623 t^2 - 0''.00772503 t^3 \\ - 0''.000000467 t^4 + 0''.0000003337 t^5$$

$$\epsilon_0 = 84381''.406.$$

# Comparaison entre théorie et VLBI

- MHB 2000 vs. VLBI : ce qu'il reste d'inexpliqué par le modèle :

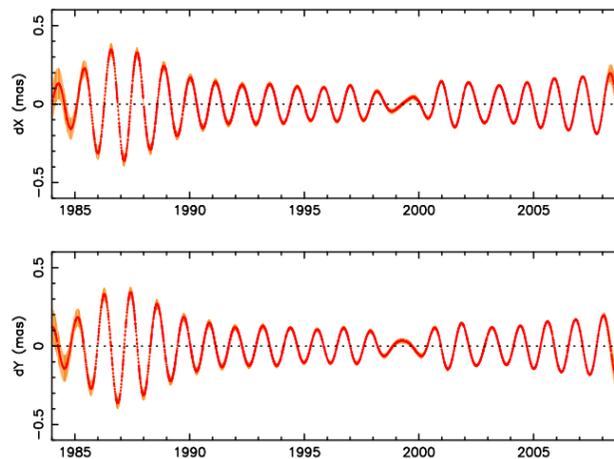


Solution VLBI opa2008c (~3800 sessions de 24h)  
(voir <http://ivsopar.obspm.fr/geo>).

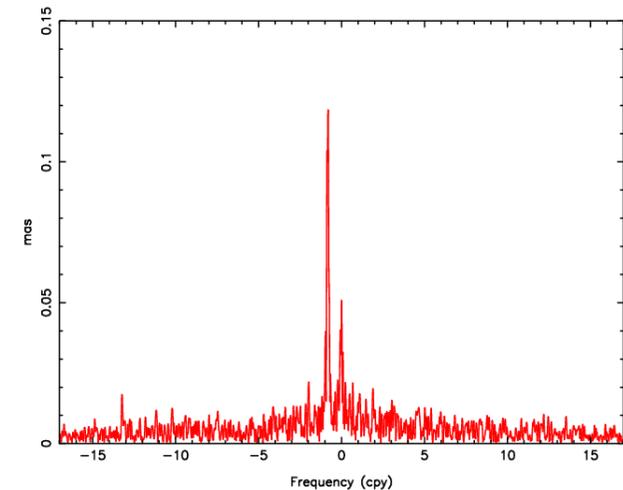
Le principal signal apparaissant dans les résidus est l'oscillation quasi diurne rétrograde associée à la nutation libre du noyau (free core nutation, FCN) de période ~430 jours.

Le spectre montre, outre la FCN, des pics annuels, semi-annuels et mensuels.

opa2008c: NDFW

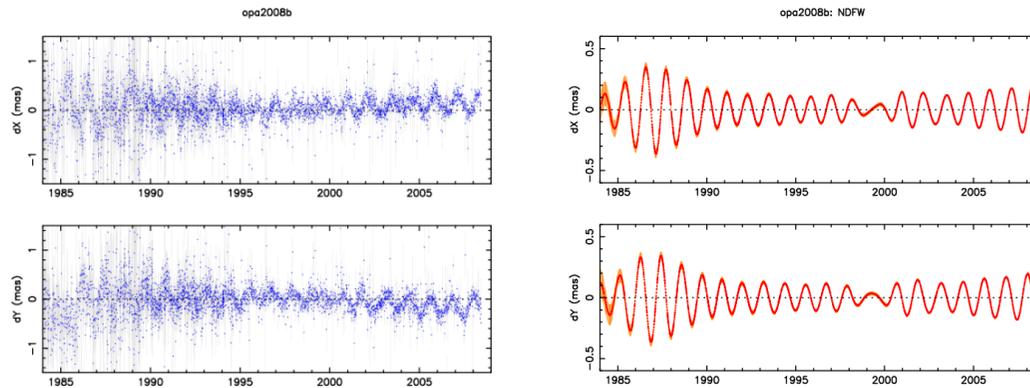


opa2008c: SPECTRUM

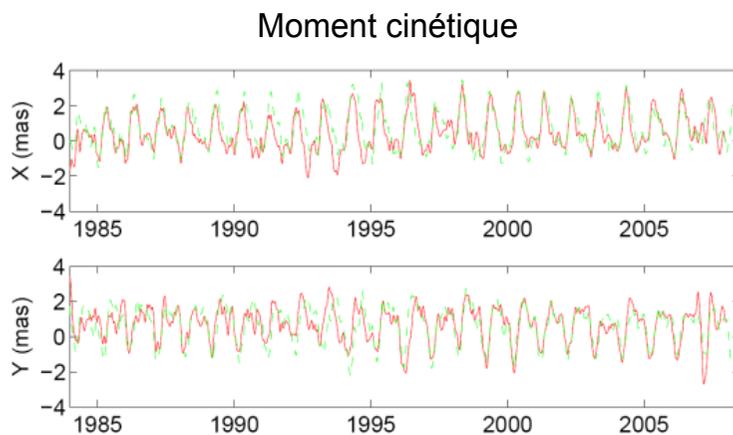


# L'oscillation quasi diurne ou FCN

- Excitée vraisemblablement, au moins en partie, par l'atmosphère et l'océan.
- Tester cela nécessite des modèles atmosphériques et océaniques « bons » dans le domaine diurne.

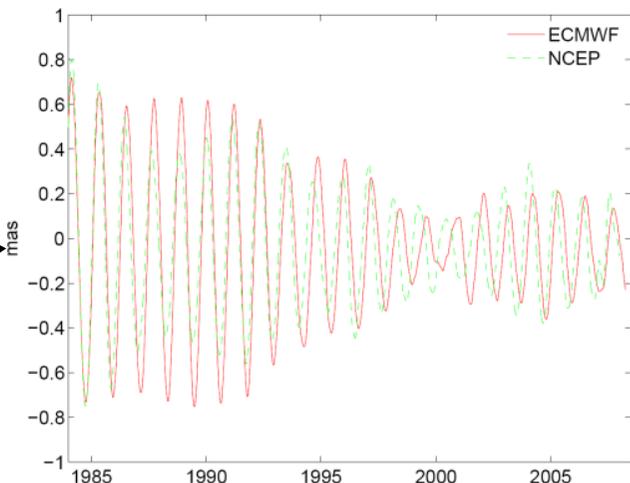


- Modèles pas d'accord entre eux (par exemple ECMWF (UE) et NCEP (USA)).



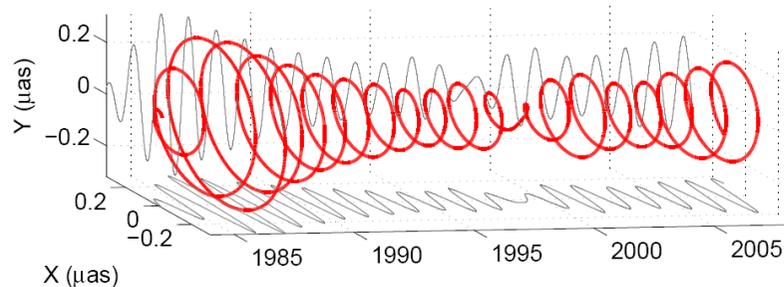
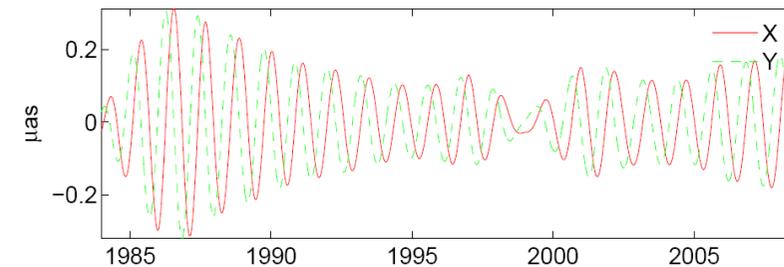
Entretien de la FCN  
par la pression  
atmosphérique

... en général, ça  
marche pas très bien



# L'oscillation quasi diurne ou FCN

- Modèle empirique (IERS Conventions 2003, Chap. 5) servant à un éventuel retrait des résidus ou à une prédiction à court terme de la nutation :
  - Ajusté sur la C04,
  - Update tous les 6 mois environ,
  - La période est fixée à la valeur MHB (430.21 jours),
  - On donne les amplitudes des termes en sin et cos,
  - Routine Fortran disponible.

