

## *Fondements des Conventions IERS*

Dynamique de la rotation de la Terre

*Olivier de Viron, LIENSs, Université de La Rochelle*

# Plan

- Les équations générales de la rotation de la Terre: Euler-Liouville
- Les causes des variations de rotation de la Terre
- Les variations de la longueur du jour
- Les nutations de la Terre
- L'excitation des modes propres

# Equations d'Euler-Liouville (1)

Les variations temporelles du moment cinétique de la Terre sont égales au moment total des forces qui agit sur la Terre

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

Il est plus commode d'écrire la dérivée dans le repère terrestre, car c'est dans ce repère que les fluctuations sont mesurées

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{\Omega} \wedge \vec{H} = \vec{\Gamma}$$

# Equations d'Euler Liouville (2)

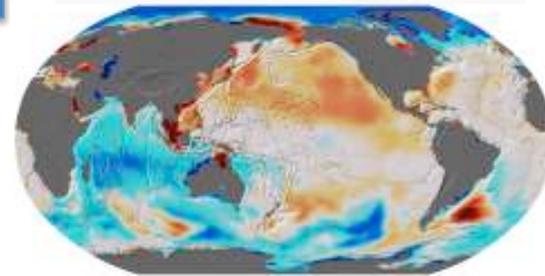
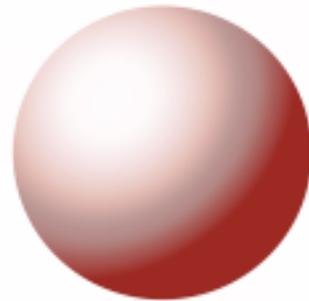
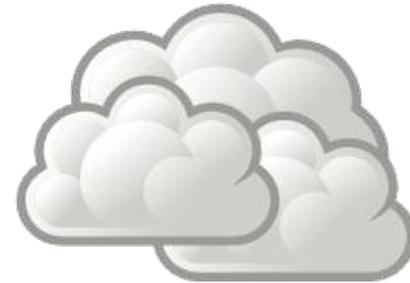


Mouvements dans le noyau  
Courants océaniques  
Vents  
Hydrologie

...

# Equations d'Euler Liouville (2)

Rotation rigide





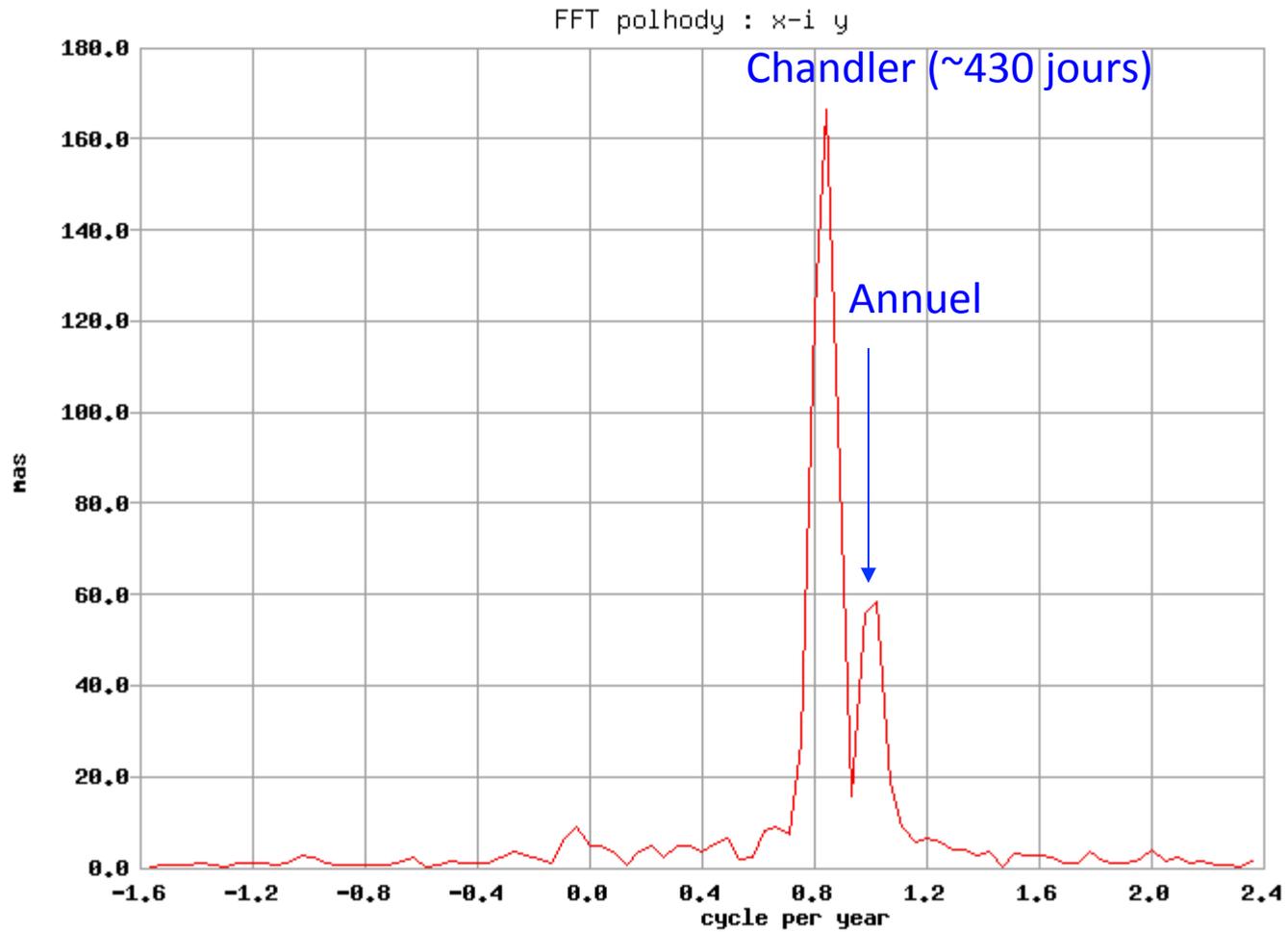
# Equations d'Euler Liouville (4)

$$\frac{d}{dt} \left[ \text{Earth with red rotation arrow} + \text{Hand holding Earth with Sun/Moon/Clouds} + \text{Cross-section Earth with green rotation arrow} \right] = \frac{d}{dt} \left[ \text{Earth with blue rotation arrow and clouds} + \text{Hand holding Earth} \right] + \text{Earth with red rotation arrow and Moon}$$

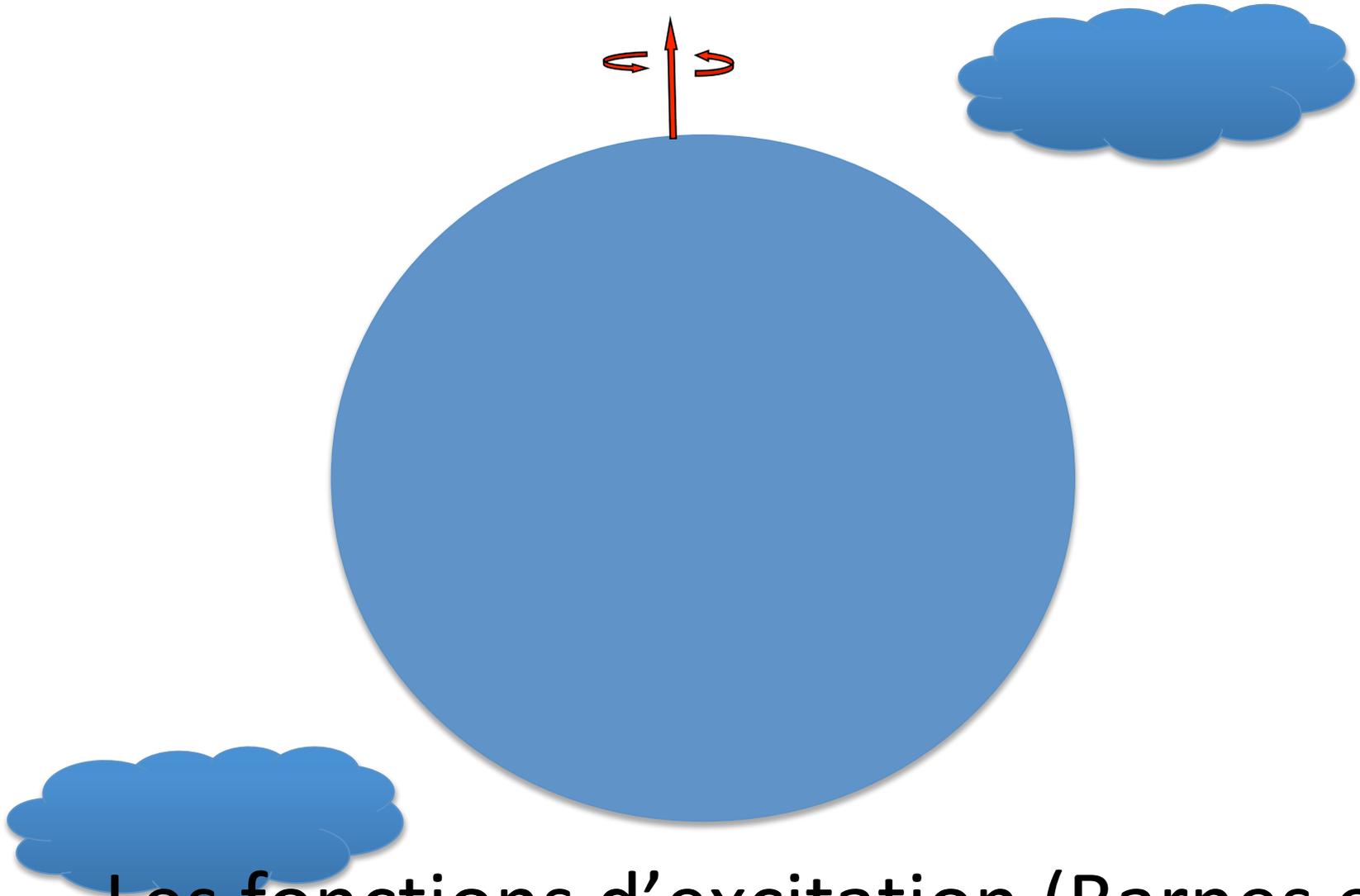
Si vous voulez les mathématiques:

- Munk et Mc Donald (1960)
- HDR C. Bizouard
- Thèse Laurence Koot (en ligne)
- Barnes et al., 1983
- Sasao Okubo Saito, 1980
- Sasao et Wahr, 1981

# Analyse en fréquence

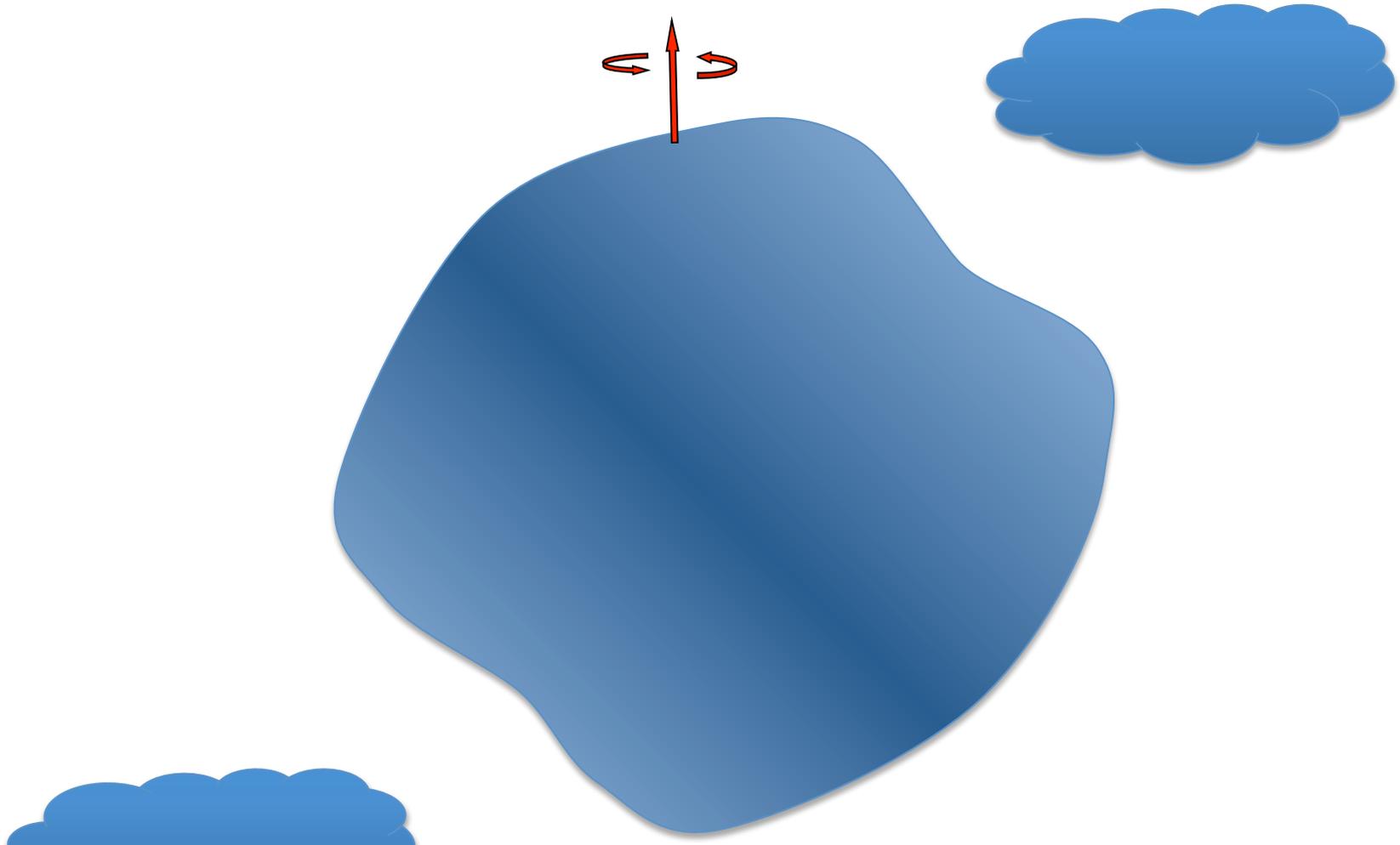


# Equations d'Euler Liouville (5)



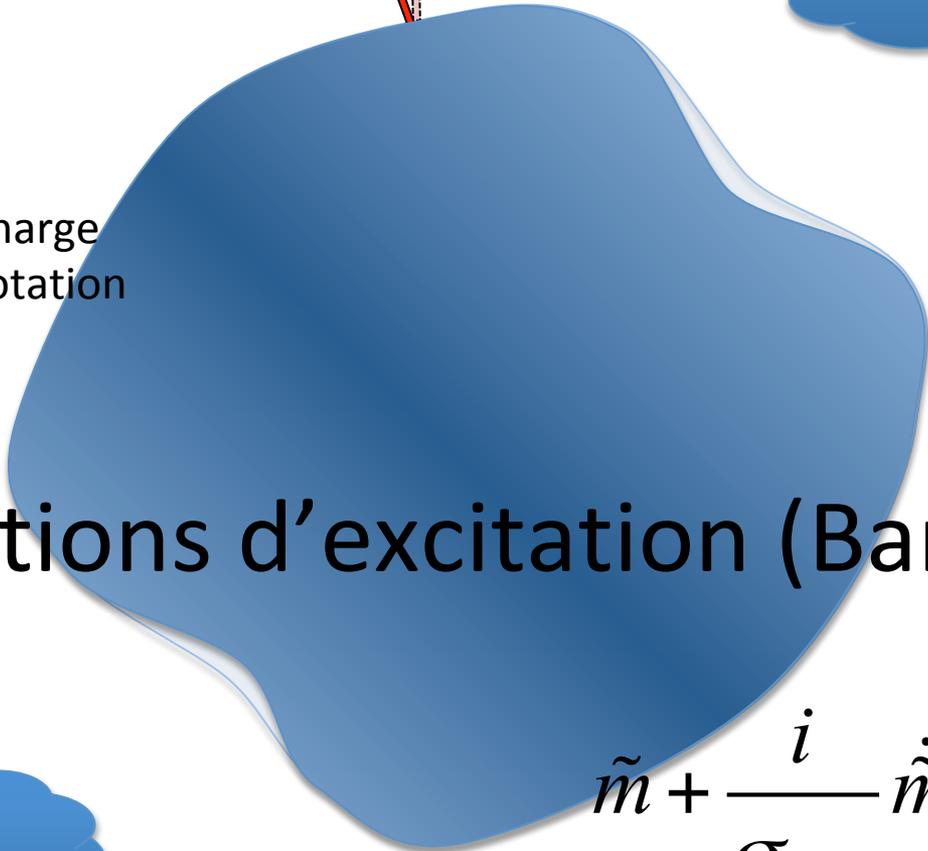
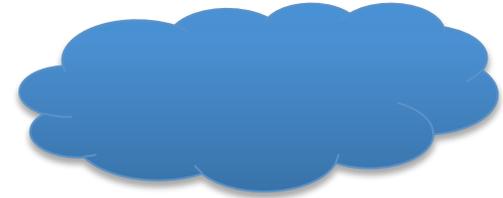
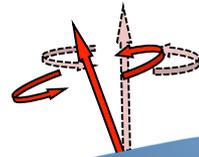
Les fonctions d'excitation (Barnes et al.)

# Equations d'Euler Liouville (6)



Les fonctions d'excitation (Barnes et al.)