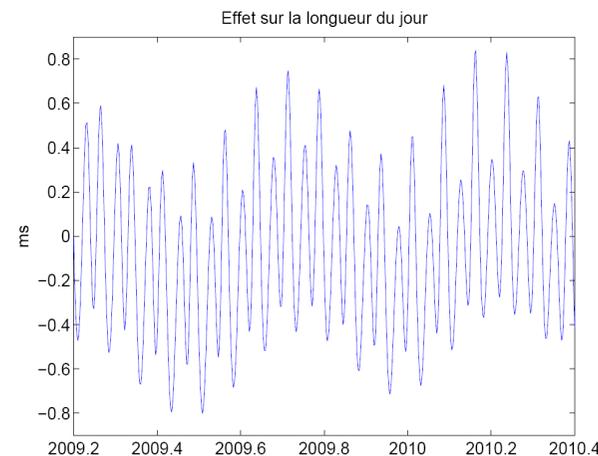
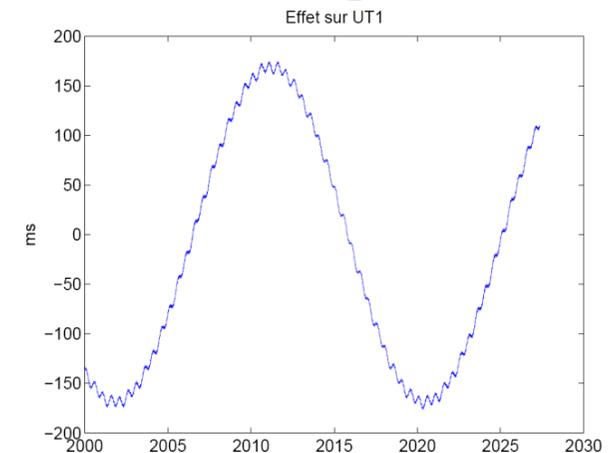
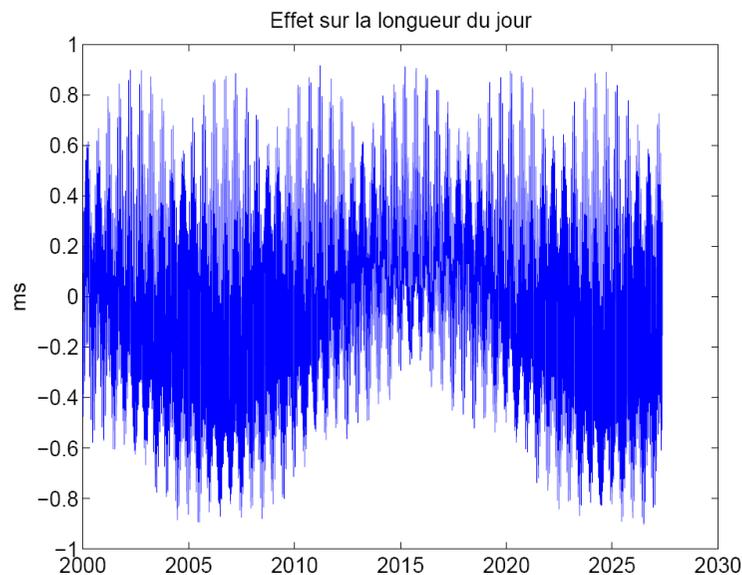


year	mjd	$X_c, -Y_s$ $\mu\text{as}$	$X_s, Y_c$ $\mu\text{as}$	$\pm$ $\mu\text{as}$
1984	45700	78.87	-125.13	18.93
1985	46066	-94.06	-128.40	12.32
1986	46431	-238.06	-154.23	14.25
1987	46796	-262.91	-152.30	13.65
1988	47161	-201.75	-27.67	14.20
1989	47527	-191.80	-87.82	11.94
1990	47892	-201.02	-60.12	9.18
1991	48257	-147.87	26.27	7.92
1992	48622	-118.88	40.70	6.51
1993	48988	-111.93	9.64	7.51
1994	49353	-120.51	34.38	6.99
1995	49718	-123.15	39.28	7.67
1996	50083	-143.22	17.15	7.41
1997	50449	-127.36	49.06	7.50
1998	50814	-82.19	30.73	7.63
1999	51179	-19.96	-35.48	6.33
2000	51544	29.07	-111.01	5.95
2001	51910	86.98	-123.91	7.36
2002	52275	80.07	-97.29	7.13
2003	52640	109.90	-54.14	4.65
2004	53005	131.46	-10.18	4.55
2005	53371	157.76	-15.35	3.23
2006	53736	160.41	-14.18	3.08
2007	54101	148.90	34.30	4.31

# Marées zonales dans UT1

- Marées zonales = variations périodiques de l'aplatissement de la Terre.
- Interaction entre le moment  $C_{2,0}$  de la Terre (0 cpj dans l'espace) et le moment  $\phi_{2,0}$  (0 cpj dans l'espace) du potentiel :
  - Effet sur UT1 ou sur la longueur du jour par conservation du moment angulaire.

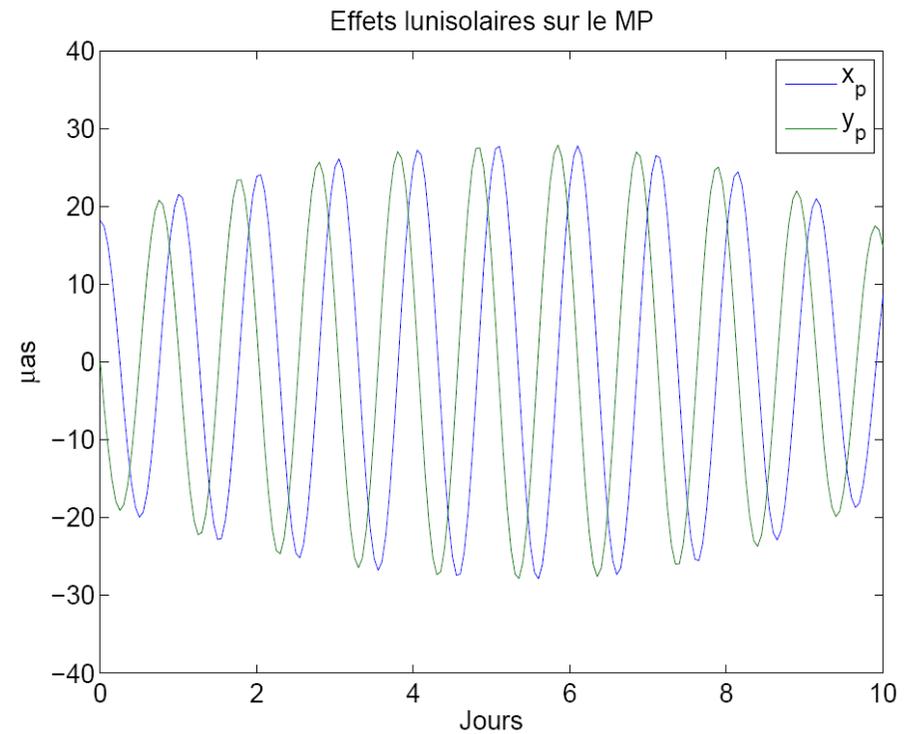
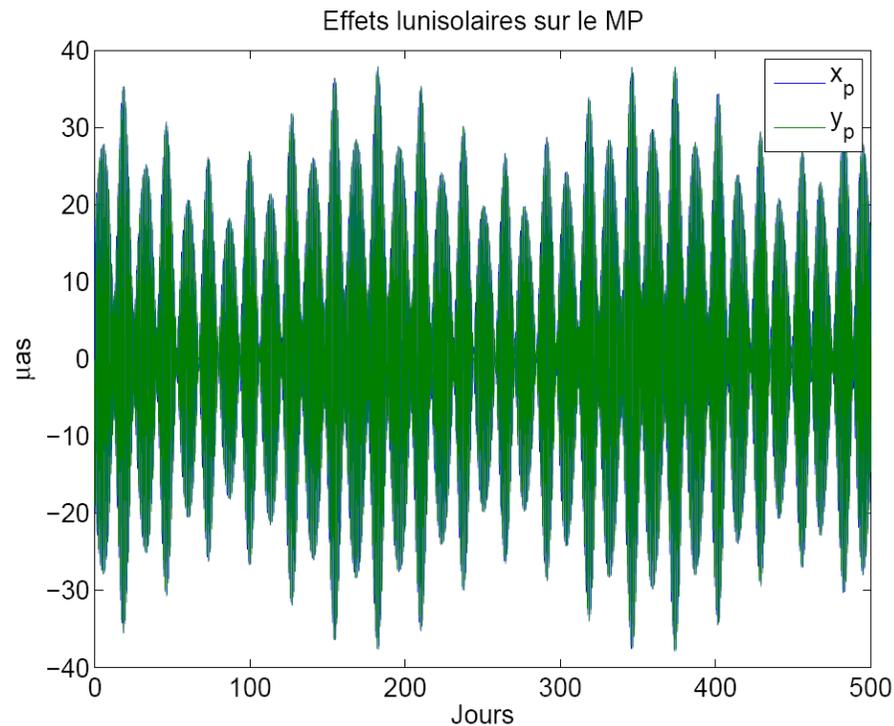
$$\frac{\delta\text{LOD}}{\text{LOD}} = \left( 1 - \frac{\tilde{\gamma} C_f}{\tilde{\kappa} C} \right) \frac{C_{33}}{C_m}$$