# Equations d'Euler Liouville (7)



3 contributions:

- Masse fluide
- Déformation de charge
- Déformation de rotation

Normalisation

## Les fonctions d'excitation (Barnes et al.)



$$\tilde{m} + \frac{i}{\sigma_{CW}} \dot{\tilde{m}} = \tilde{\chi} - \frac{i}{\Omega} \dot{\tilde{\chi}}$$

$$\Delta LOD = -\chi_3^{11}$$

# Causes des modifications de la rotation de la Terre

## Moments de force extérieurs

- Lune, Soleil, planètes (à très long terme: freinage séculaire)

## Moments de force internes ou Mouvement et réorganisation des masses

- Noyau
- Graine
- Atmosphère, océan, hydrologie

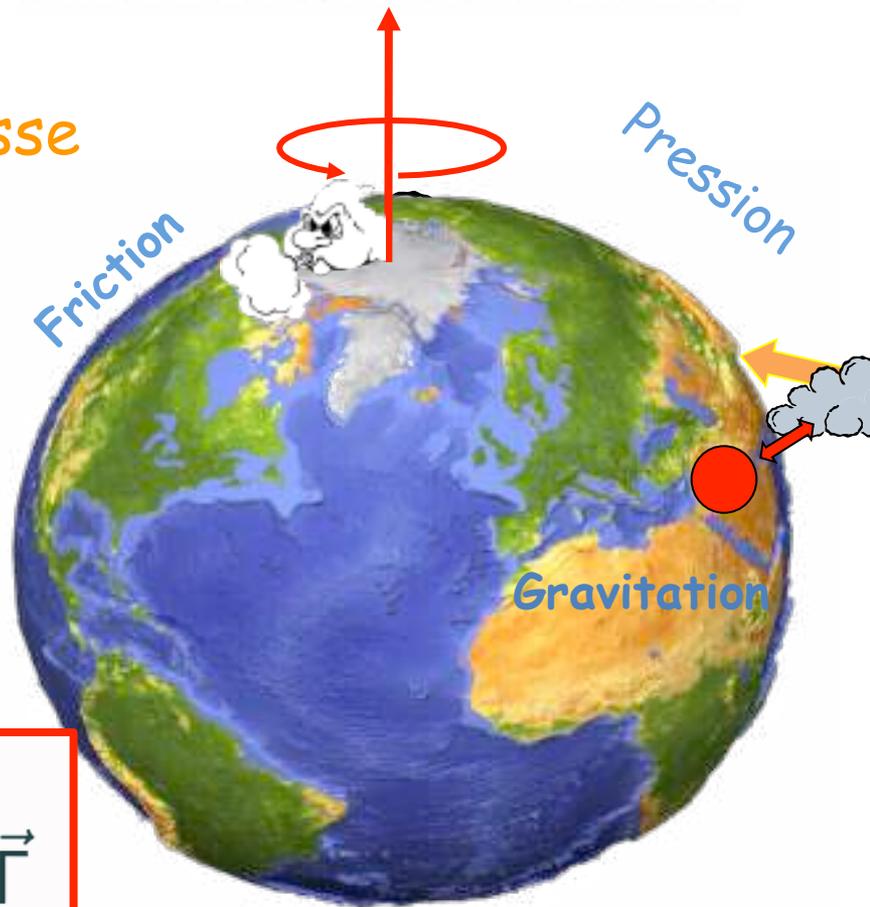
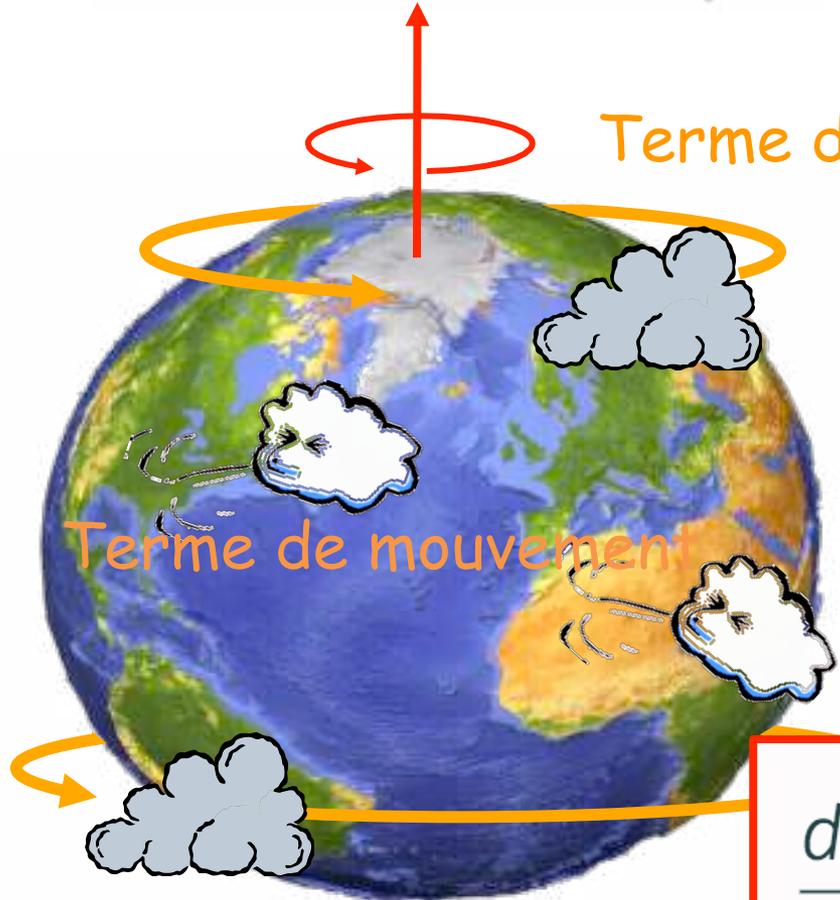
## Déformation de la Terre

- Dynamique interne
  - Flux dans le noyau
  - Convection dans le manteau
  - Séismes
- Forces externes
  - Forces de marées (Lune, Soleil, Planètes,...)
- Atmosphère, océan, hydrologie
  - Pression à la surface

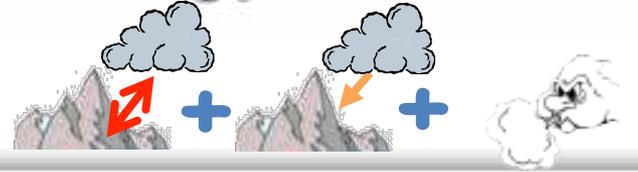
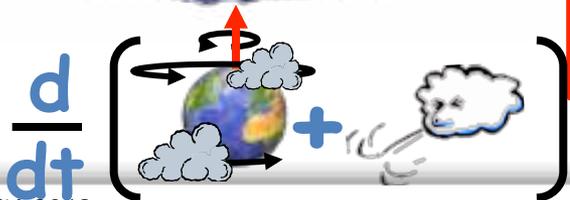
# L'effet d'un fluide extérieur

## Moment cinétique

## Moment de Force



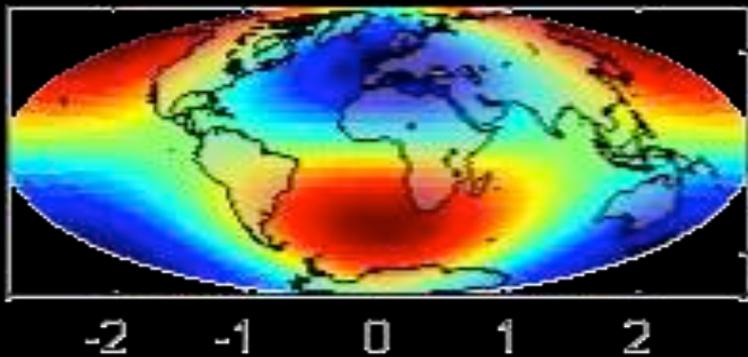
$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{\Gamma}$$



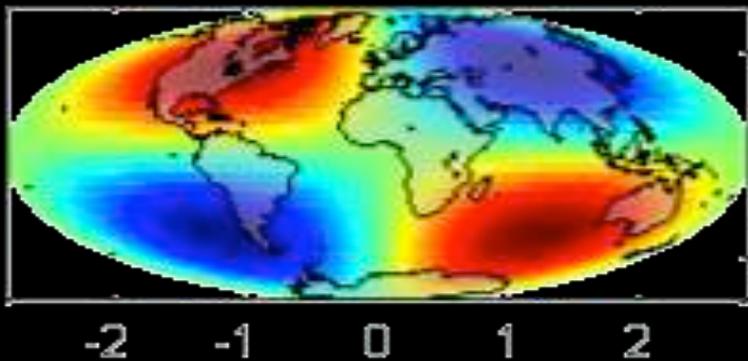
### Causes (3)

Le moment cinétique des couches fluides  
Terme de matière

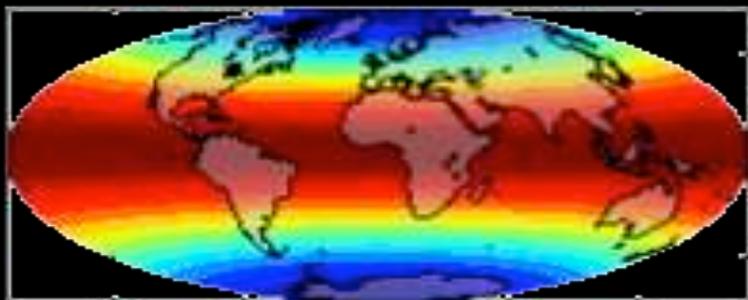
X



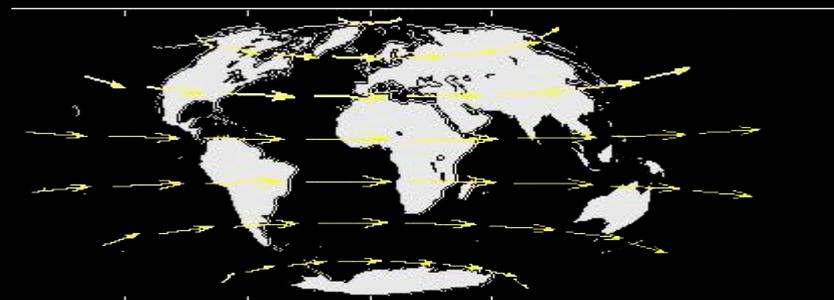
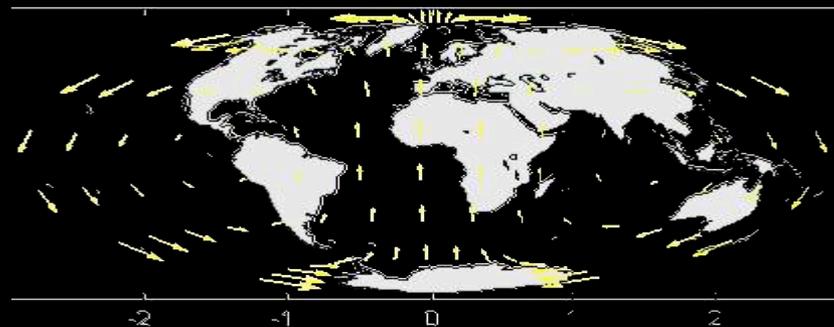
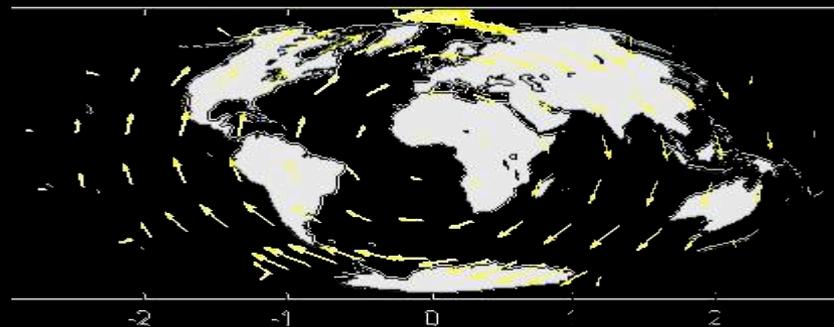
Y



Z

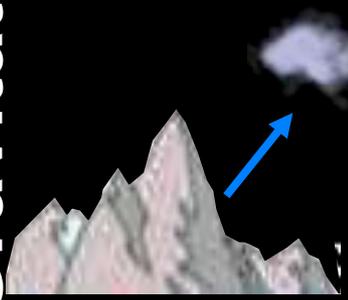


Terme de mouvement

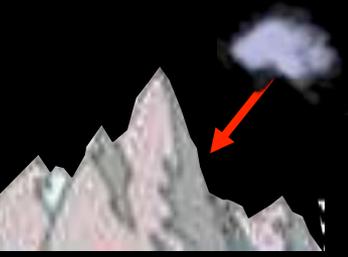


# Moments de force d'interaction

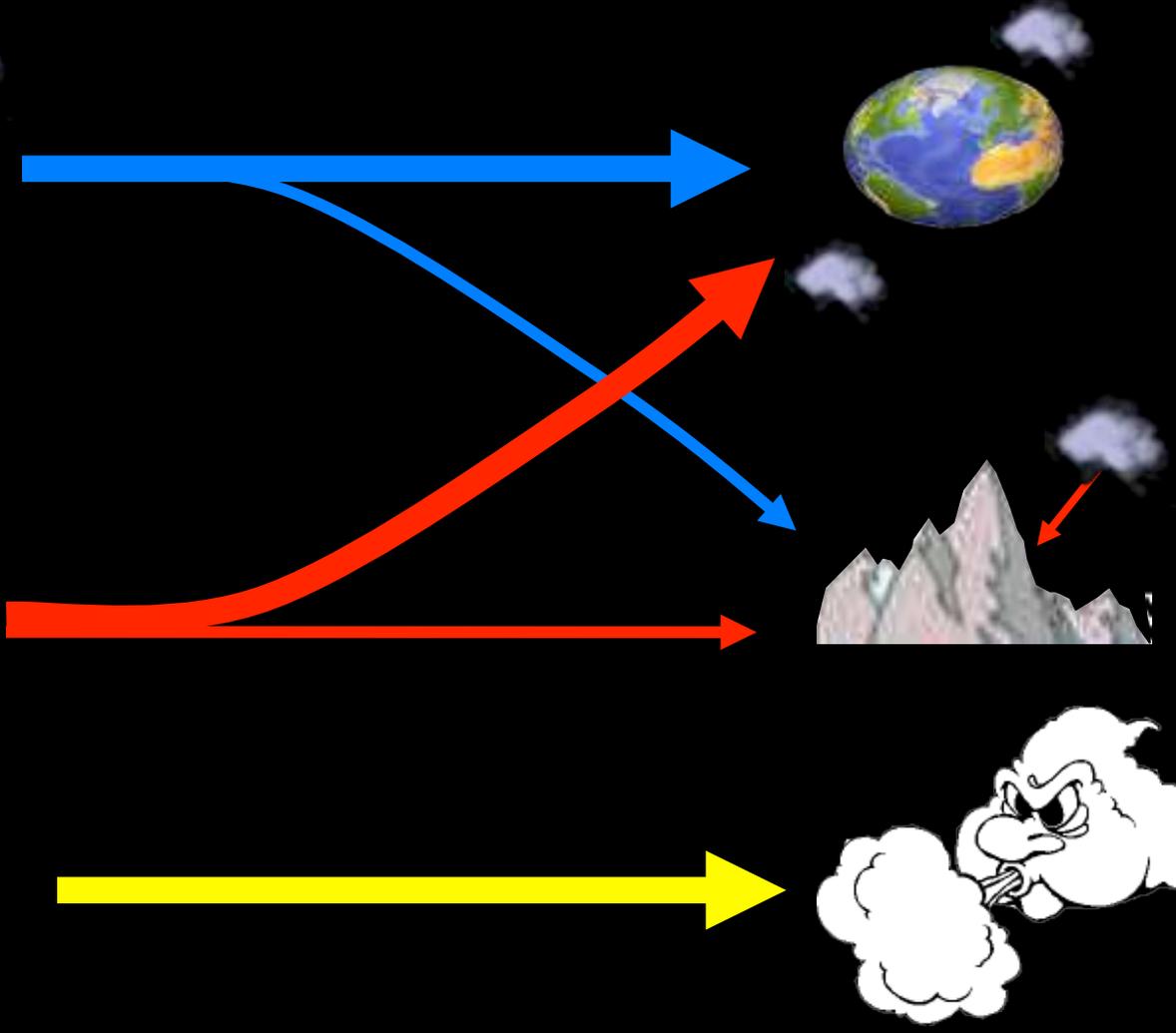
Gravitation



Pression



Friction



Ellipsoïde Montagne Friction



# Bilan de moment cinétique équatorial

$$\frac{d}{dt} \left( \text{Earth} + \text{Clouds} \right) = \text{Earth} + \text{Mountains} + \text{Clouds}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \text{Earth} + \text{Clouds} \right) + \Omega \times \left( \text{Earth} + \text{Clouds} \right) = \text{Earth} + \text{Mountains} + \text{Clouds}$$

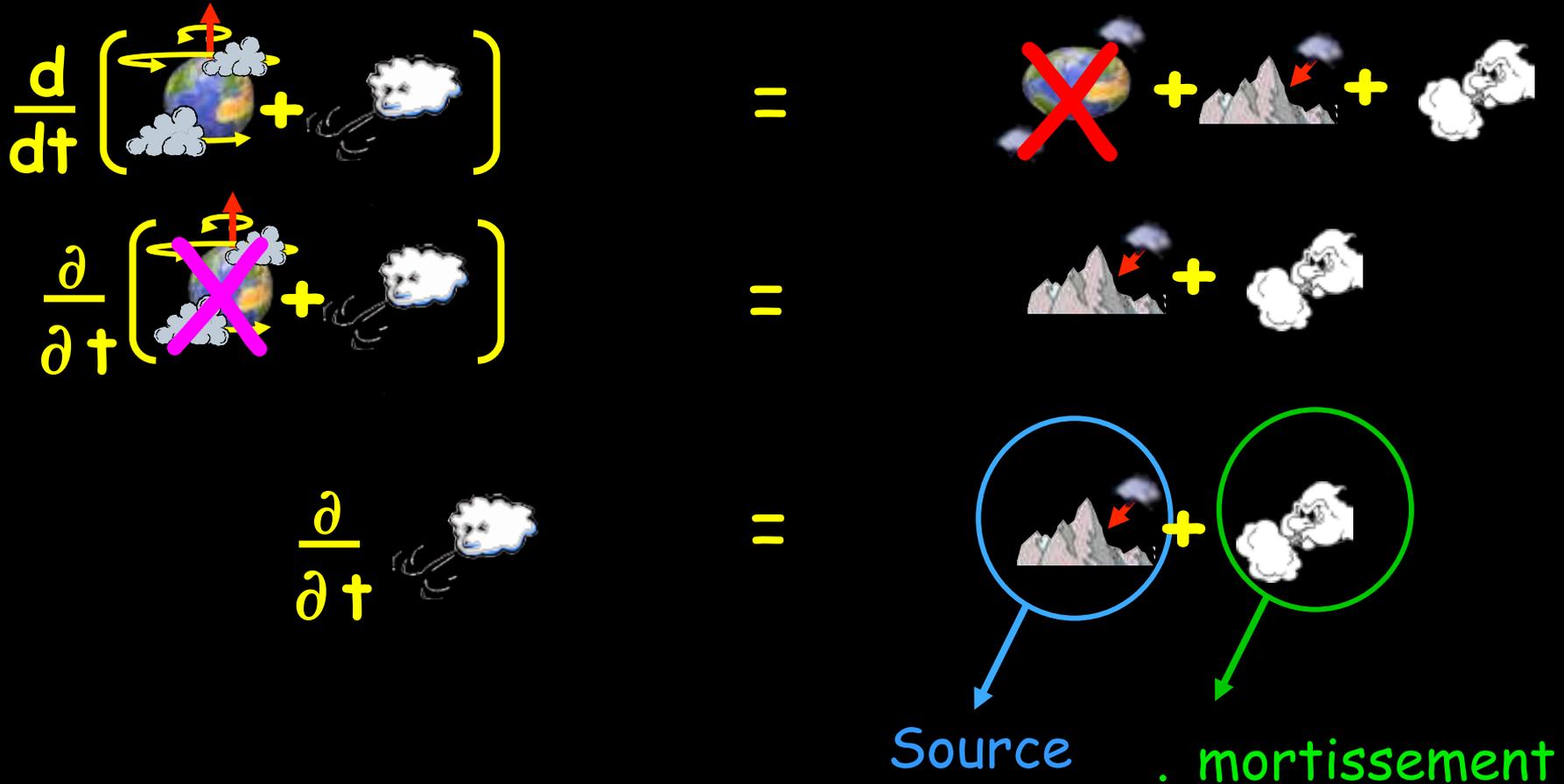
$$\frac{\partial}{\partial t} \text{Earth} + \Omega \times \text{Earth} = \text{Earth}$$

A échelle synoptique

$$\Omega \times \text{Earth} = \text{Earth}$$

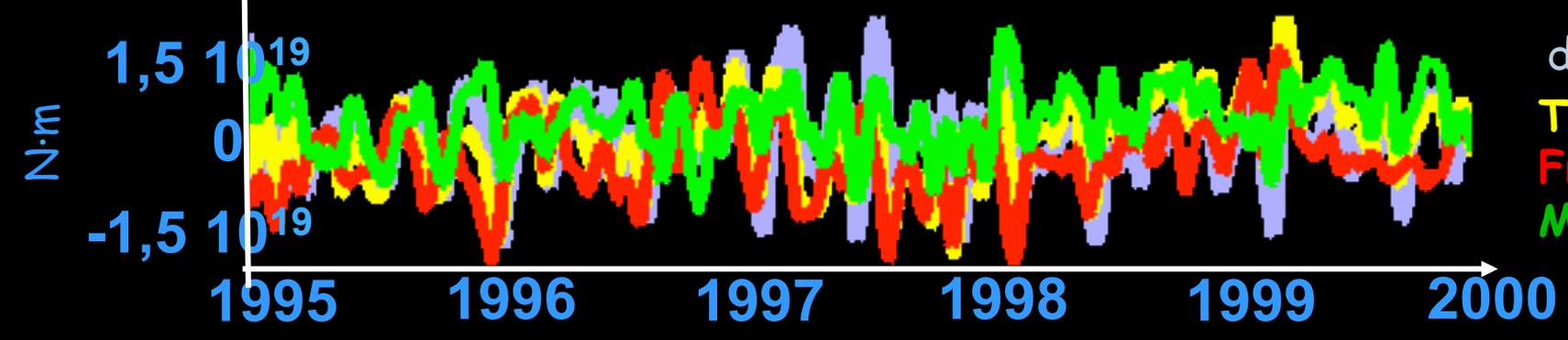
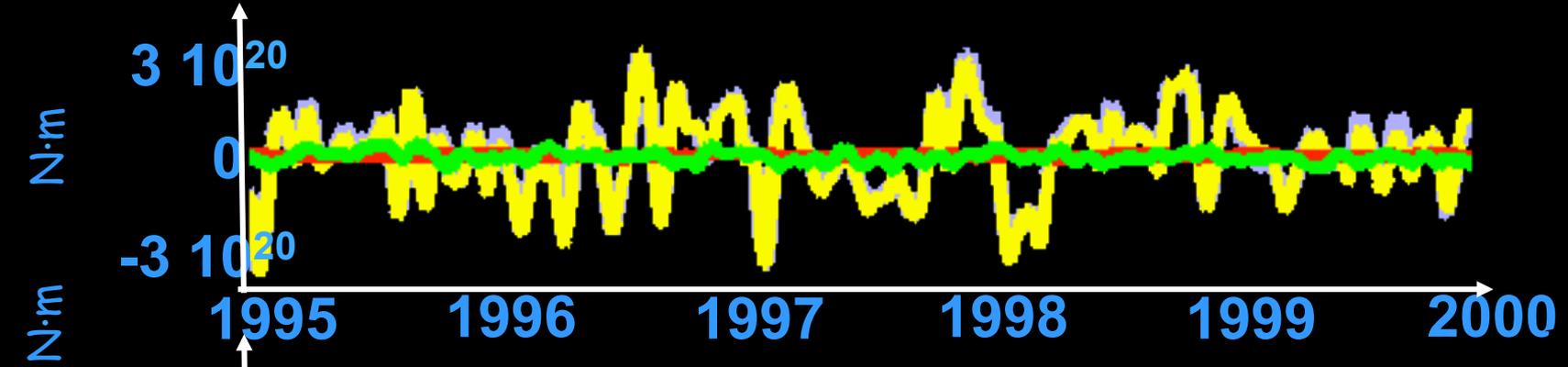
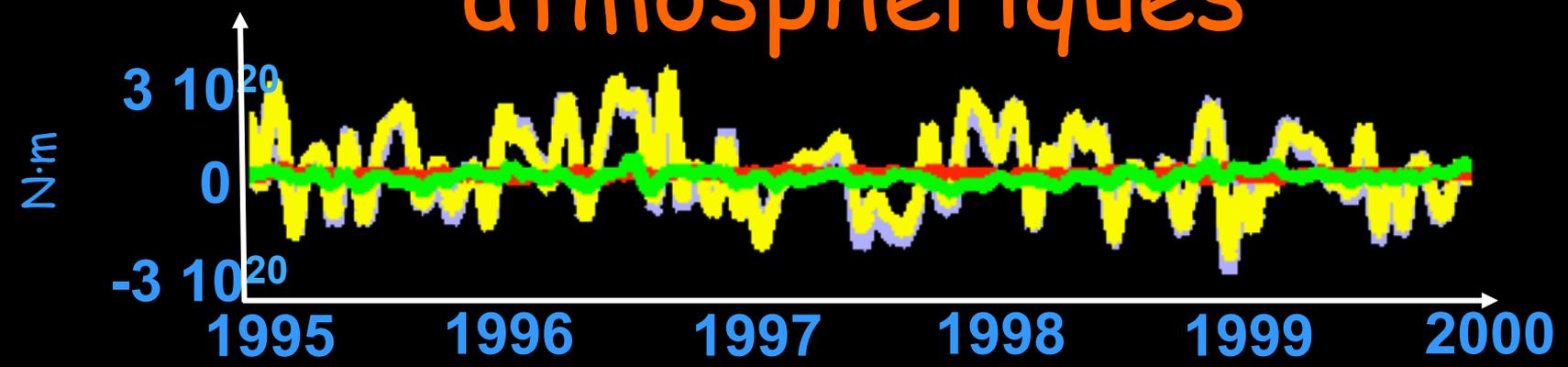
$$\Omega \times \text{Earth} = \Omega \times \text{Earth}$$

# Bilan de moment cinétique : axial



Quelques exceptions : annuel,  
certains évènements El-Nino

# Moments de forces atmosphériques



$dAAM/dt$   
Total  
Friction  
Mountain

# Donc, en résumé, pour l'atmosphère

- Mouvement du Pôle
  - Moment des forces ellipsoïdal
  - Terme masse du AM
  - Bilan sans intérêt
- LOD
  - Moment des forces de Montagne et Friction
  - Terme mouvement du AM

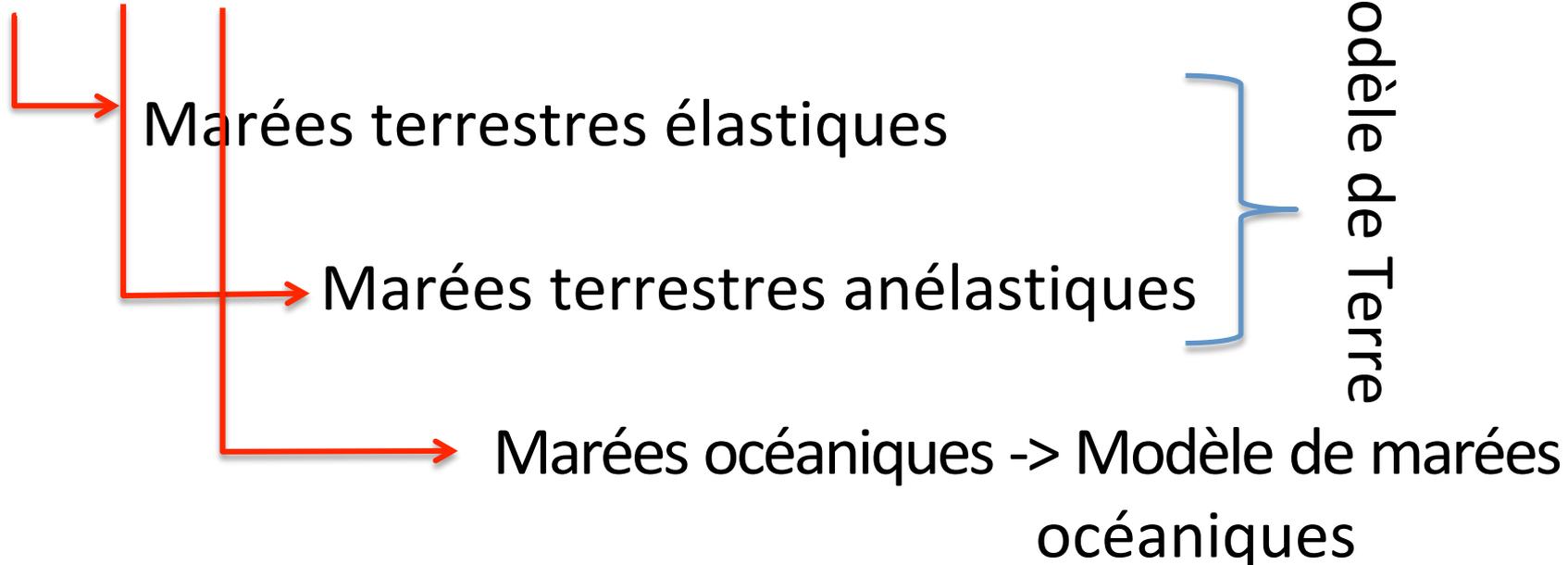
# Effet de l'océan

- Marées océaniques
  - A périodes bien définies
  - Observées et calculées précisément (en tout cas pour les ondes principales)
- Hors marées
  - Forçage friction, chaleur, eau fraîche (barocline)
  - Forçage pression atmosphérique (barotrope)

# Effet des marées sur le LOD

$$\Delta\Lambda = \kappa\Lambda_0 \frac{C^{ste}}{C} V_0$$

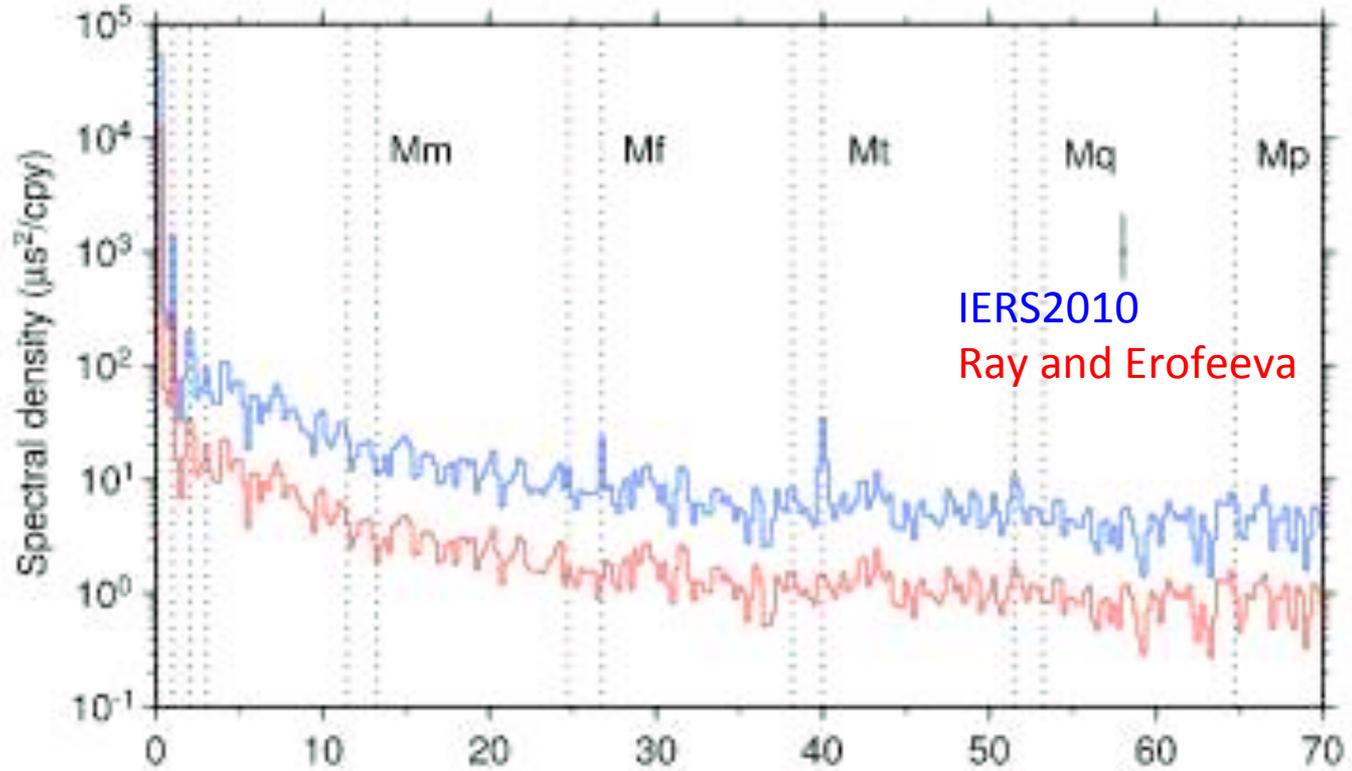
$$\kappa = \kappa_e + \kappa_a + \kappa_o$$



Doodson Argument							$\pi/2$	Period (d)	$V_0/g$ (cm)	UT(cos) ( $\mu$ s)	UT(sin) ( $\mu$ s)	$\Delta\Lambda(\cos)$ ( $\mu$ s)	$\Delta\Lambda(\sin)$ ( $\mu$ s)	Re $\kappa$	Im $\kappa$
$\tau$	$s$	$h$	$p$	$N'$	$p_s$										
0	0	0	0	1	-2	0	6810.443	0.00011	0.07	-7.03	0.006	0.000	0.3334	-0.0034	
0	0	0	0	1	0	2	6798.405	2.79288	1764.00	-172958.94	159.851	1.630	0.3334	-0.0034	
0	0	0	0	2	0	0	3399.202	0.02726	8.46	-840.24	1.553	0.016	0.3319	-0.0033	
0	0	0	1	0	-1	0	3232.828	0.00014	0.04	-4.22	0.008	0.000	0.3318	-0.0033	
0	0	0	2	1	0	2	1305.483	0.00379	0.47	-44.55	0.214	0.002	0.3300	-0.0035	