Modèle de Defraigne & Smits (1999)

# Effets lunisolaires dans le mouvement du pôle

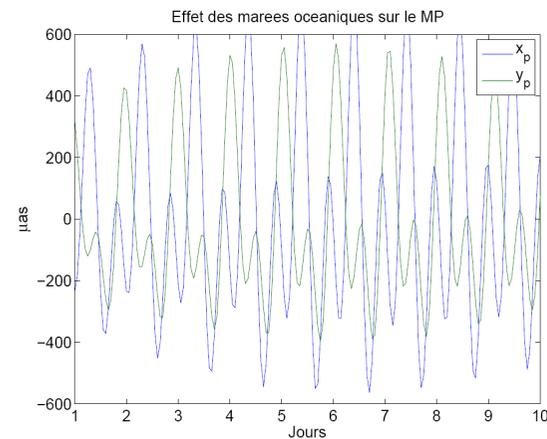
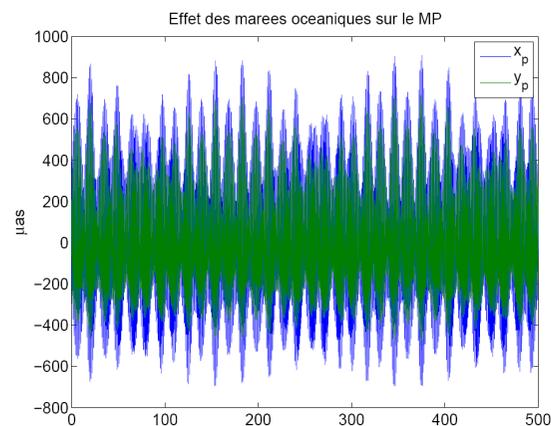
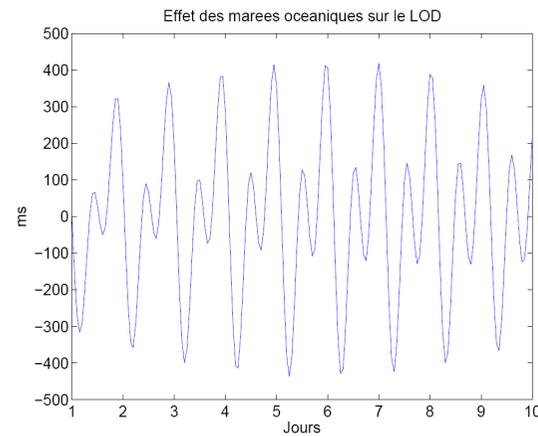
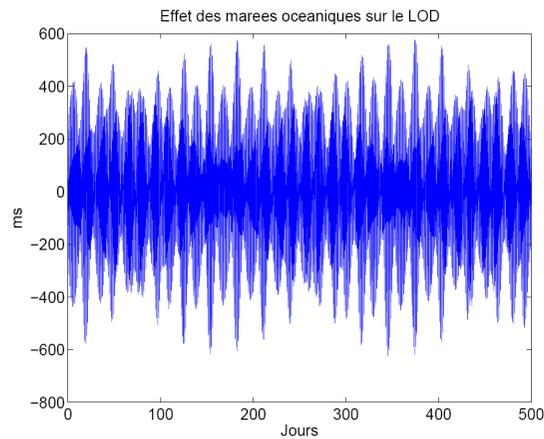
- Inclus la triaxialité et les contributions des  $C_{l>2,j}$ .



Modèle de Brzezinski (2003), routine de C. Bizouard, disponible à <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/models/interp.f>

# Effet des marées océaniques dans le mouvement du pôle

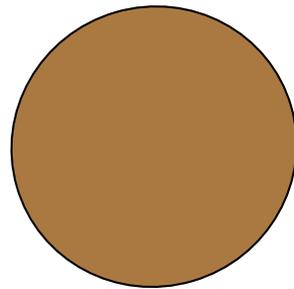
- Océans : la variation de hauteur d'eau provoque un incrément d'inertie via  $(1+k')$  :
  - 1 → effet direct,
  - $k'$  → surcharge.
- Effets diurnes et subdiurnes dans la Terre :



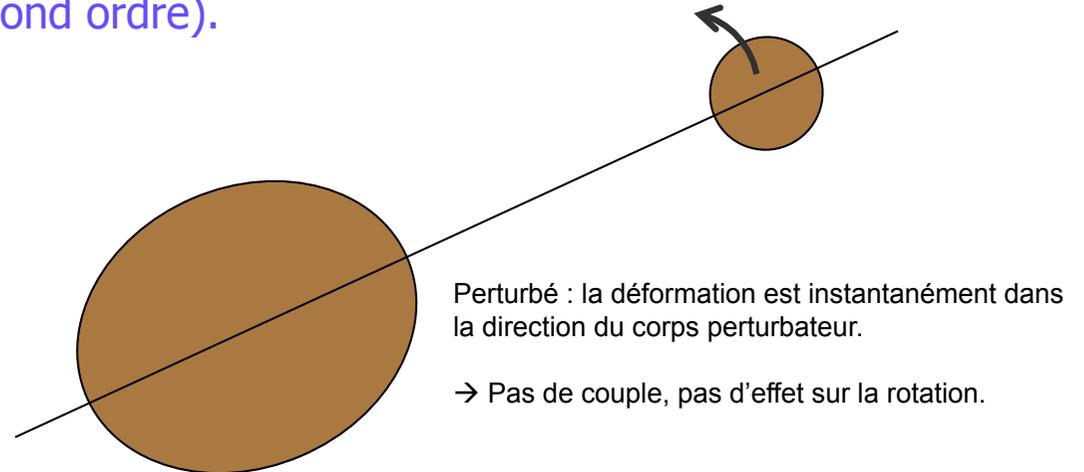
Routine de R. Eanes, à partir de Ray et al. (1994), reprise par C. Bizouard, disponible à <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/models/interp.f>

# Couple sur les déformations

- Ce sont les effets directs du potentiel sur les déformations dynamiques (termes dits « non linéaires » ou du second ordre).
- Cas de la Terre élastique :



Non perturbé.



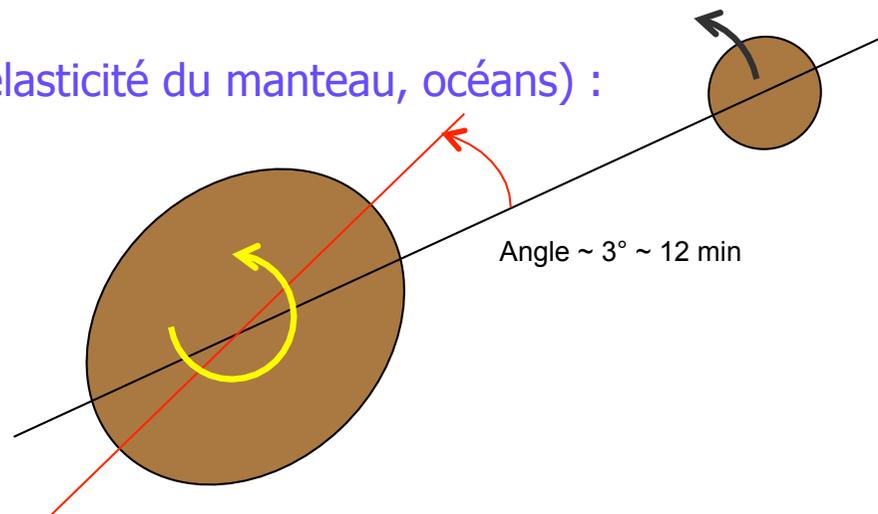
Perturbé : la déformation est instantanément dans la direction du corps perturbateur.