0.3296	-0.0035
0.3277	-0.0041
0.3275	-0.0042
0.3274	-0.0042

Sa

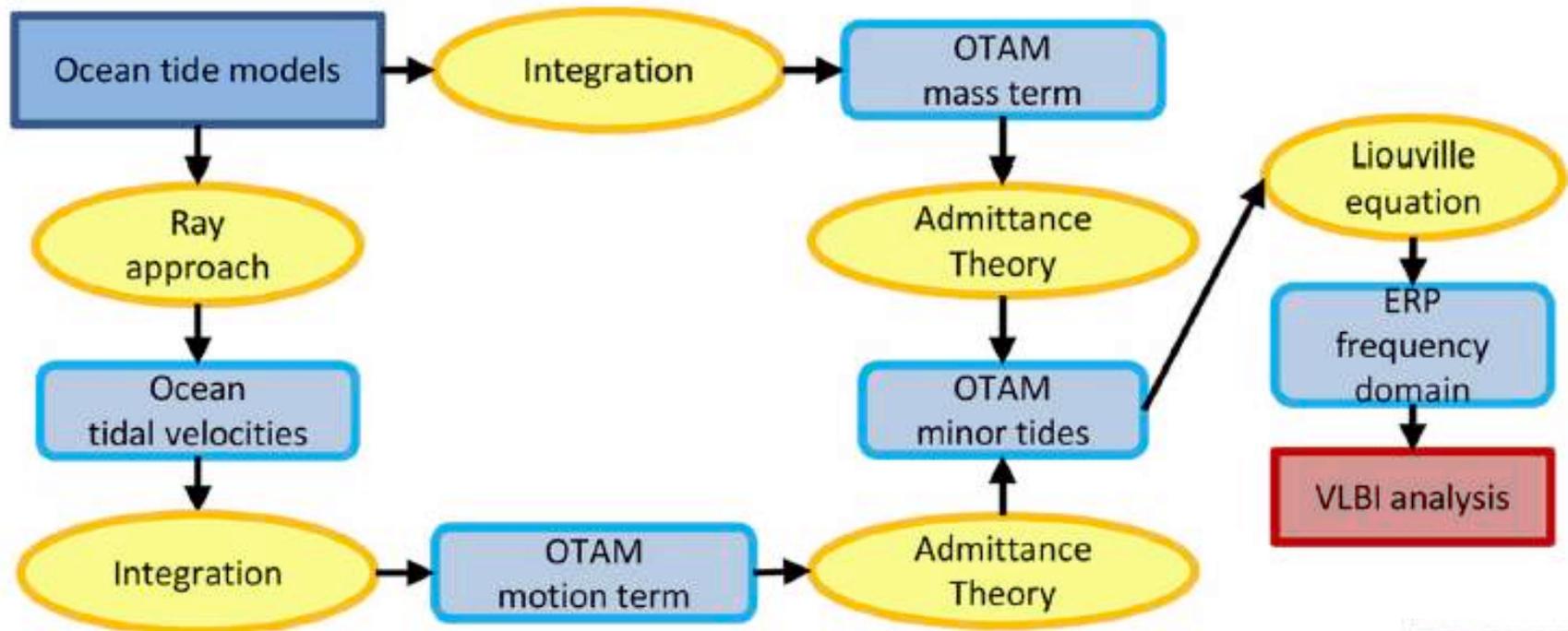


IERS2010  
Ray and Erofeeva

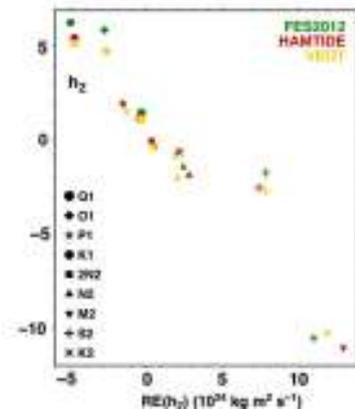
	$\tau$
MSq	0
	0
	0
Mq	0
	0
	0
MSp	0
	5
	0
	5
	0
	5
	0
	5
	0
	6

Re $\kappa$	Im $\kappa$
0.3005	-0.0238
0.3005	-0.0238
0.3005	-0.0238
0.2998	-0.0238
0.2998	-0.0238
0.2966	-0.0233
0.2961	-0.0231
0.2961	-0.0231
0.2957	-0.0230
0.2957	-0.0230
0.2946	-0.0222

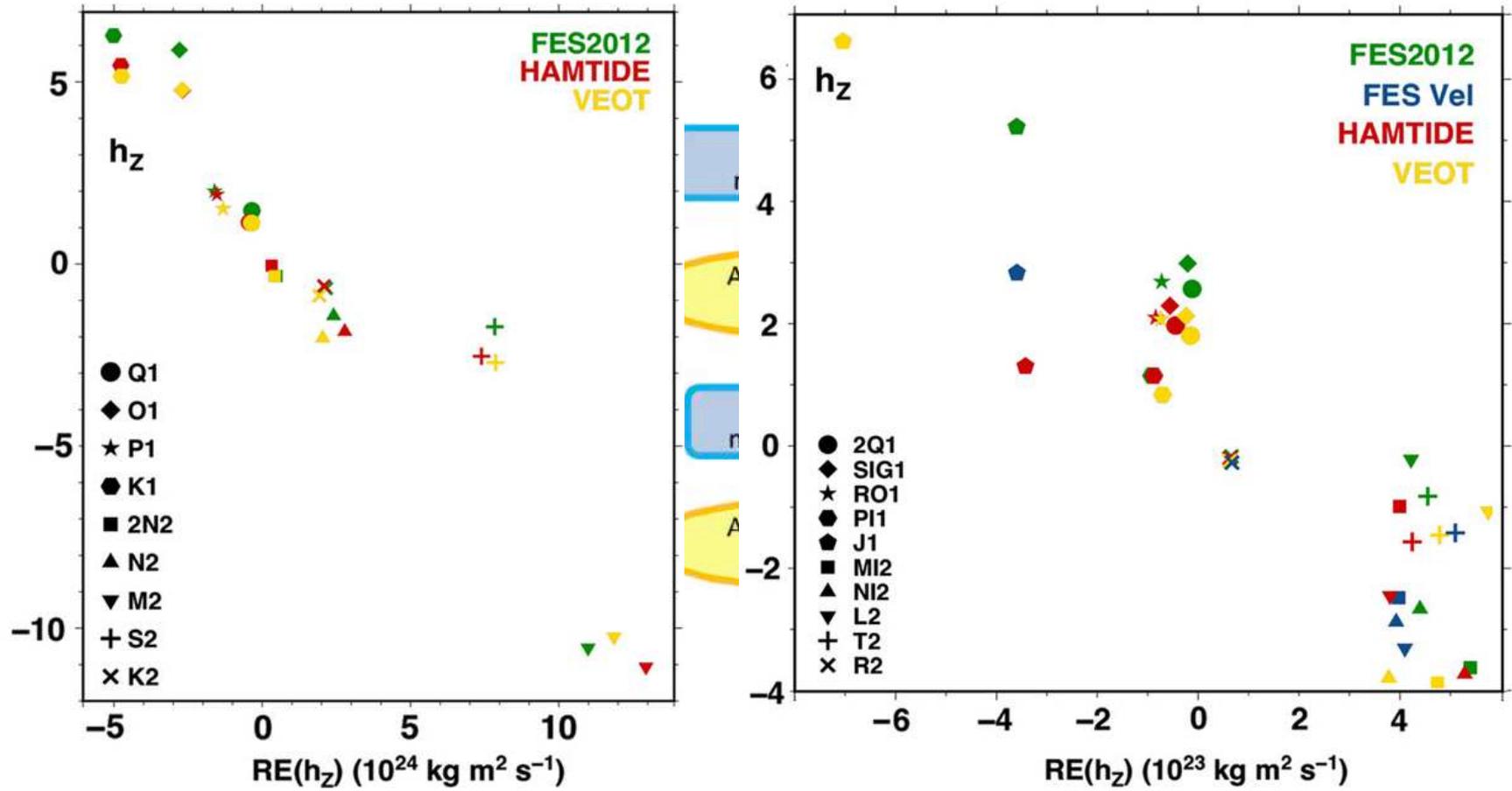
# Effet des marées océanique sur la rotation de la Terre



Karbon et al., 2018



# Effet des marées océanique sur la rotation de la Terre



## Non marée, hors pression atmosphérique

- En gros, on ne sait pas faire dans le domaine temporel, sauf exception:
  - On fait à peu près bien le cycle saisonnier (Gross et al. 2003, 2004)
  - On arrive de temps en temps à observer une signature océanique (Marcus et al., 2012) en LOD
- On n'est pas trop mal dans le domaine spectral.
- Pas de mise en évidence claire des modes climatiques majeurs

# Baromètre inversé et rotation de la Terre: fonctions d'excitation IB

- Le but est d'estimer l'effet de l'océan et de l'atmosphère en n'utilisant uniquement des données atmosphériques.
- Comme seule la pression est considérée, cette méthode peut être utilisée en plus d'un modèle océanique qui n'inclut pas le forçage « pression ».

# La réponse à la pression atmosphérique

Baromètre non-inversé



# La réponse à la pression atmosphérique

Baromètre inversé



La pression est la même en  
chaque point d'une profondeur  
donnée.

**!!! Cela ne veut PAS dire que la pression est constante au cours du temps !!!**

# La réponse à la pression atmosphérique

Baromètre inversé amélioré



Equilibre entre pression de l'air,  
de l'eau et déformation.  
(thèse de P. Gegout)

**!!! Cela ne veut PAS dire non plus que la pression est constante au cours du temps !!!**

## Baromètre inversé et rotation de la Terre: fonction d'excitation IB

- La pression sur chaque point de l'océan est la pression moyenne sur l'océan.
- La pression sur les continents est n'est pas impactée par l'hypothèse IB.

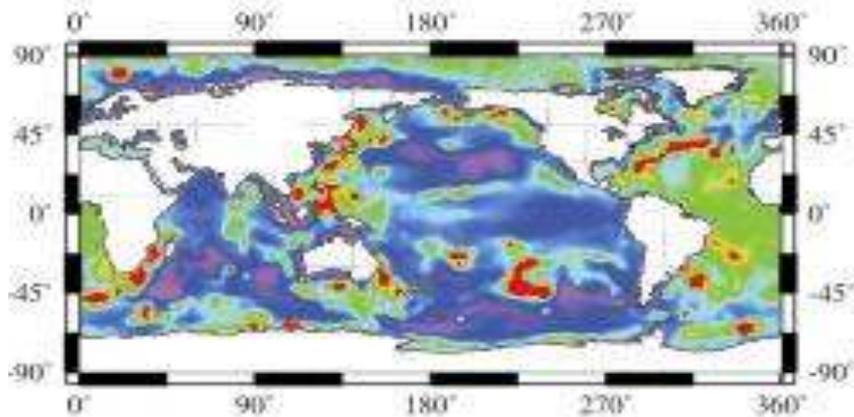
### Terme de masse

- Il n'y a pas de mouvement dans l'océan associé au forçage de pression.

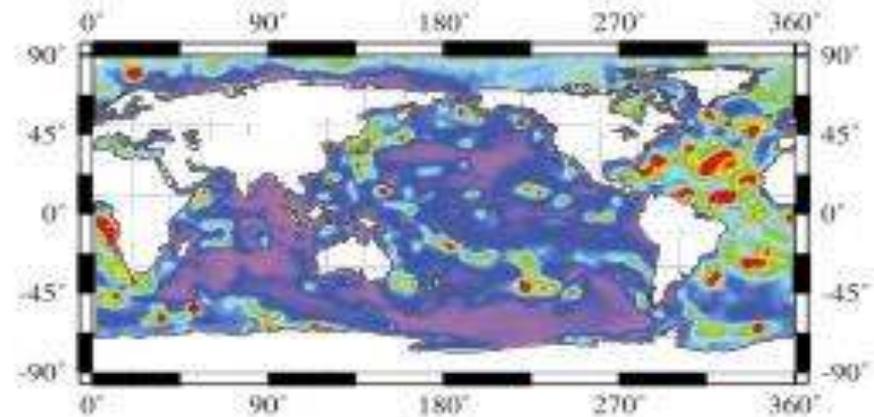
### Terme de mouvement

# Ecart au baromètre inversé

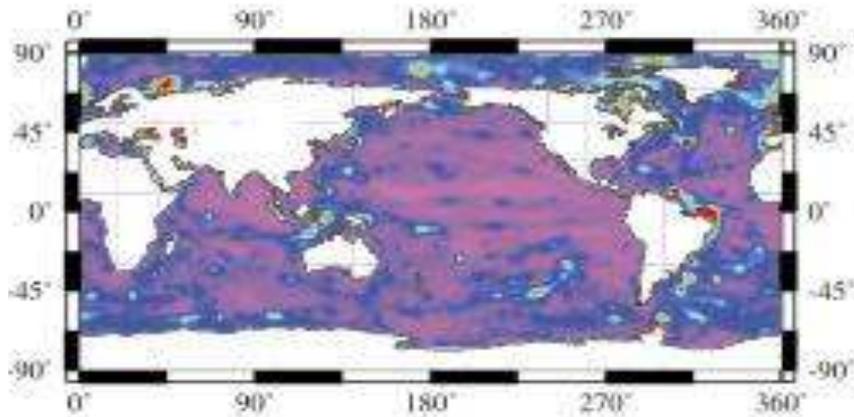
OBP



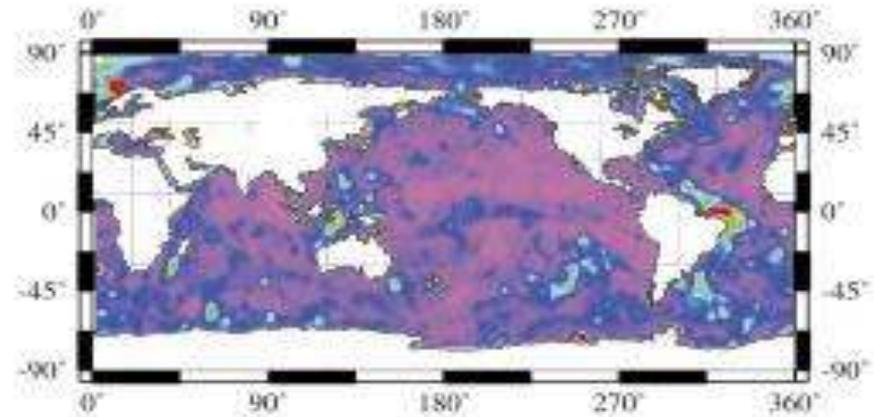
SSH



U current



V current

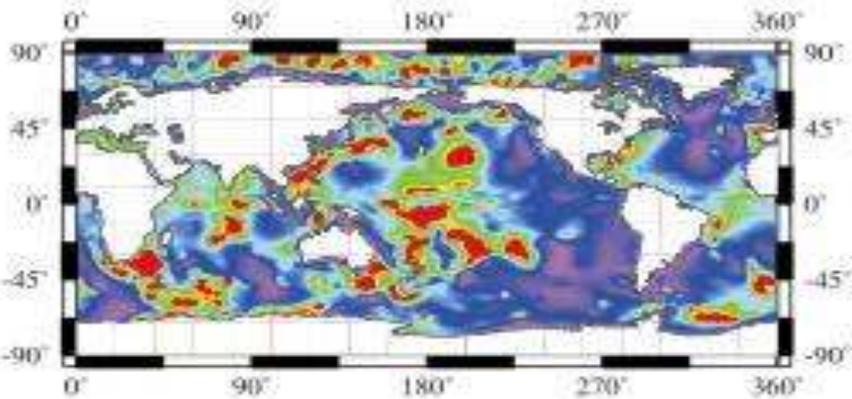


60 jour

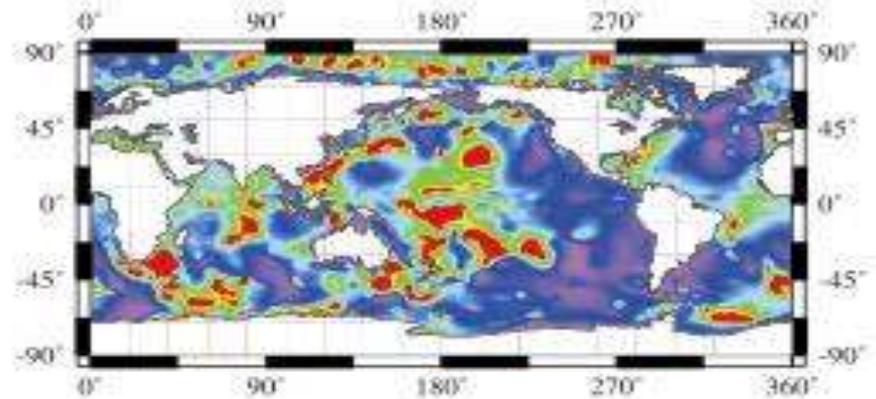
de Viron et al. 2004

# Déviations par rapport à la réponse IB

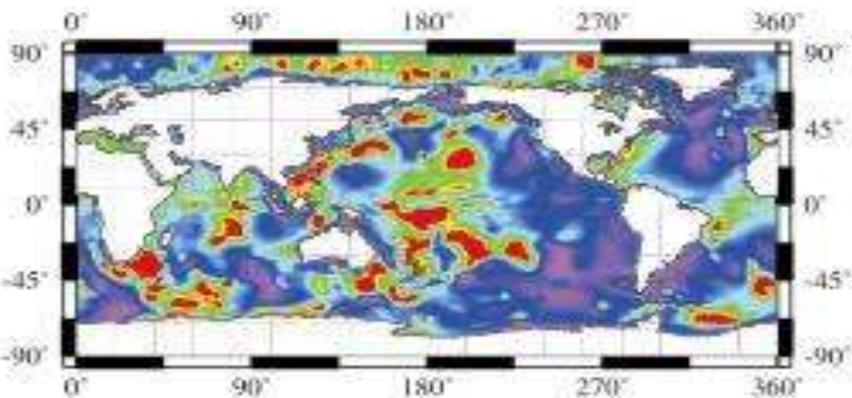
OBP



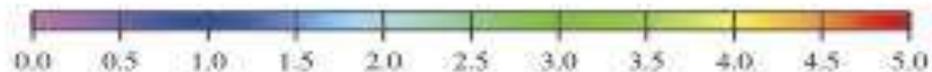
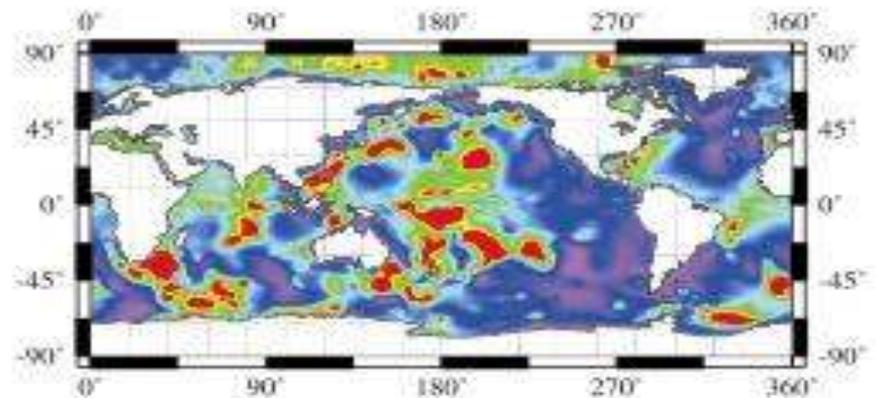
SSH



U current

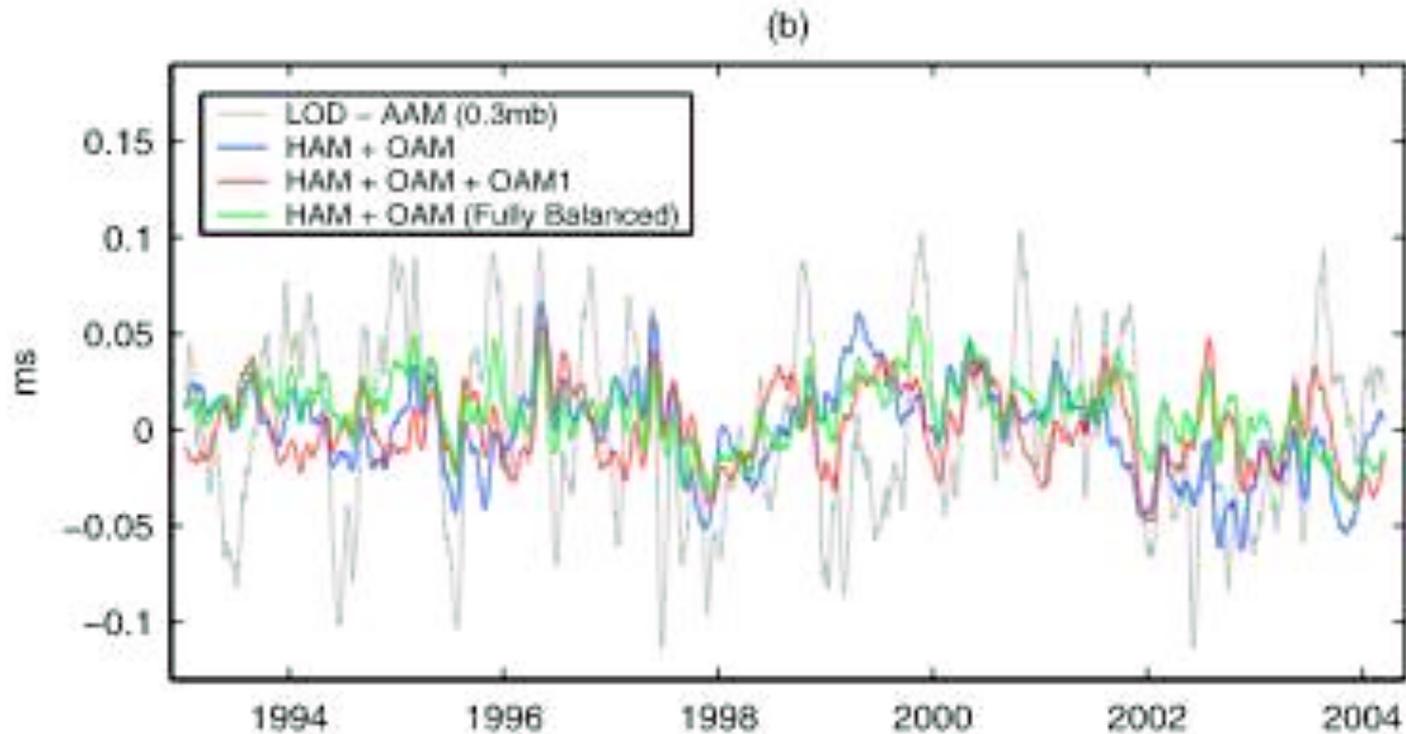


V current



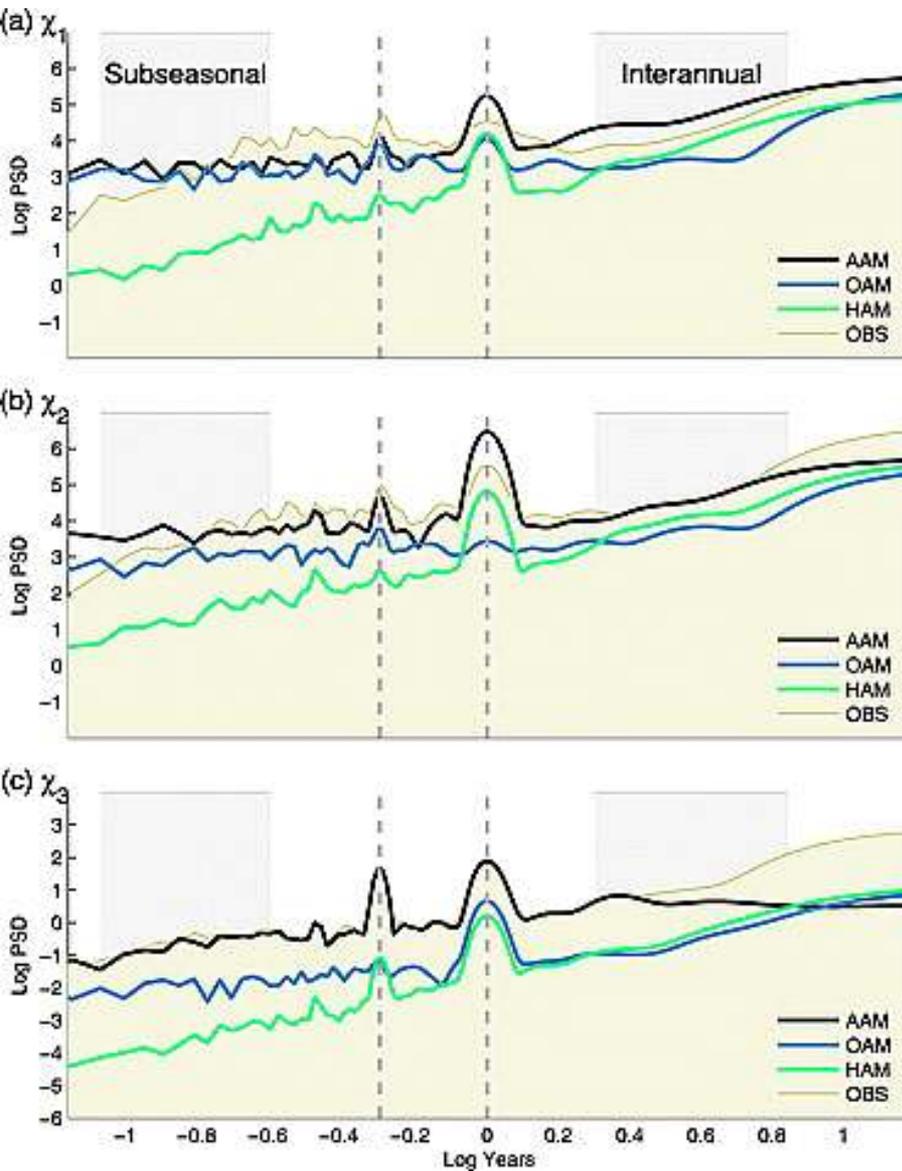
1 jour

# Et l'hydrologie, là-dedans?



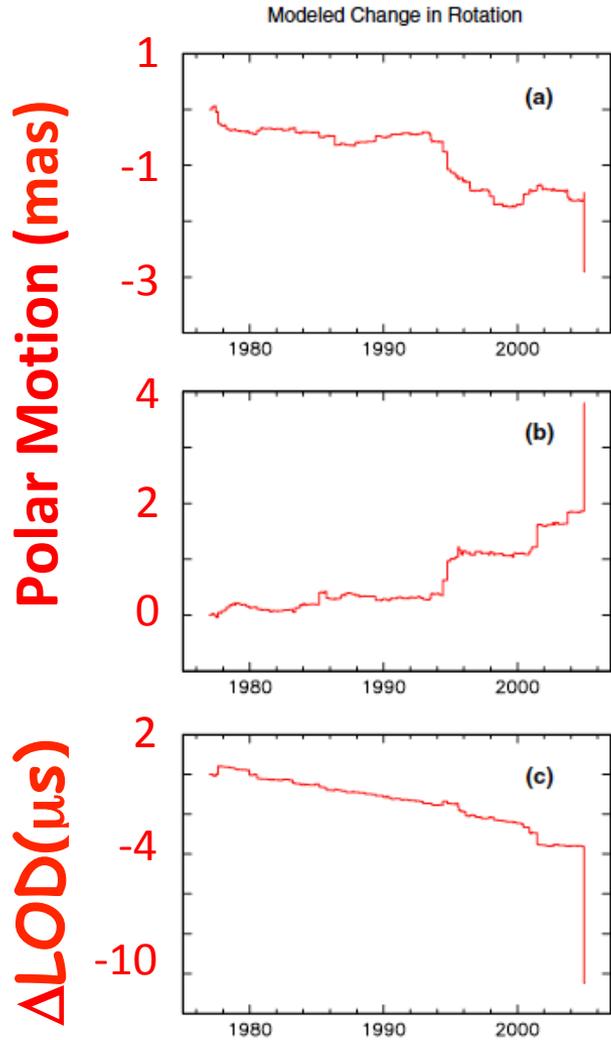
Problème de conservation de la masse.

# Comparaison avec l'excitation géodésique

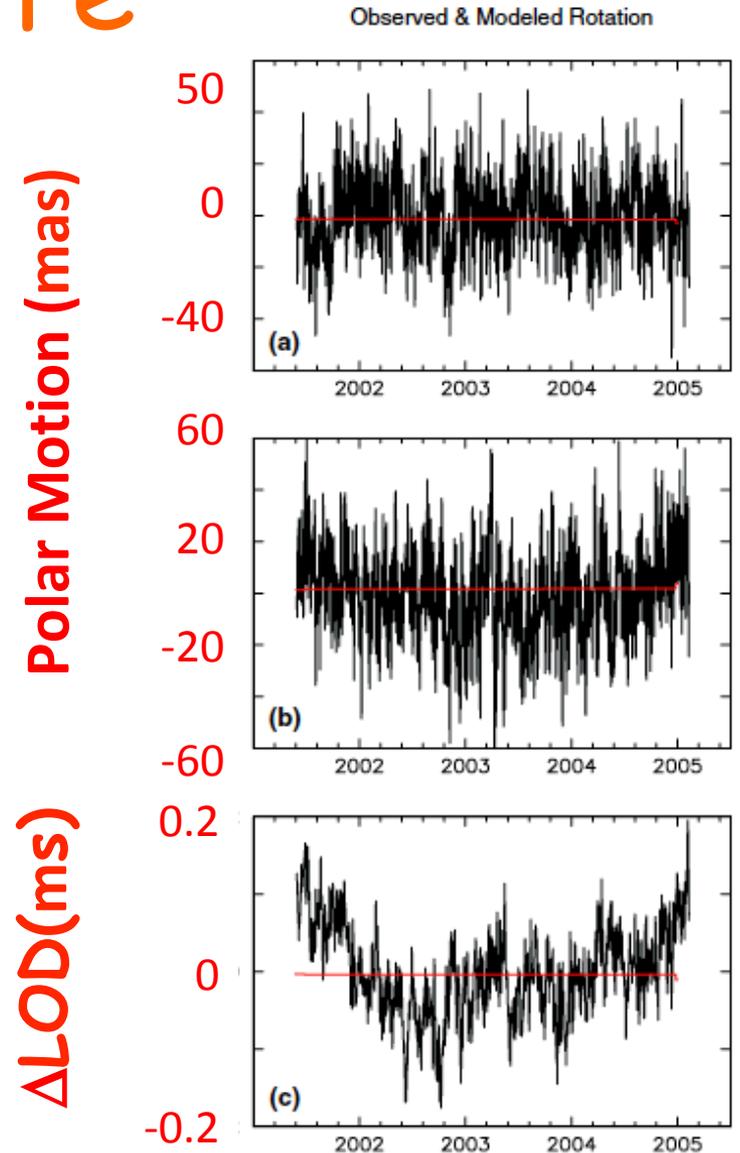


Neeff and Matthes, 2012

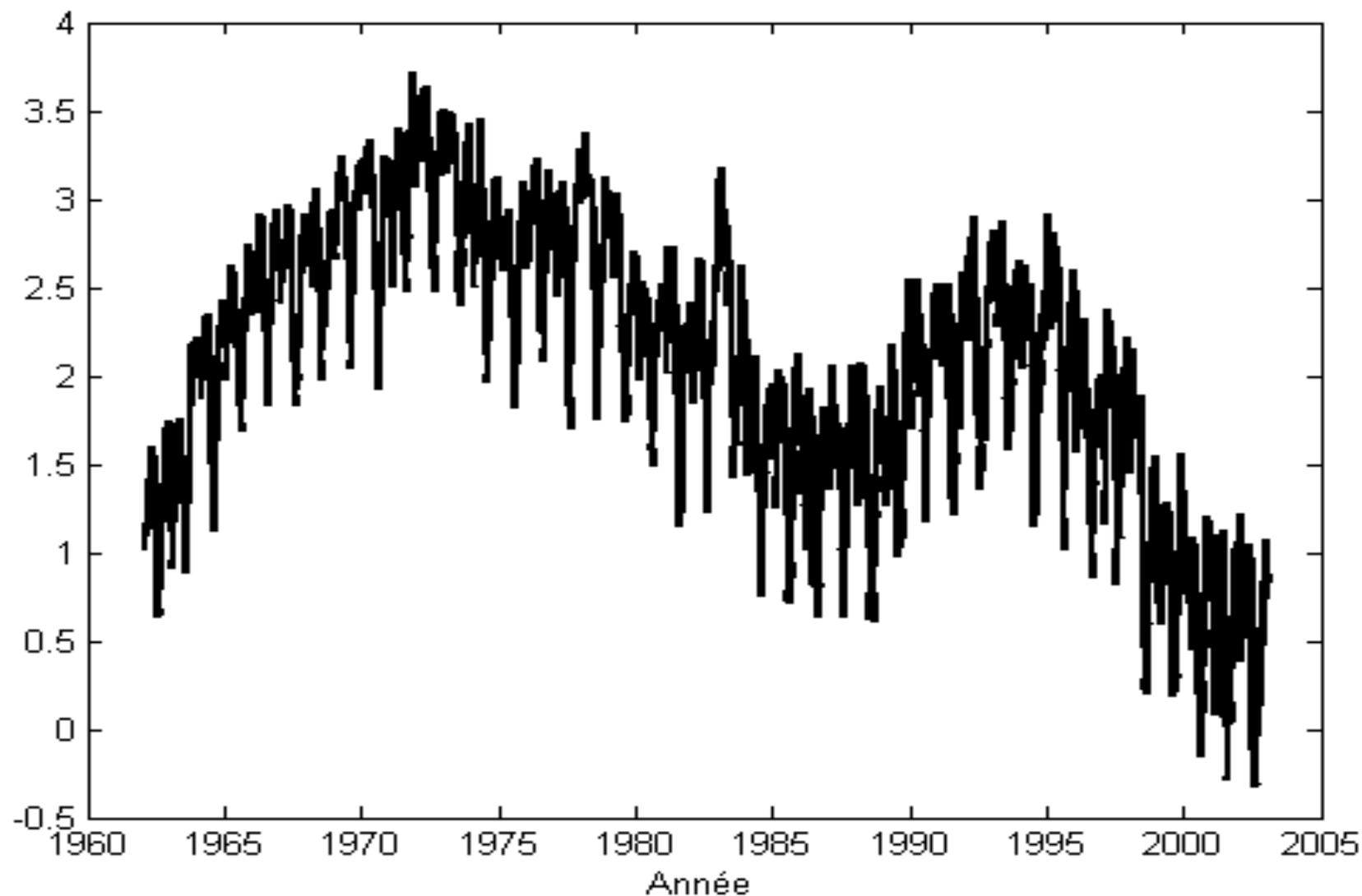
# Autres effets: les tremblements de Terre