→ Pas de couple, pas d'effet sur la rotation.

- Cas de la Terre dissipative (anélasticité du manteau, océans) :

Le bulbe prend un certain temps pour se former. Etant entraîné par la rotation de la Terre, le bulbe, vu depuis l'espace, se retrouve **en avant** par rapport au corps perturbateur. Vu depuis la Terre, il serait en arrière.

→ Couple !



Angle  $\sim 3^\circ \sim 12$  min

# Couple sur les déformations

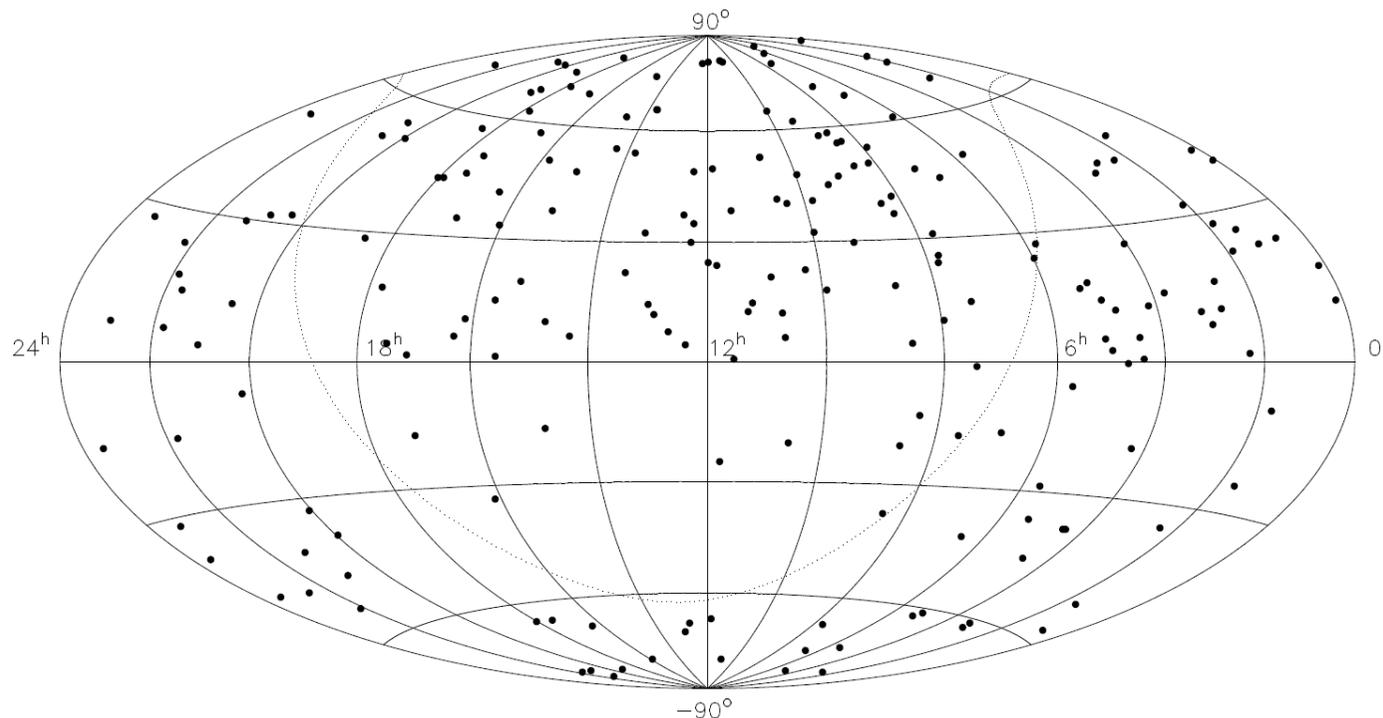
- Interactions entre déformations  $C_{2,0}$  (zonales),  $C_{2,1}$  (tesserales) et  $C_{2,2}$  (sectorielles) et potentiels  $\phi_{2,0}$  (zonal),  $\phi_{2,1}$  (tesseral) et  $\phi_{2,2}$  (sectoriel), sachant que, dans la Terre :
  - Zonal = longue périodes,
  - Tesseral = rétro diurne,
  - Sectoriel = rétro semi-diurne,
  - Possibilité d'avoir des couplages produisant des effets dans la bande rétro diurne (nutations, longueur du jour) et longue période (précession, allongement séculaire de la longueur du jour).
- Effet principal de  $\sim 50 \mu\text{s}$  sur la nutation en 18.6 ans et de 1.8 mas/siècle sur la précession en obliquité, majoritairement du à la dissipation dans les océans (Lambert & Mathews 2006).
- Ralentissement séculaire de la rotation terrestre causé par la friction dynamique dans les océans et le manteau : 2.5 ms/siècle (Ray et al. 1999, Mathews & Lambert 2008, hors effet de la variation séculaire du  $J_2$  de l'ordre de  $-0.7 \text{ ms/siècle}$ ).
- Variations périodiques du LOD  $< 0.5 \mu\text{s}$ .



**Un problème astronomique aux  
conséquences géophysiques :  
rattacher notre planète à un  
système inertiel**

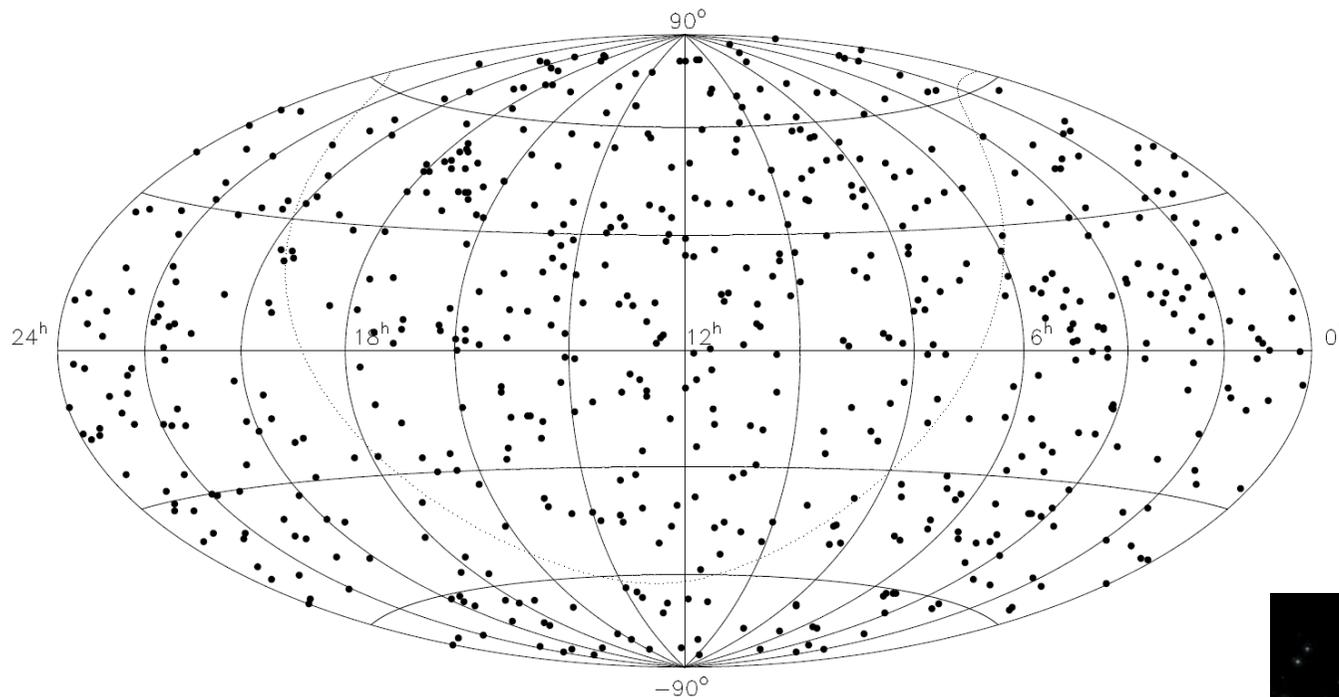
# Le système céleste international (ICRS)

- Définition cinématique : système d'axes fixes et non tournants par rapport à l'univers lointain, système quasi inertiel.
- Réalisation conventionnelle actuelle : l'ICRF (Ma et al. 1998)
  - VLBI (radio 8.3 GHz),
  - Coordonnées de 212 sources de « définition » qui définissent les axes,
    - Ensemble non tournant sur la base des observations VLBI jusqu'en 1995,
    - Coordonnées meilleures qu'à 1 mas,
    - Hémisphère sud peu rempli.

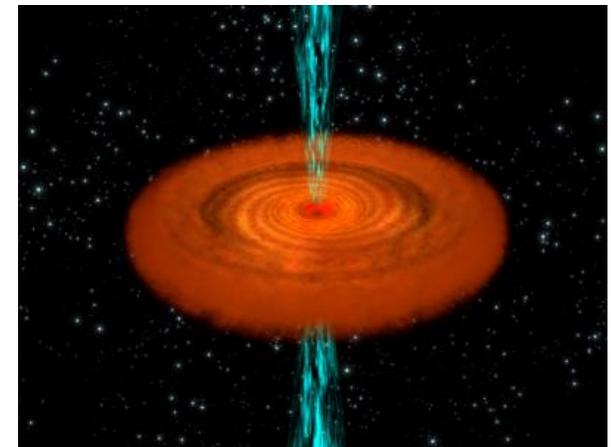


# Le système céleste international (ICRS)

- Catalogue total de 667 sources (quasars, AGN, BL Lac). Ci-dessous, figure de l'article de Ma et al. (1998).

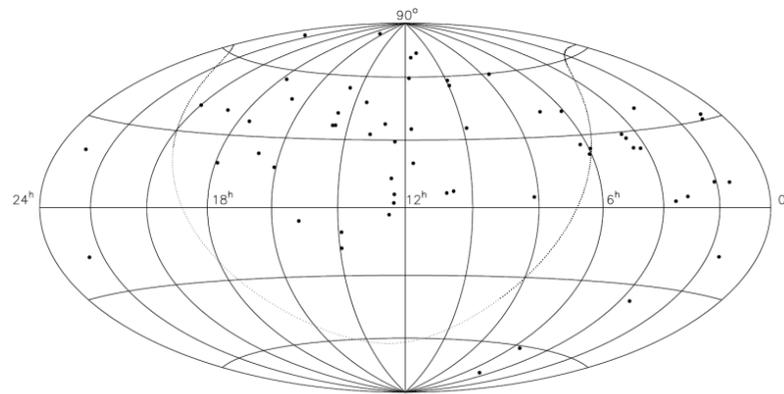


Distance  $\sim 10^9$  a.l.  
Magnitude  $\sim 20$   
Taille  $\sim 5$  mas

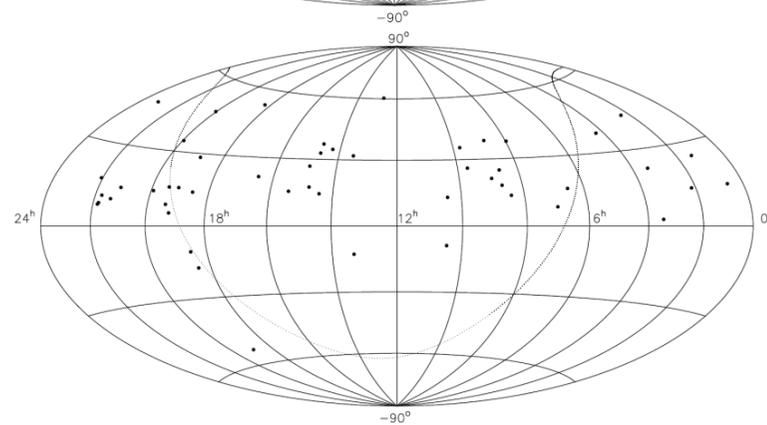


# Le système céleste international (ICRS)

- Seconde extension (Fey et al. 2004) :
  - 109 sources supplémentaires,
  - Obtention des coordonnées de toutes les sources par NNR sur les 212 sources de définition,
  - Coordonnées des 212 sources de définition conservées comme dans l'ICRF,
  - Coordonnées des autres sources réestimées.



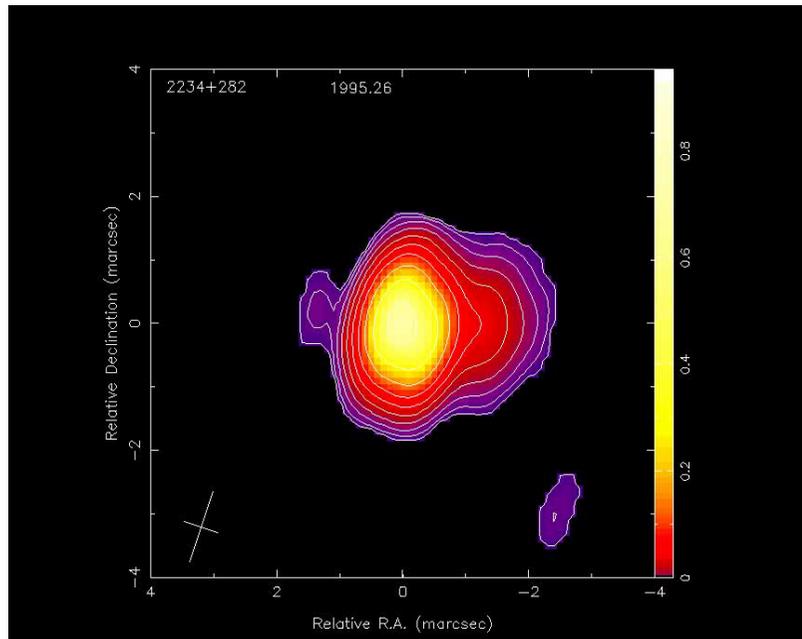
← 59 sources de l'ICRF-Ext.1 (Fey et al. 2004)



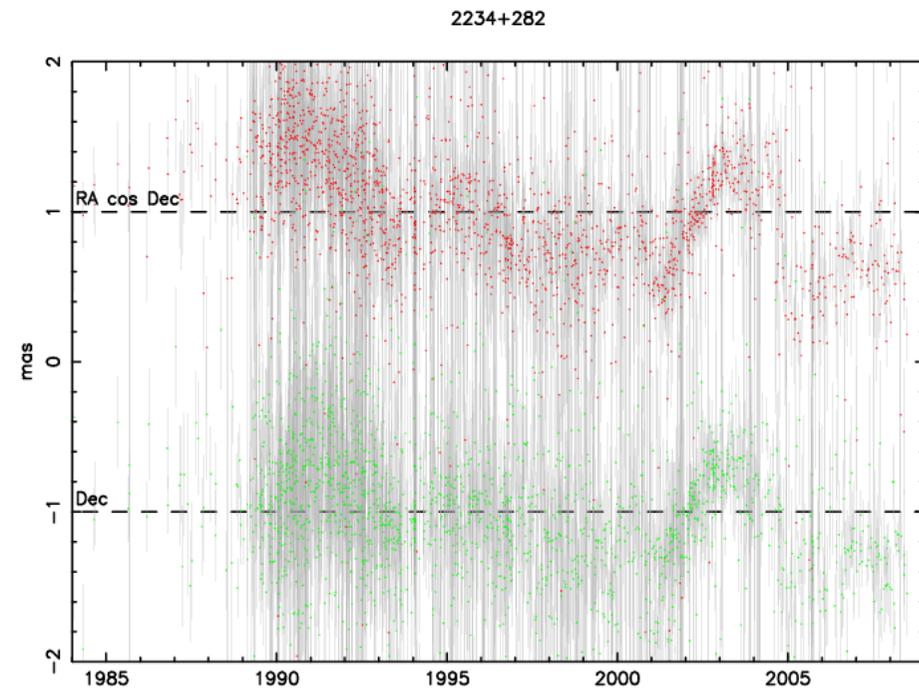
← 50 sources de l'ICRF-Ext.2 (Fey et al. 2004)

# Le système céleste international (ICRS)

- Evolution de l'ICRF :
  - Aujourd'hui : 10 ans de plus d'observations,
  - Evolution des radio sources (jets de plasma, déplacement du radiocentre).