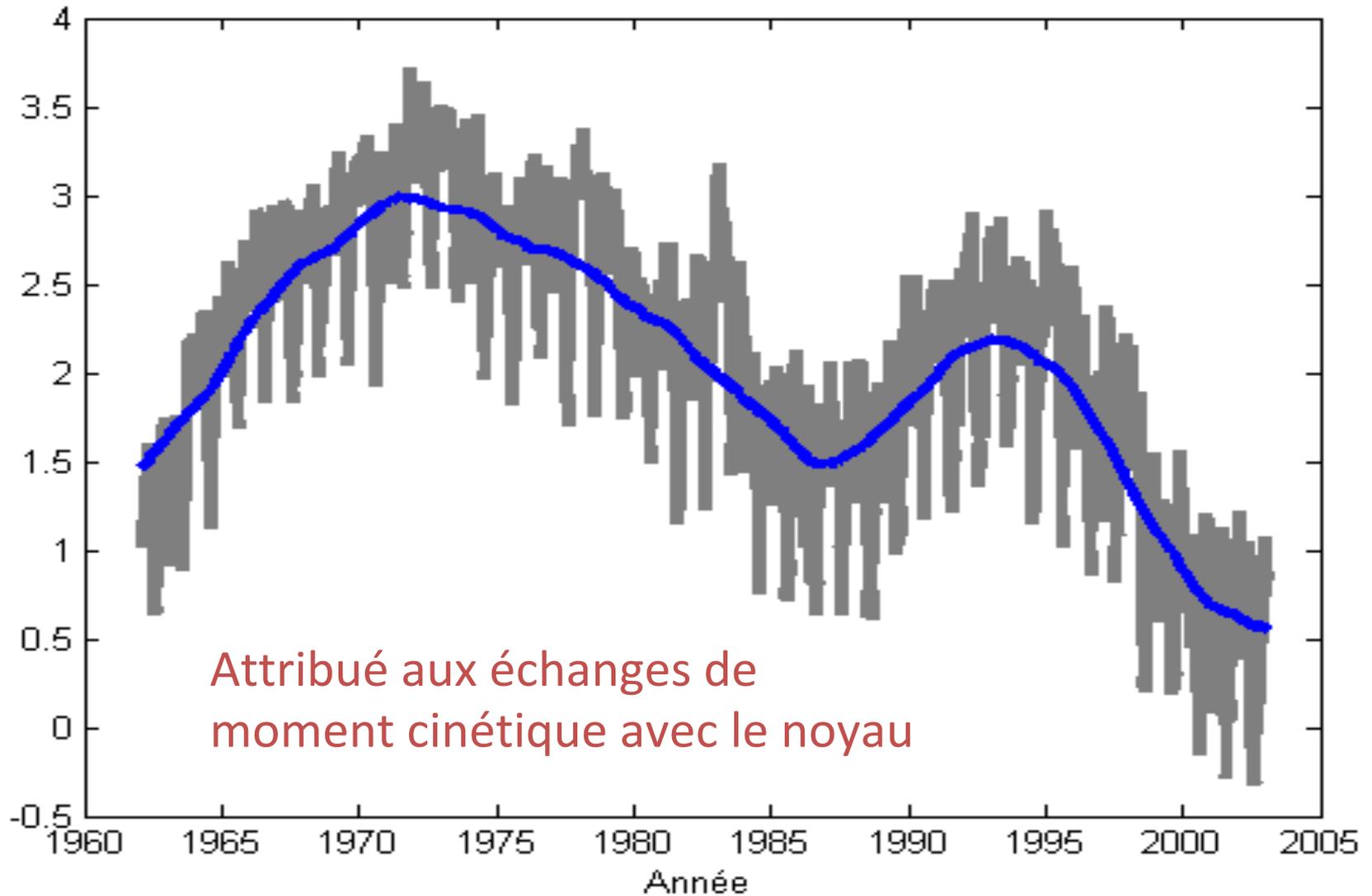
Gross et Chao 2006



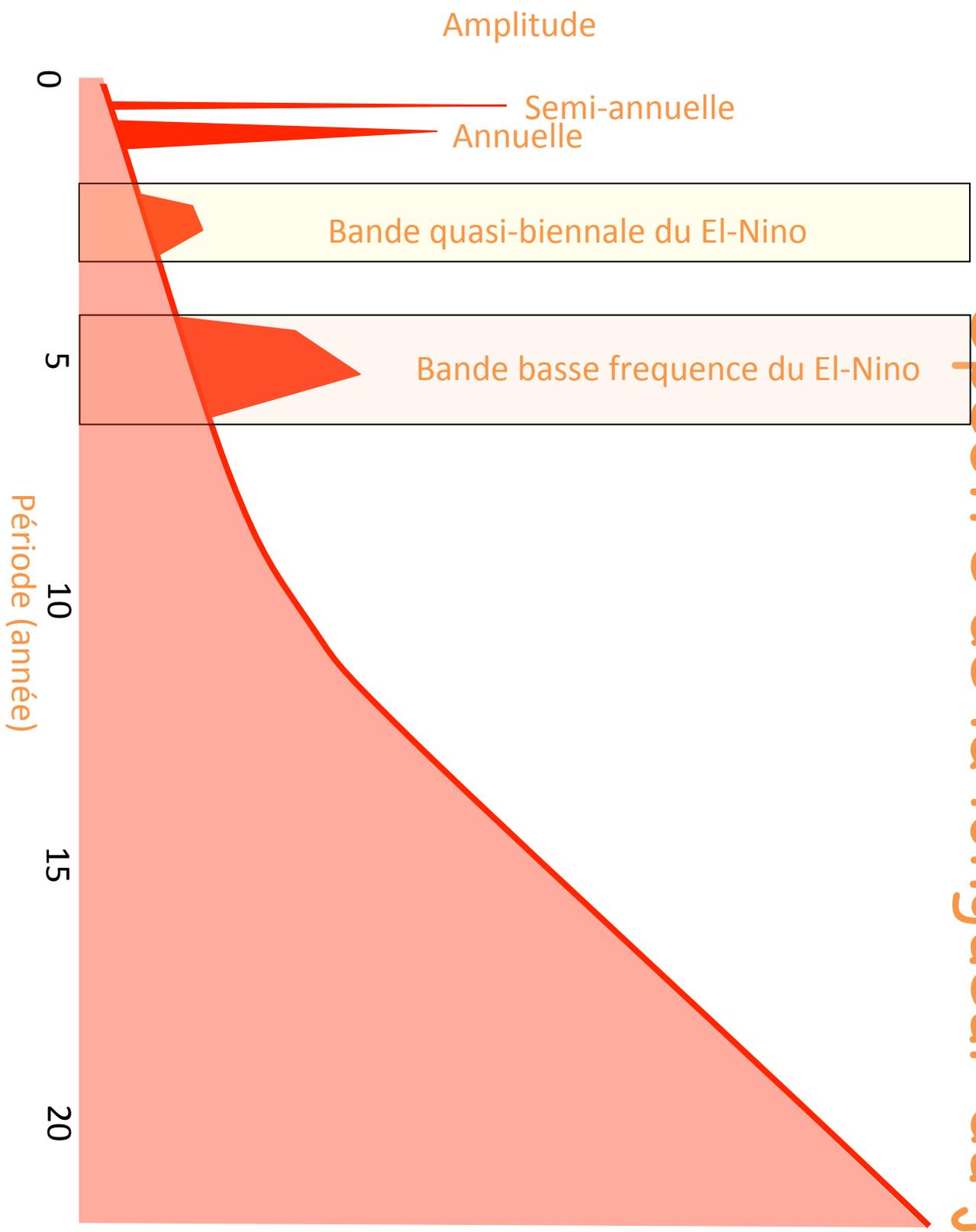
# Variations de la longueur du jour



# Variations de la longueur du jour



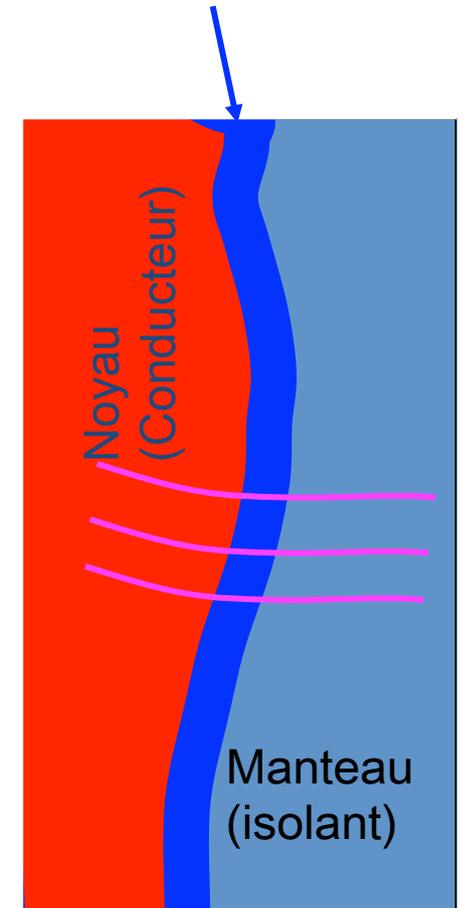
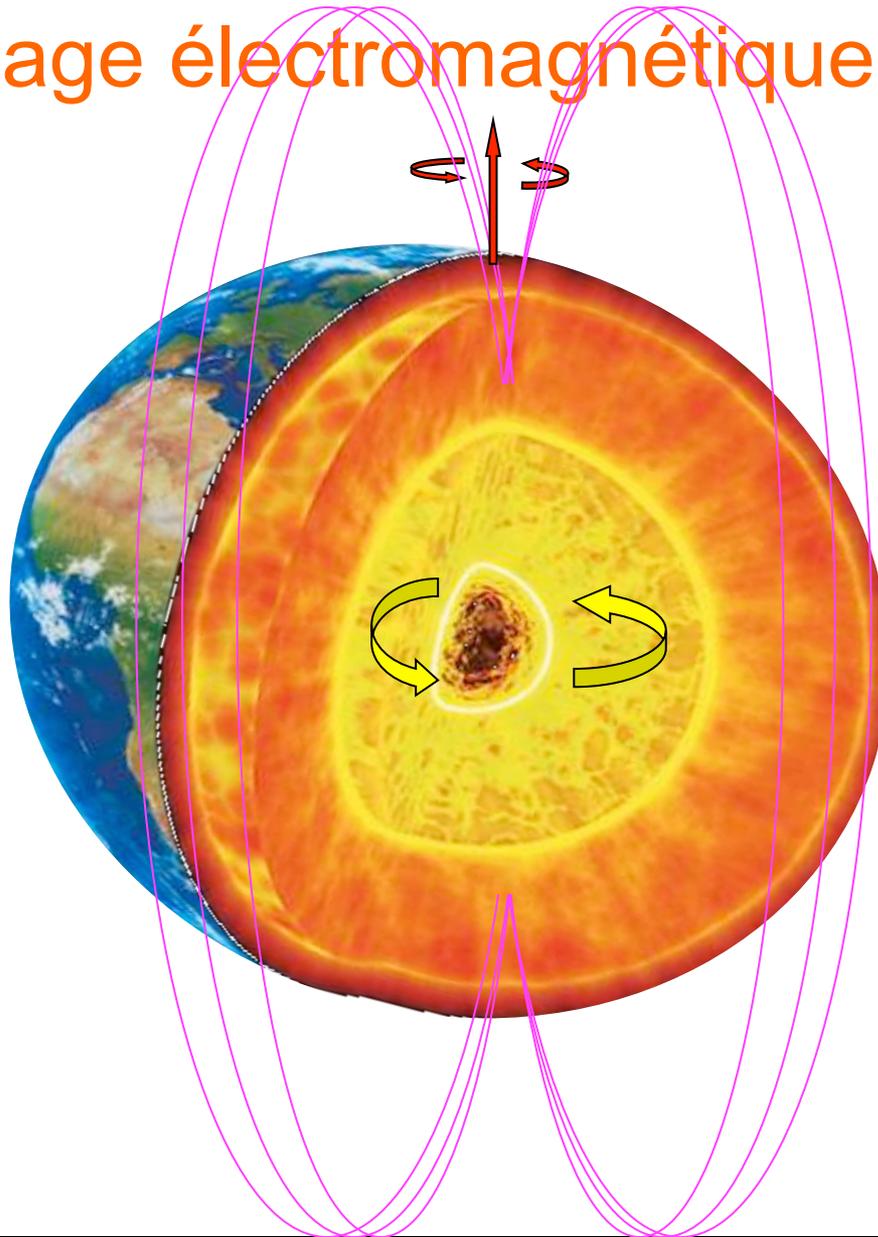
# Spectre de la longueur de jour



# Couplage noyau-manteau

Couplage électromagnétique

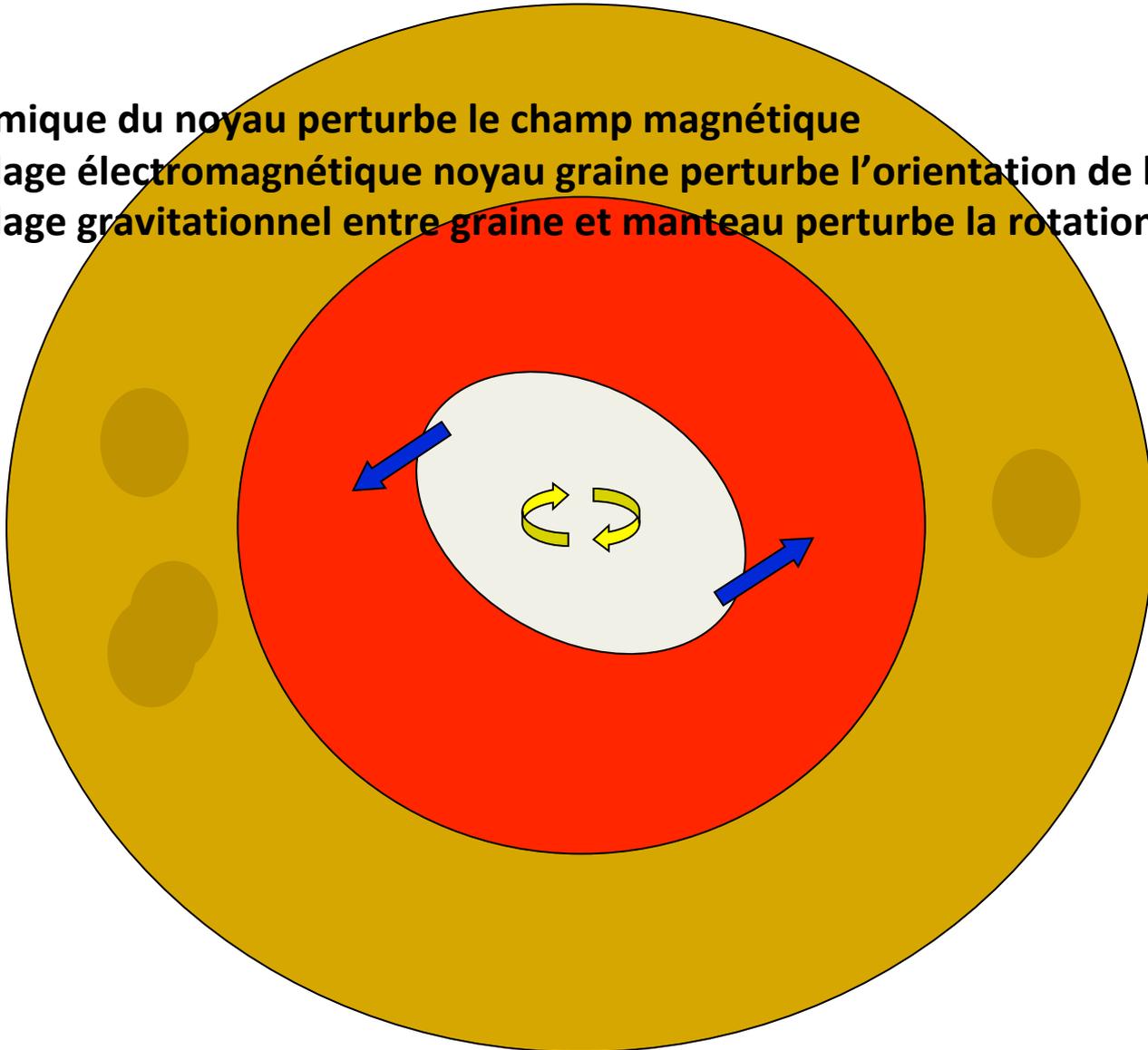
Couche conductrice



# Le “lock” gravitationnel de la graine

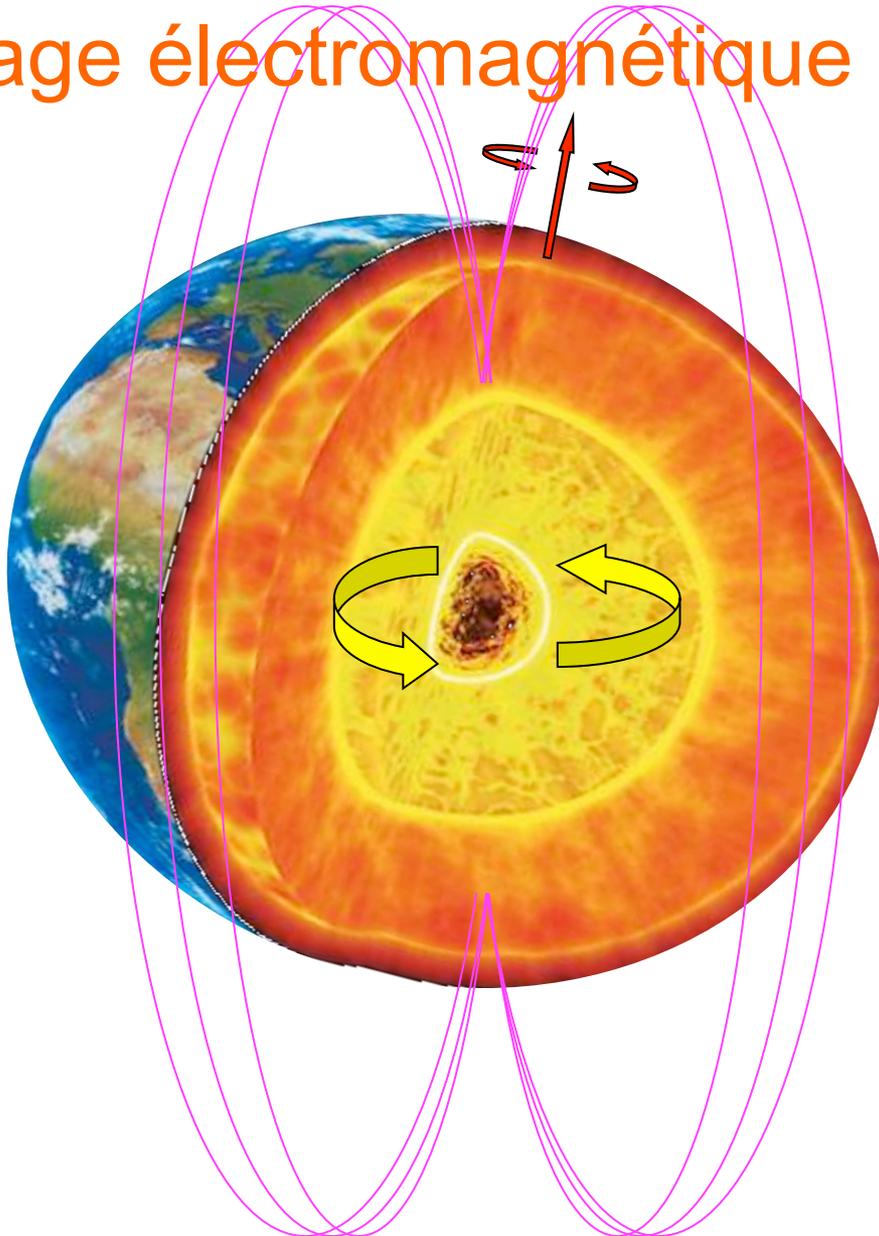
Idée:

- La dynamique du noyau perturbe le champ magnétique
- Le couplage électromagnétique noyau graine perturbe l'orientation de la graine
- Le couplage gravitationnel entre graine et manteau perturbe la rotation de la Terre.