Mojave Sample VLBA Data Base, Purdue Univ.

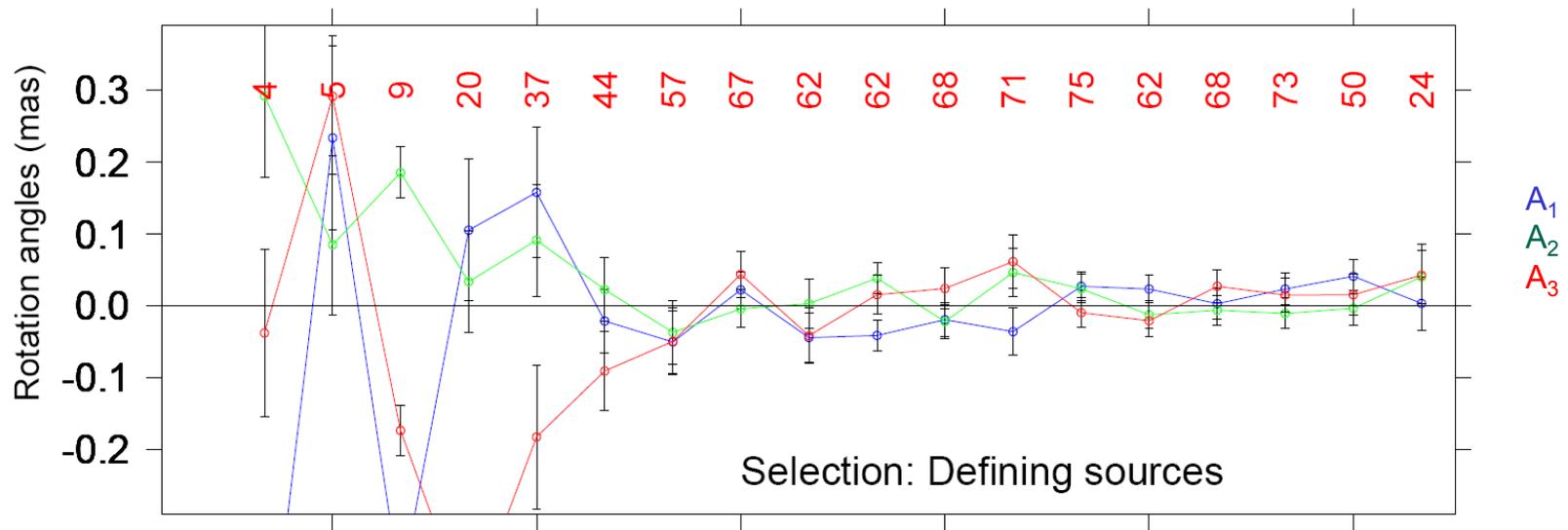


IVSOPAR – Lambert & Gontier (2008)

- Il en ressort que l'ICRF n'est pas la meilleure réalisation du système quasi inertiel.

# Le système céleste international (ICRS)

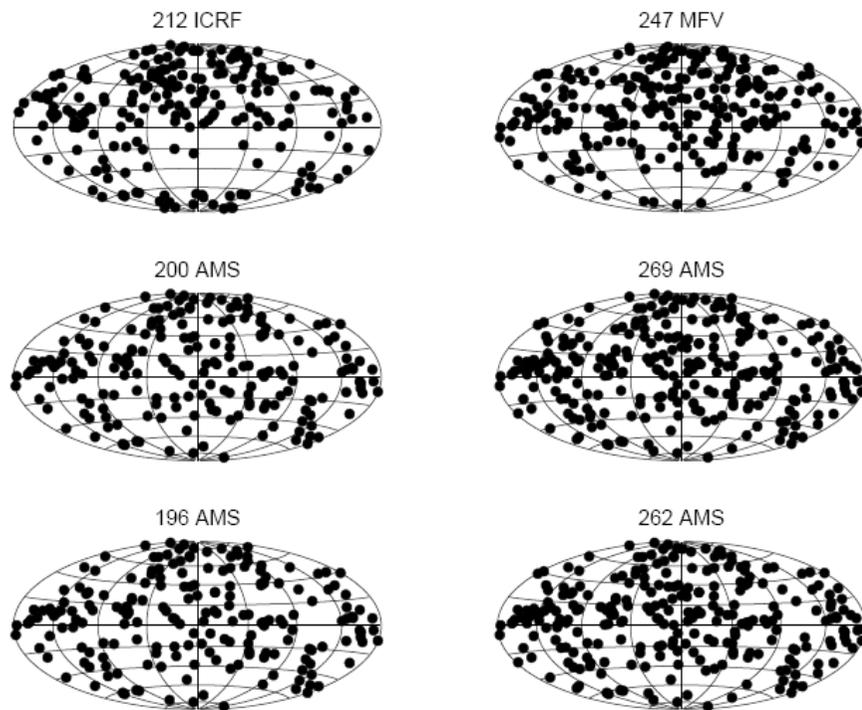
- Futur de l'ICRF :
  - Stabilité des 212 sources de définition remise en question (figure ci-dessous : Feissel-Vernier 2006) : se baser sur ces sources n'assure plus la non rotation du repère, risque de contamination des EOP et des déterminations astrométriques,



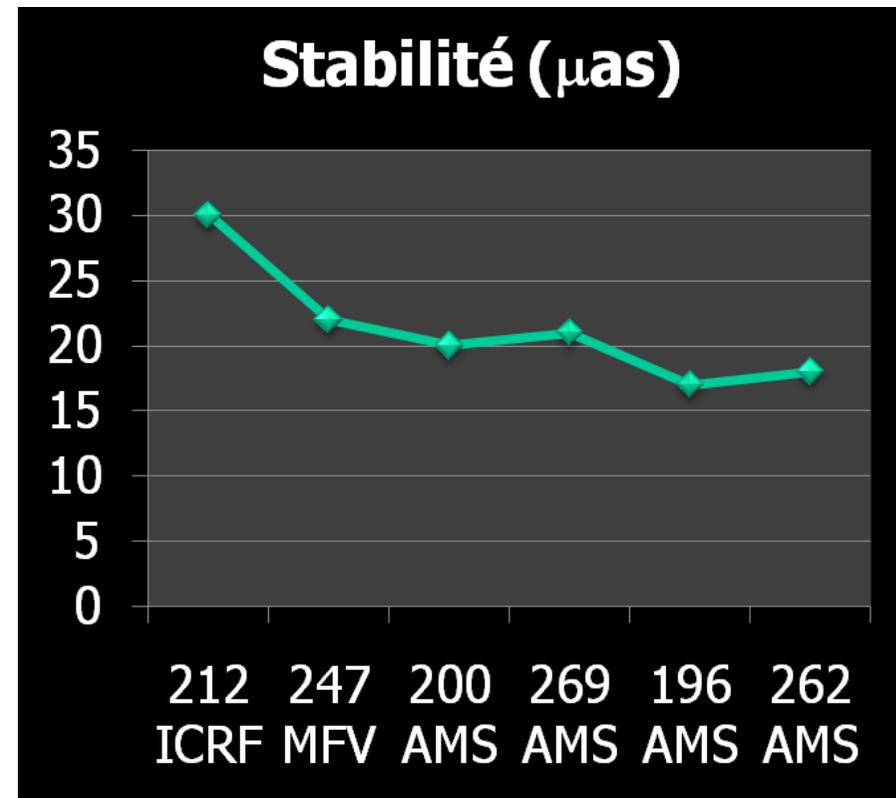
- Possibilité de trouver des sources de définition plus adéquates (Feissel-Vernier et al. 2006).

# Le système céleste international (ICRS)

- Travaux en vue de fonder le prochain ICRF :
  - Groupe de travail IAU/IERS/IVS : livraison de l'ICRF prévue pour 2009,
  - Travaux de M. Feissel-Vernier (2003, 2005, 2006) + études variées sur les sources « stables » et « instables »,
  - Recherches d'algorithmes de sélection basés sur la stabilité du repère :

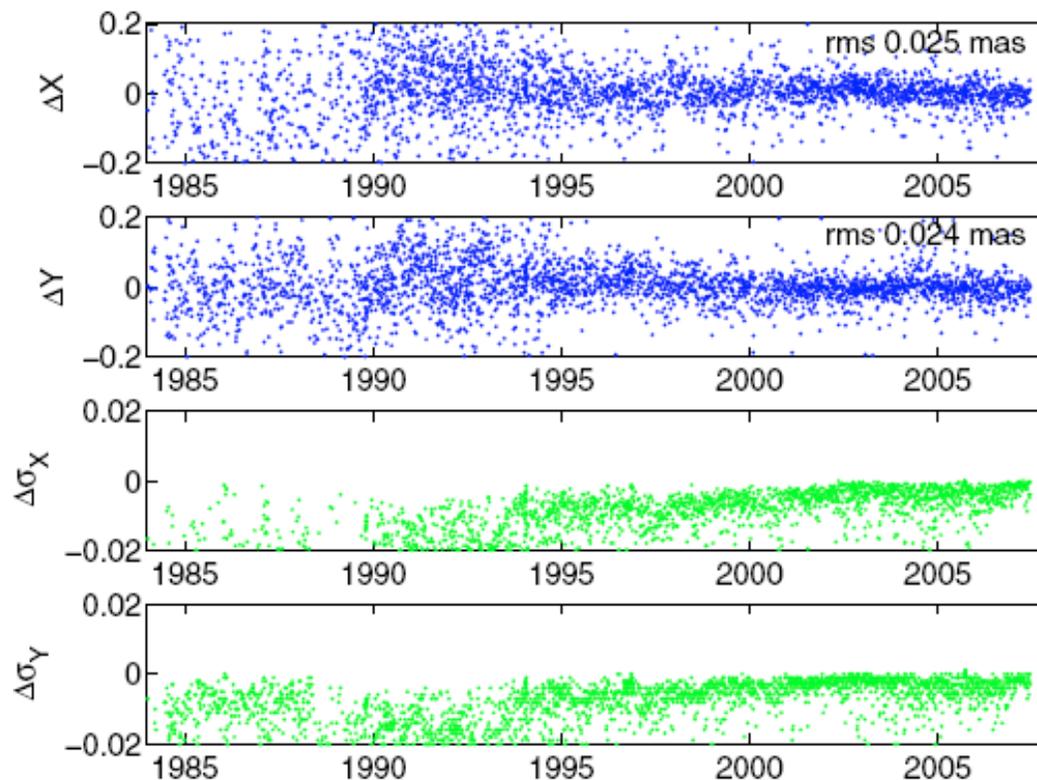


Lambert & Gontier (2008) : divers repères possibles



# Le système céleste international (ICRS)

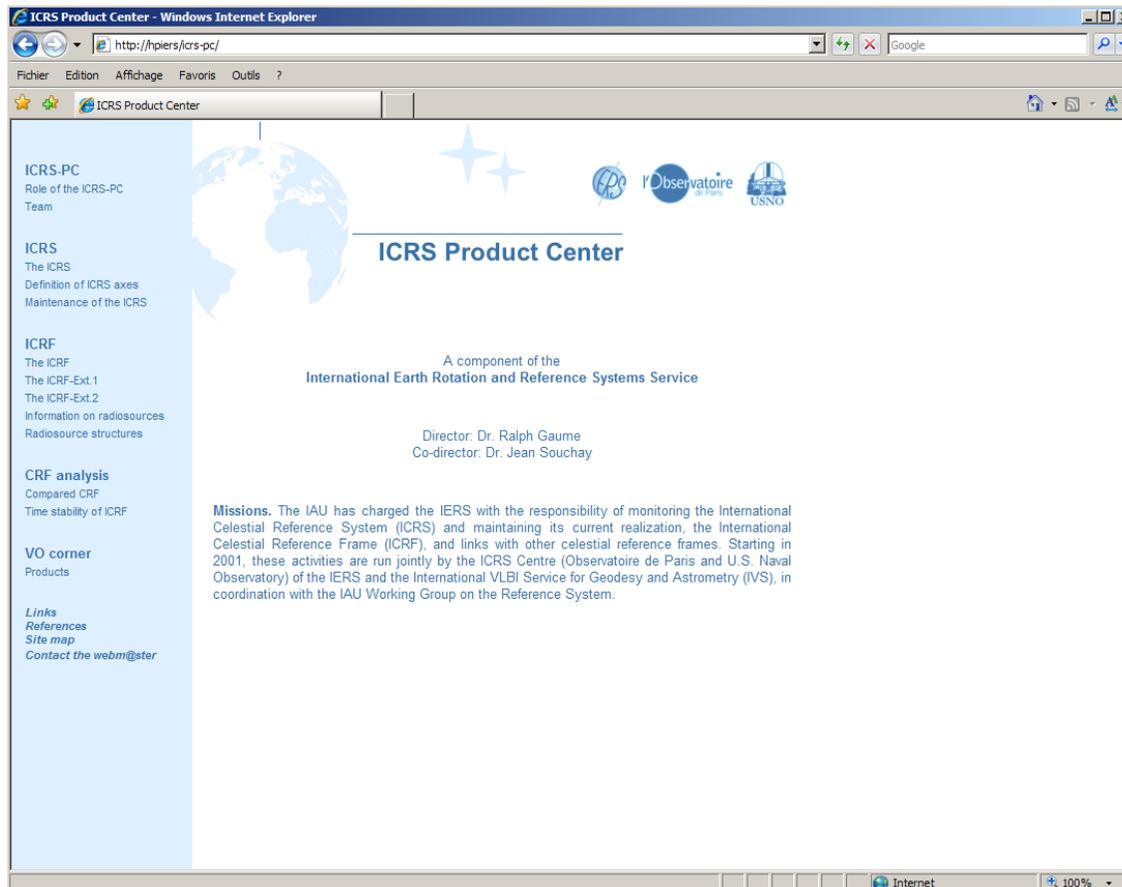
- Importance au niveau des EOP :
  - Le système céleste « stabilise » la nutation,
  - Un repère tournant provoque un biais sur la nutation (jusqu'à 50  $\mu\text{as}$  si on applique la NNR sur les 212 de l'ICRF, en dessous de 15  $\mu\text{as}$  si on l'applique sur 262 AMS),
  - L'introduction de sources instables peut provoquer des distorsions de la nutation au cours du temps.



Effet des sources astrométriquement instables sur la nutation (en mas) mesuré par différence entre 2 solutions VLBI dans lesquelles (i) on tient les sources instables en paramètres globaux et (ii) on libère ces mêmes sources en paramètres par session. L'amplitude de ces effets donne une idée des erreurs cumulables si on choisit un repère céleste inadapté. (Lambert et al. 2008).

# Le système céleste international (ICRS)

- Le centre de produits du système céleste (ICRS-PC) :
  - Composante de l'IERS,
  - Observatoire de Paris/SYRTE et USNO, dir. Jean Souchay et Ralph Gaume,
  - <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc>.



Section « ICRF » dans le menu : listes et informations (coordonnées, redshifts, flux X/S, type spectral, magnitude, ...) des sources de l'ICRF-Ext. 2.

A deep space photograph of a galaxy cluster, likely the Coma Cluster, featuring a large, bright yellowish-white galaxy in the center and numerous other galaxies of various shapes and colors (blue, red, white) scattered throughout the field. The background is a dark, star-filled sky.