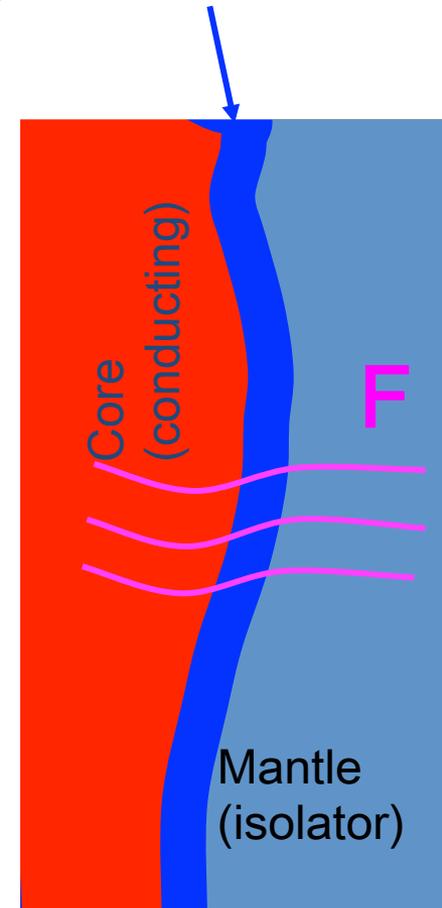


# Couplage noyau-manteau

Couplage électromagnétique

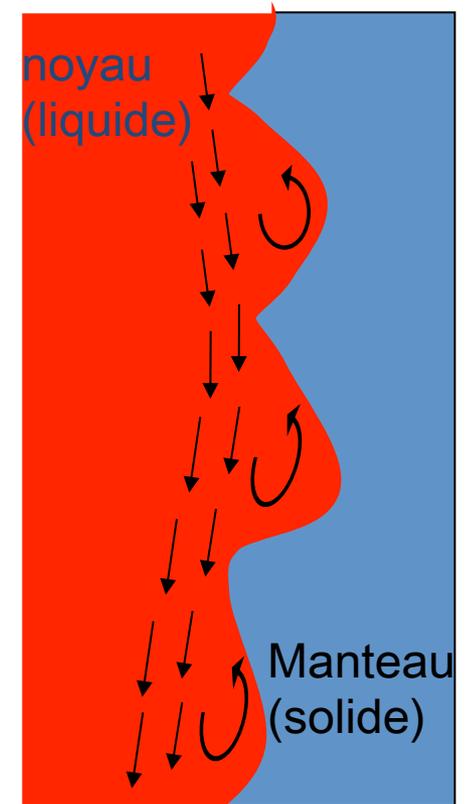
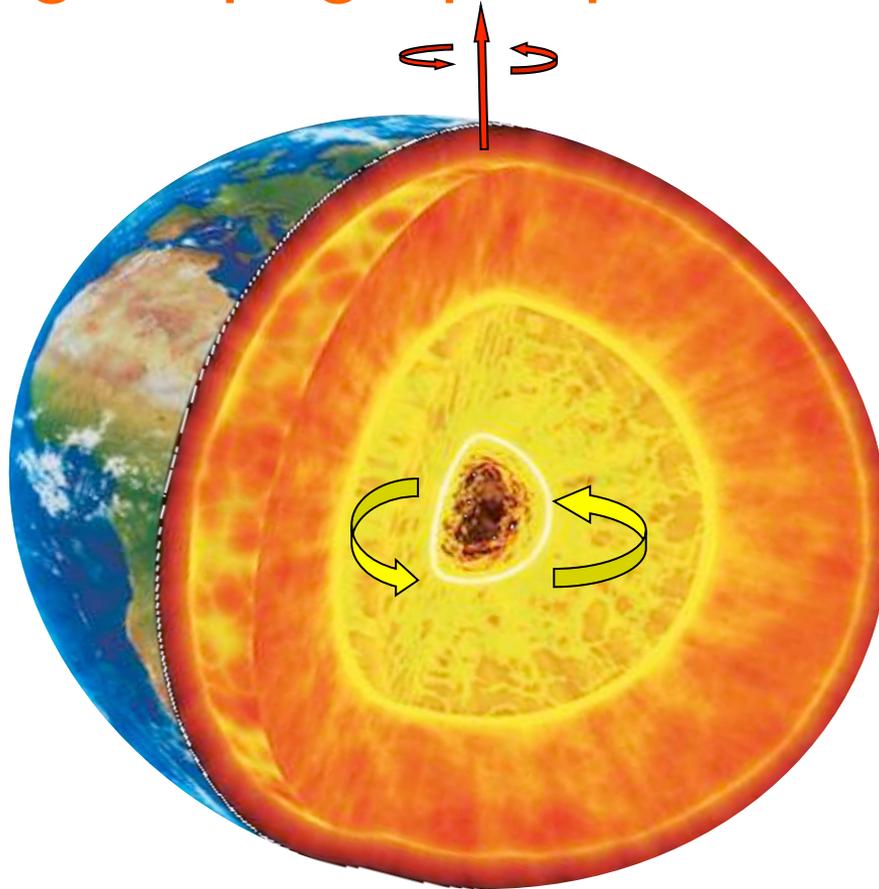


Conducting layer



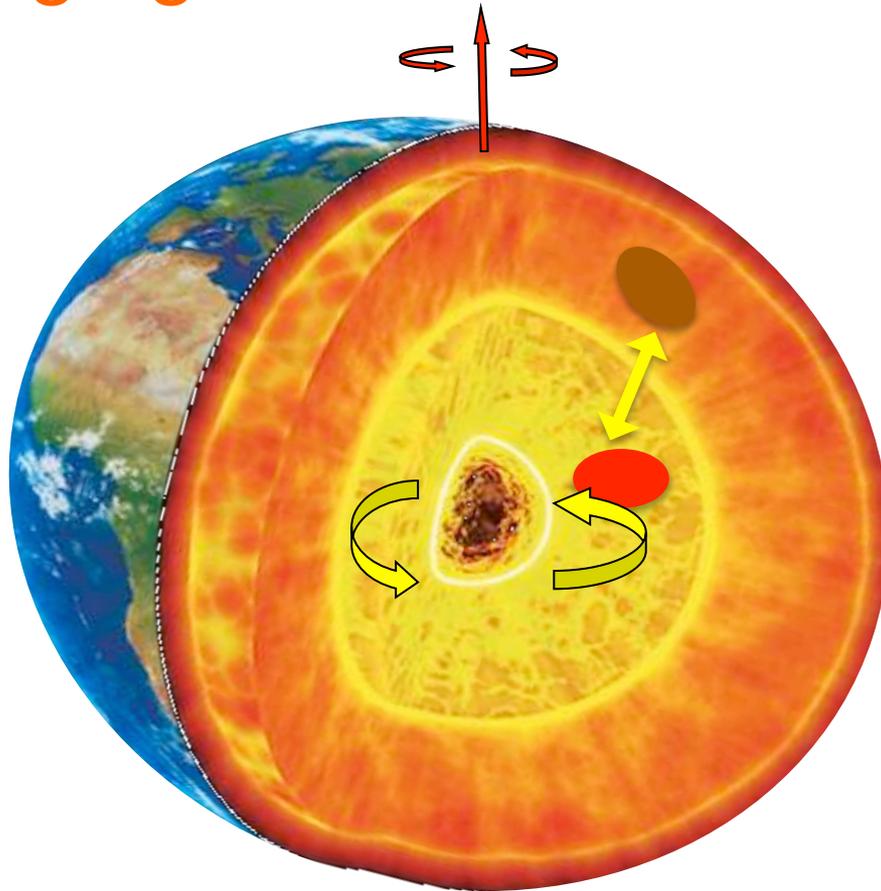
# Couplage noyau-manteau

## Couplage topographique



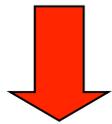
# Couplage noyau-manteau

Couplage gravitationnel



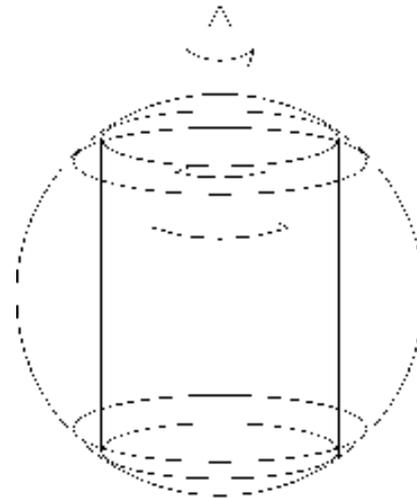
# Calcul des flux dans le noyau

- Dépend de l'échelle de temps et de la direction
- rotation de la Terre



colonne de Taylor

Mouvement uniforme sur  
des cylindres coaxiaux



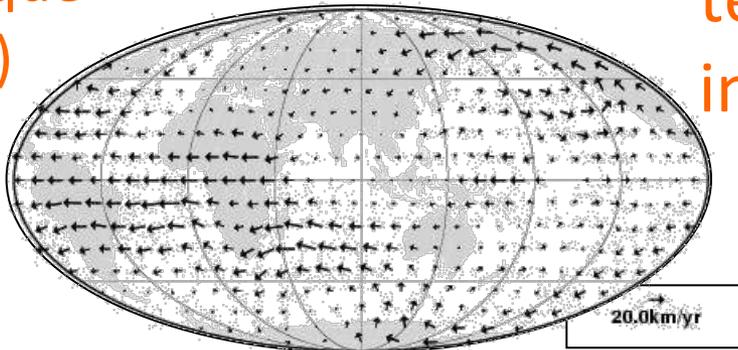
# Calcul des flux dans le noyau

Equation d'induction:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{B}) + \dots$$

Variations  
du champ  
Magnétique  
(observé)

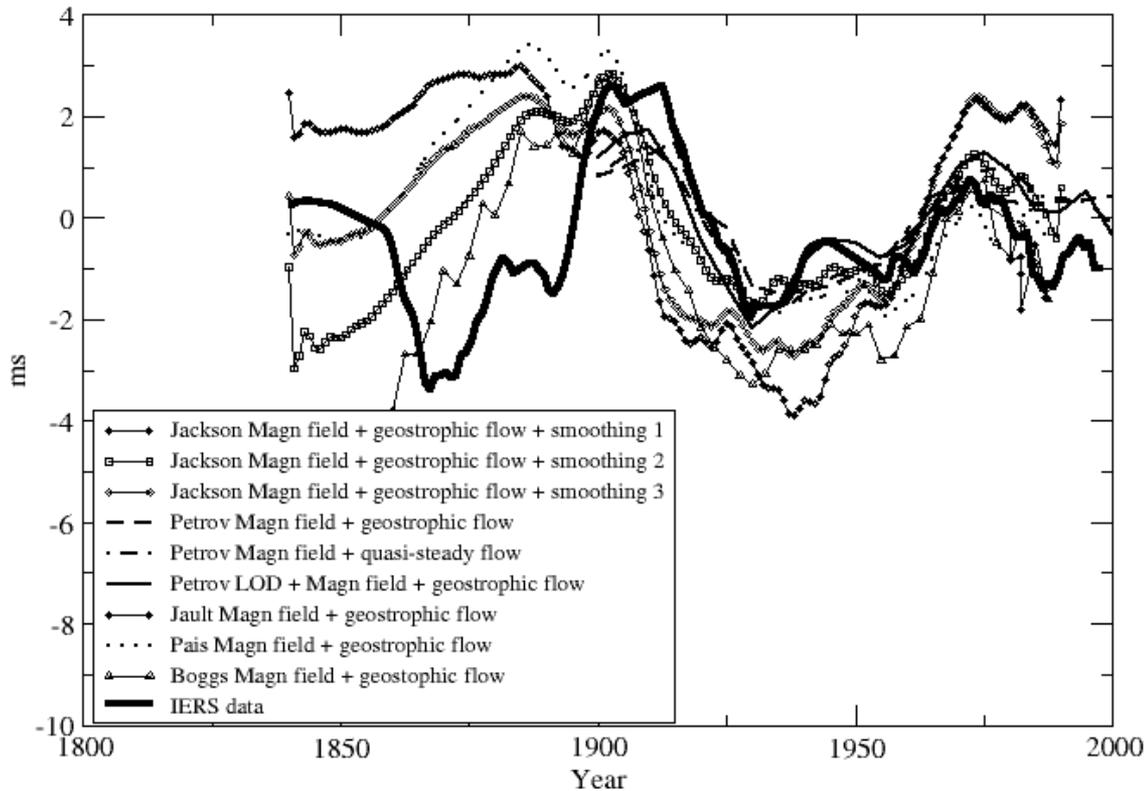
Vitesse (inconnue)



- Mais, le manteau (isolant) cache une partie du champ.
- Donc, on ne peut résoudre que pour une partie de la vitesse. Il faut « deviner » le reste...
- En outre, les hautes fréquences spatiales et temporelles du champs sont inconnues.

# Calcul des flux dans le noyau

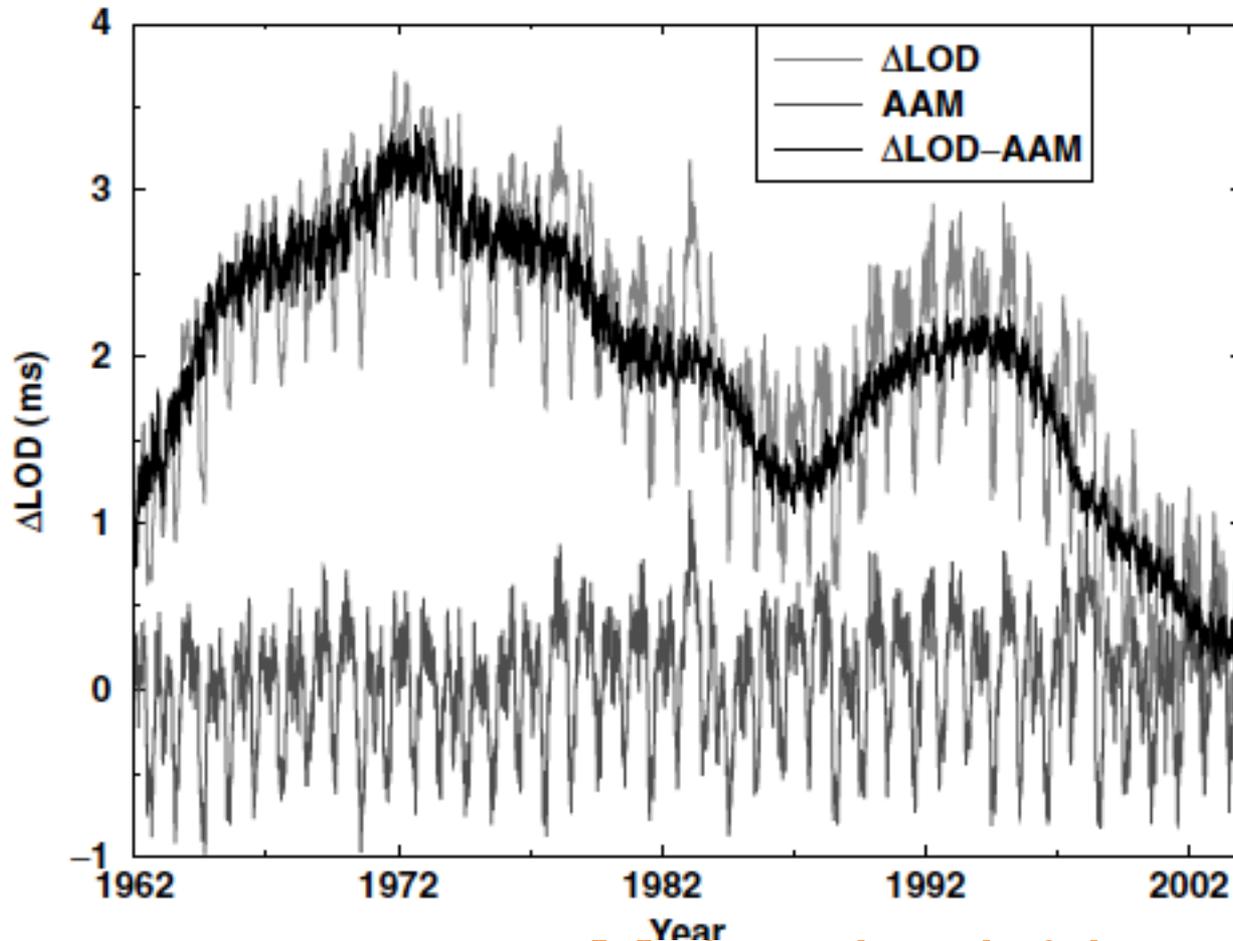
Est-ce que cela marche?