# Matériel pour l'utilisateur

# La librairie SOFA

- ***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.***

## IAU STANDARDS OF FUNDAMENTAL ASTRONOMY REVIEW BOARD

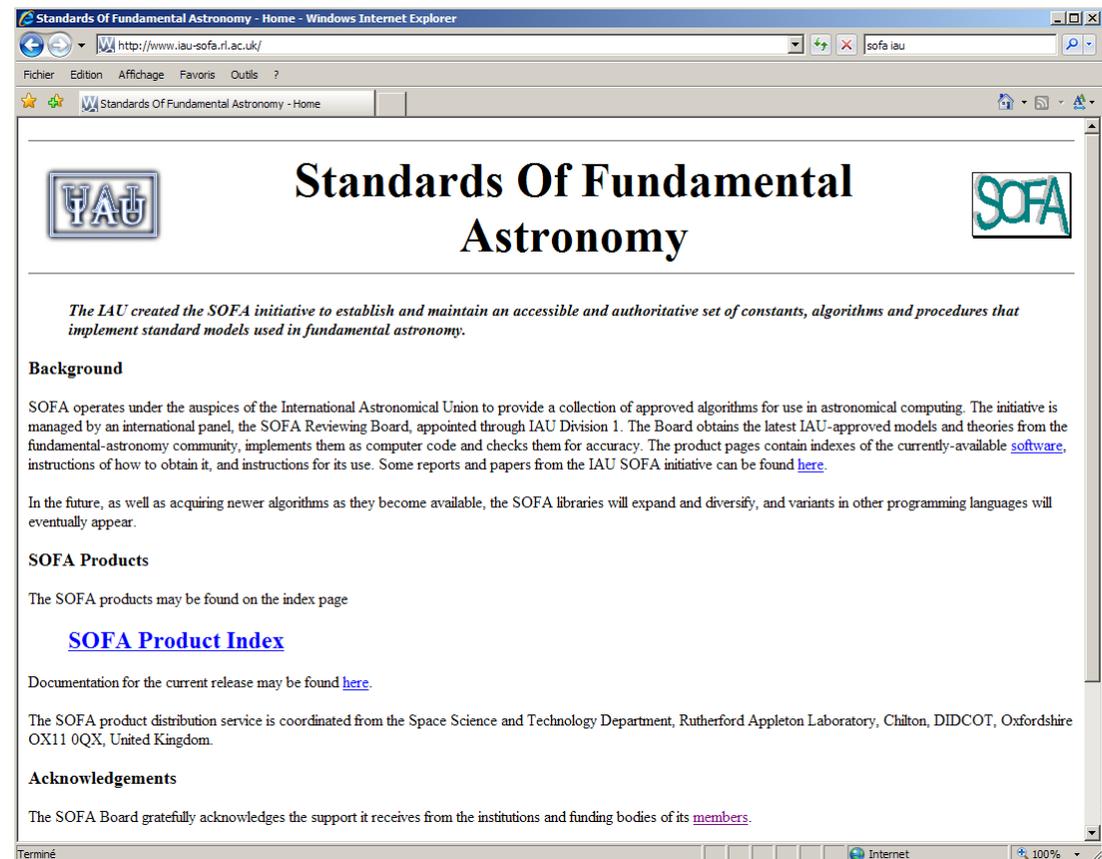
### Current Membership

John Bangert	United States Naval Observatory
Mark Calabretta	Australia Telescope National Facility
Anne-Marie Gontier	Paris Observatory
Catherine Hohenkerk	Her Majesty's Nautical Almanac Office
Wen-Jing Jin	Shanghai Observatory
Brian Luzum	United States Naval Observatory
Zinovy Malkin	Pulkovo Observatory, St Petersburg
Jeffrey Percival	University of Wisconsin
Patrick Wallace	Rutherford Appleton Laboratory (chair)

### Past Members

Wim Brouw	University of Groningen
Dennis McCarthy	United States Naval Observatory
George Kaplan	United States Naval Observatory
Skip Newhall	Jet Propulsion Laboratory

The e-mail address for the Board chair is P.T.Wallace@rl.ac.uk



Standards Of Fundamental Astronomy - Home - Windows Internet Explorer

http://www.iau-sofa.rl.ac.uk/

Fichier Edition Affichage Favoris Outils ?

Standards Of Fundamental Astronomy - Home



## 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 eventually appear.

### SOFA Products

The SOFA products may be found on the [index page](#)

**[SOFA Product Index](#)**

Documentation for the current release may be found [here](#).

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

The SOFA Board gratefully acknowledges the support it receives from the institutions and funding bodies of its [members](#).

Terminé

# La librairie SOFA

- A2AF Decompose radians into d ' " "
- A2TF Decompose radians into hms
- ANP Normalize radians to range 0 to 2pi
- ANPM Normalize radians to range -pi to +pi
- BI00 Frame bias, ICRS to mean J2000, IAU 2000
- BP00 Frame bias and precession matrices, IAU 2000
- BP06 Frame bias and precession matrices, IAU 2006 precession
- BPN2XY Bias-precession-nutation matrix given CIP
- C2I00A Celestial-to-intermediate matrix, IAU 2000A
- C2I00B Celestial-to-intermediate matrix, IAU 2000B
- C2I06A Celestial-to-intermediate matrix, IAU 2006/2000A
- C2IBPN Celestial-to-intermediate matrix given b-p-n
- C2IXY Celestial-to-intermediate matrix given CIP
- C2IXYS Celestial-to-intermediate matrix given CIP and s
- C2S Unit vector to spherical
- C2T00A Celestial-to-terrestrial matrix, IAU 2000A
- C2T00B Celestial-to-terrestrial matrix, IAU 2000B
- C2T06A Celestial-to-terrestrial matrix, IAU 2006/2000A
- C2TCEO Former name of C2TCIO
- C2TCIO form CIO-based celestial-to-terrestrial matrix
- C2TEQX Celestial-to-terrestrial matrix, classical
- C2TPE Celestial-to-terrestrial matrix given nutation
- C2TXY Celestial-to-terrestrial matrix given CIP
- CAL2JD Gregorian Calendar to Julian Day Number
- CP Copy p-vector
- CPV Copy pv-vector
- CR Copy r-matrix
- D2TF Decompose days into hms
- DAT Delta(AT) (=TAI-UTC) for a given UTC date
- DTDB TDB-TT
- ...

Précession, nutation, transformation  
terrestre → céleste...

Fortran 77.

testé...

... et retesté.

Programmation optimisée pour conserver  
un max de précision numérique.

Quelques bémols :

- Routines non autonomes, beaucoup  
d'emboitage,
- Formatage des datas pas toujours  
intuitifs → difficile à modifier ou à scinder,
- Ne concerne que l'astronomie  
fondamentale (« Earth attitude ») et pas la  
géodésie en général.

# Les IERS Conventions

- Dernière version : Note Technique 32 de l'IERS.
- Dispo en ligne sur <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=46-25776>.
- Version 2003 amendée par des updates :
  - <http://tai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt.html>,
  - Contient des versions électroniques des tables,
  - Contient des routines Fortran implémentant certaines tables et modèles.
- Petits bémols :
  - Beaucoup d'info dans les chapitres, mais pas forcément orienté utilisateur,
  - Les routines sont un peu « déconnectées » du reste (i.e., notice manquante).

# Programmes disponibles à l'IERS/EOP-PC

- Routines reliées à la rotation terrestre :
  - Transformation céleste → terrestre (« Earth orientation matrix ») dans le cadre de l'UAI 2000 + dérivées partielles,
  - Modèles de nutation UAI 1980, UAI 2000, différences,
  - Implémentations des modèles de :
    - Marées zonales (IERS Conv. Chap. 8),
    - Mouvement du pôle diurne et sub diurne (marées océaniques + couple lunisolaire, tel que décrit dans les IERS Conv. Chap. 5 & 8),
  - Différences TAI – UTC (sauts de seconde de l'IERS).
- Auteurs : A.-M. Gontier, G. Francou, C. Bizouard, D. Gambis, S. Lambert.



The screenshot shows the EOP PRODUCT CENTER website. The main heading is "MODELLING THE EARTH'S ROTATION". Below this, there is a table listing various Earth rotation components and their corresponding models or data sources. The table includes categories like "NUTATIONS (> 2 days)", "POLAR MOTION", "UT1 / LOD", and "Earth rotation component". Each row has a link to "click here" for more information.

Earth rotation component	Models / Software
NUTATIONS (> 2 days)	<a href="#">click here</a> <a href="#">(nutation models)</a>
POLAR MOTION	<a href="#">click here</a>
from 100 years to 6 hours	<a href="#">click here</a>
UT1 / LOD	<a href="#">click here</a>
from 100 years to 6 hours	<a href="#">click here</a>

Below the table, there are sections for "IERS CONVENTIONS" (listing 1996 and 2003 conventions), "Astronomical and geophysical models with associated softwares" (listing SOFA), and "MODELS" (listing Earth orientation matrix and Coordinate transformation).