Ben... heu... Peut-être...

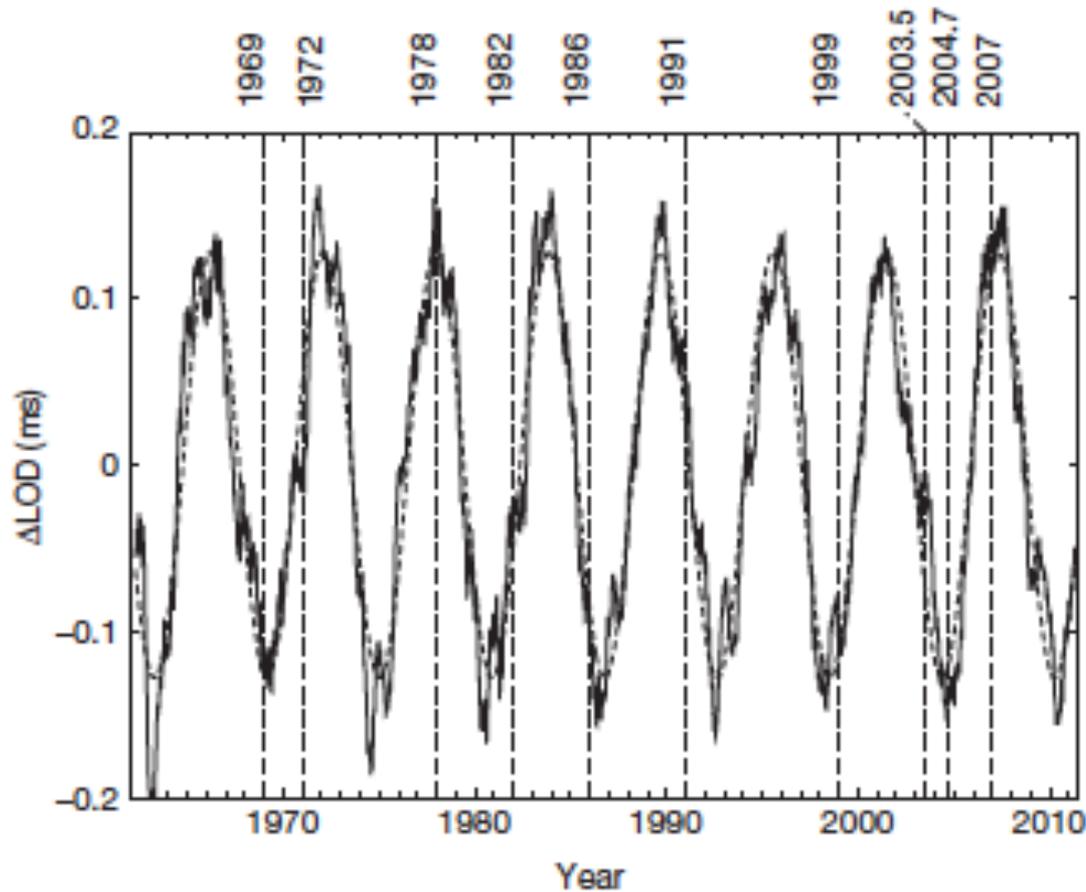
# Calcul du CAM par le LOD

On prend le LOD, on retire ce qu'on connaît (le AAM)

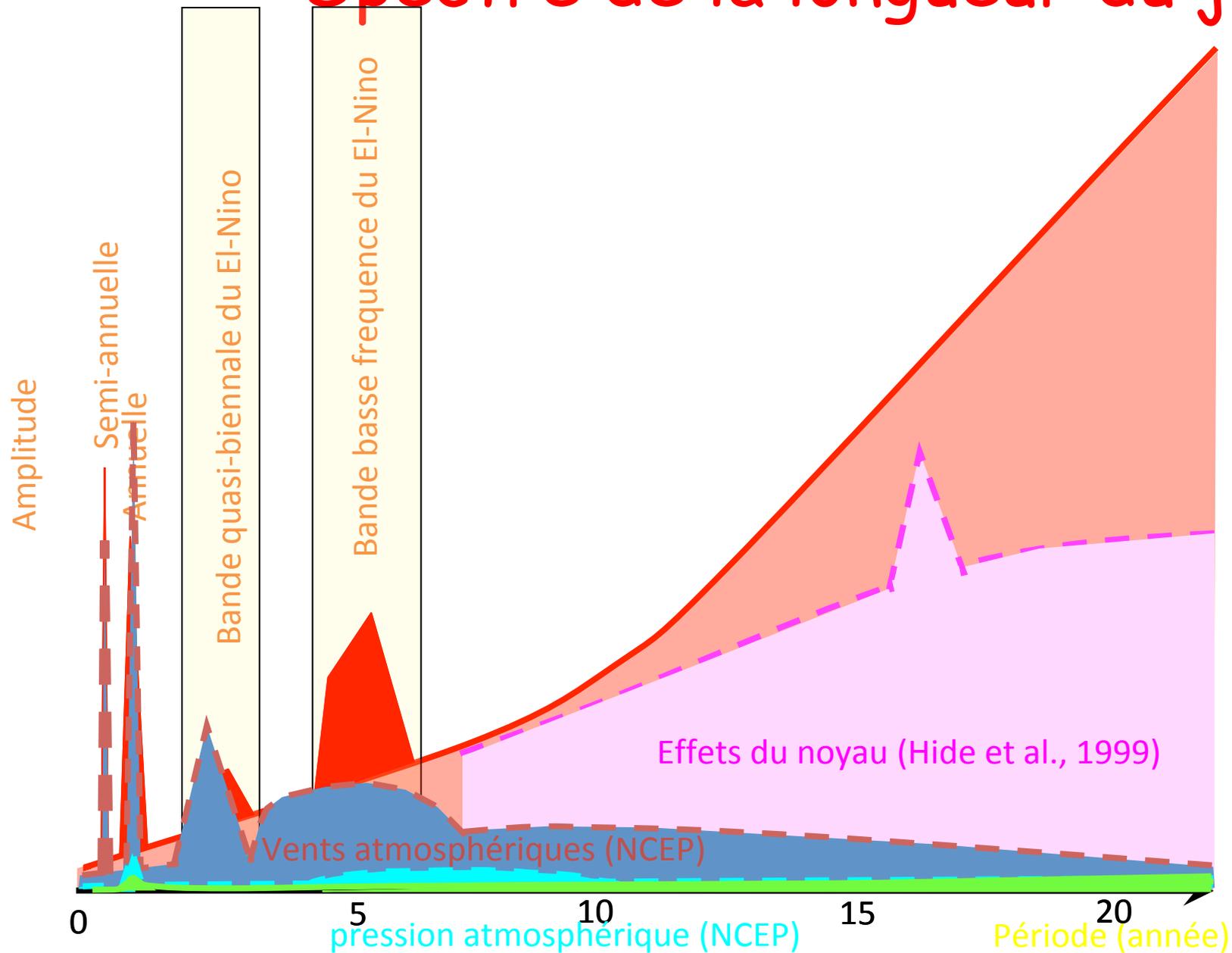


Mais cela n'aide pas

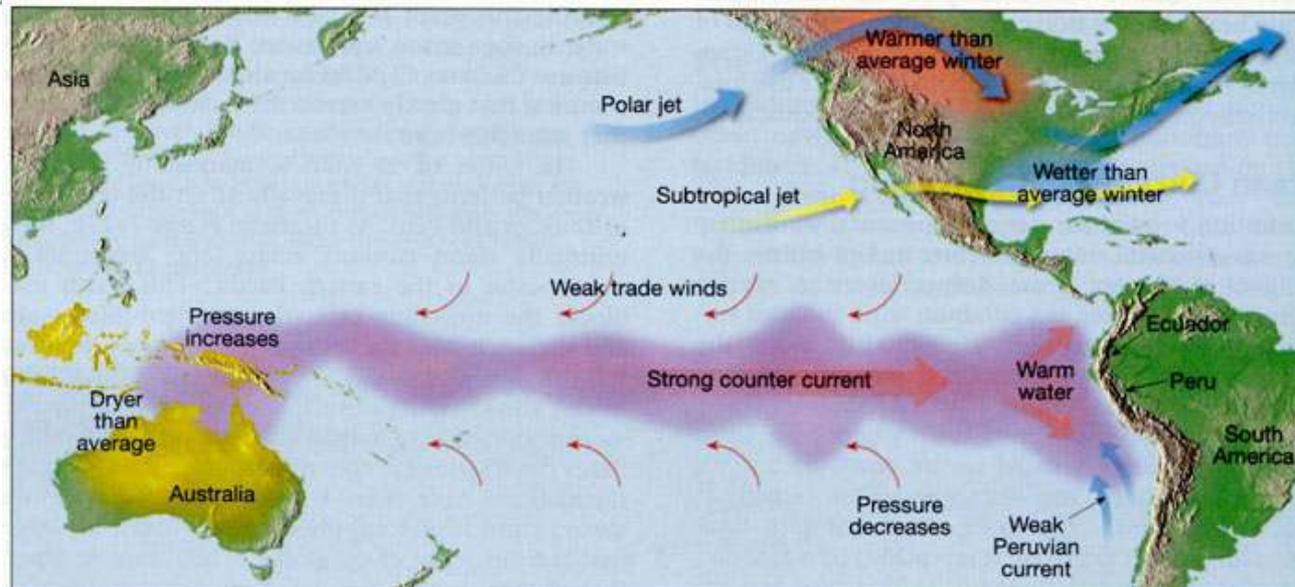
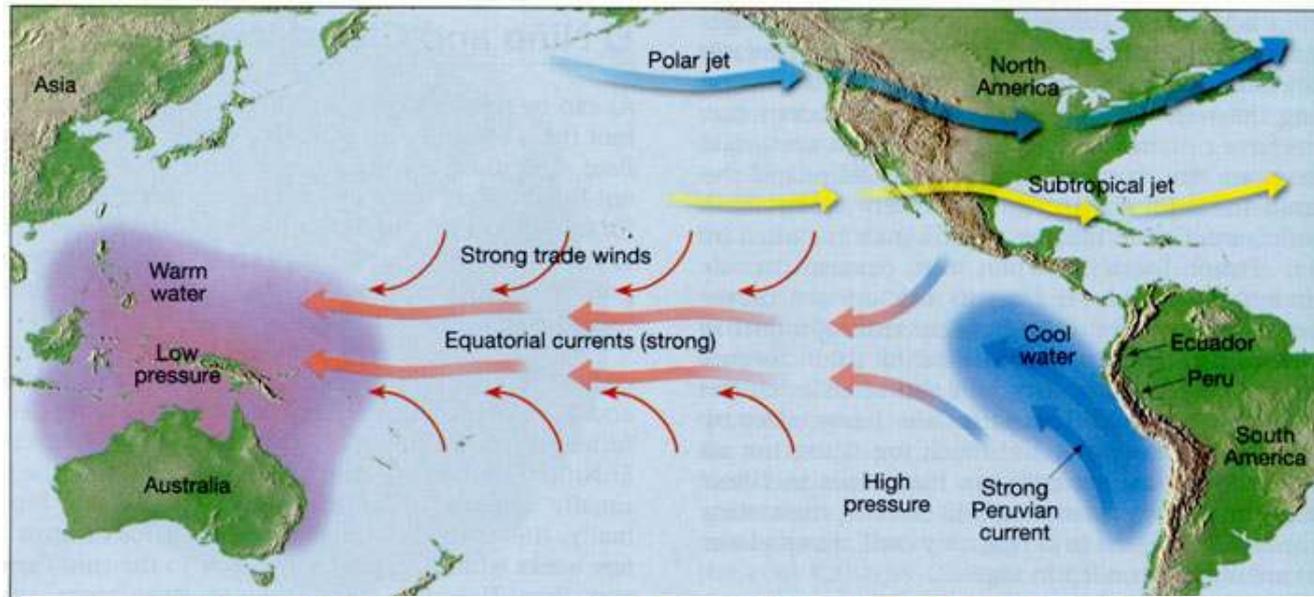
# On peut apprendre des trucs sur le noyau, mais pas sur la rotation



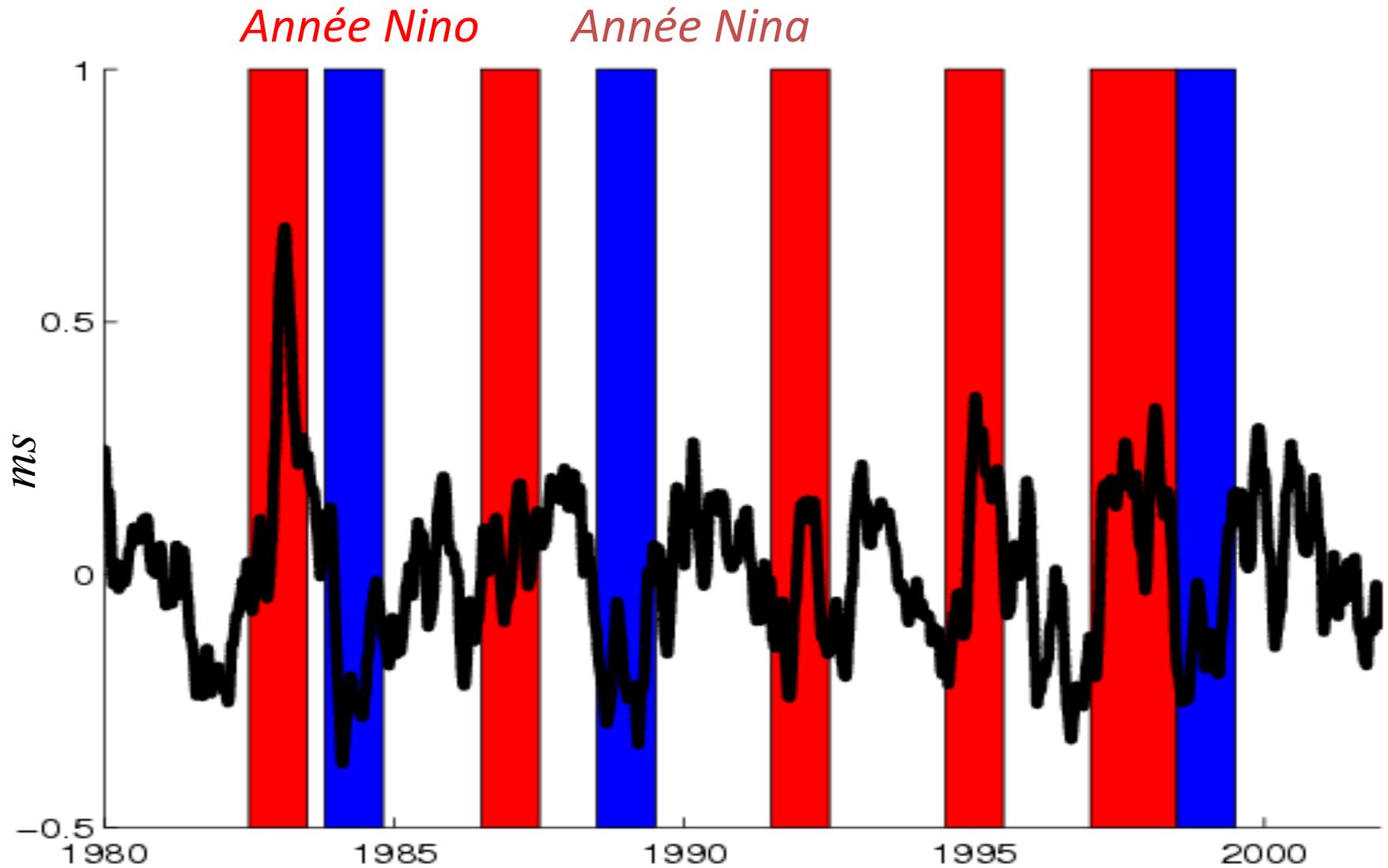
# Spectre de la longueur du jour



# El Nino

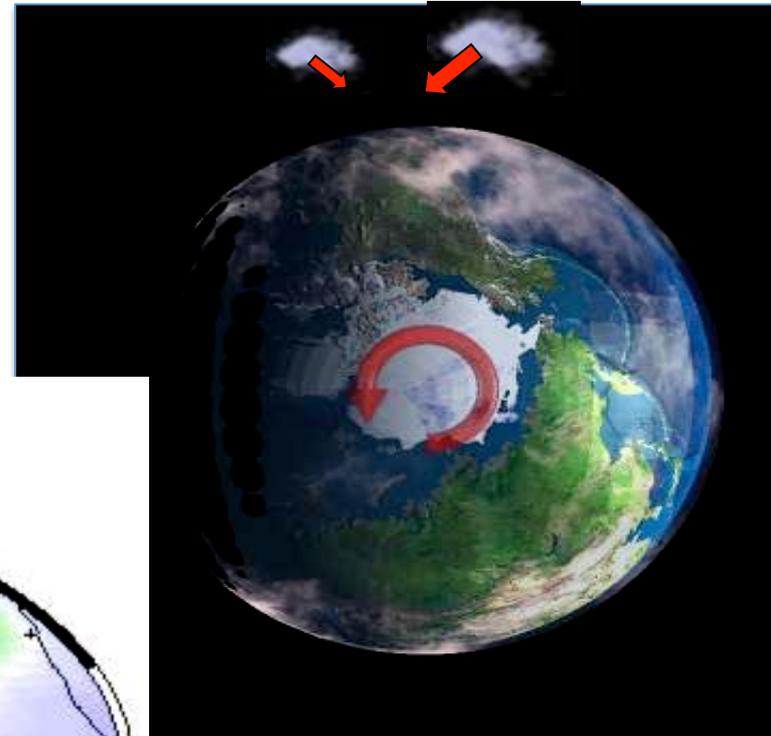
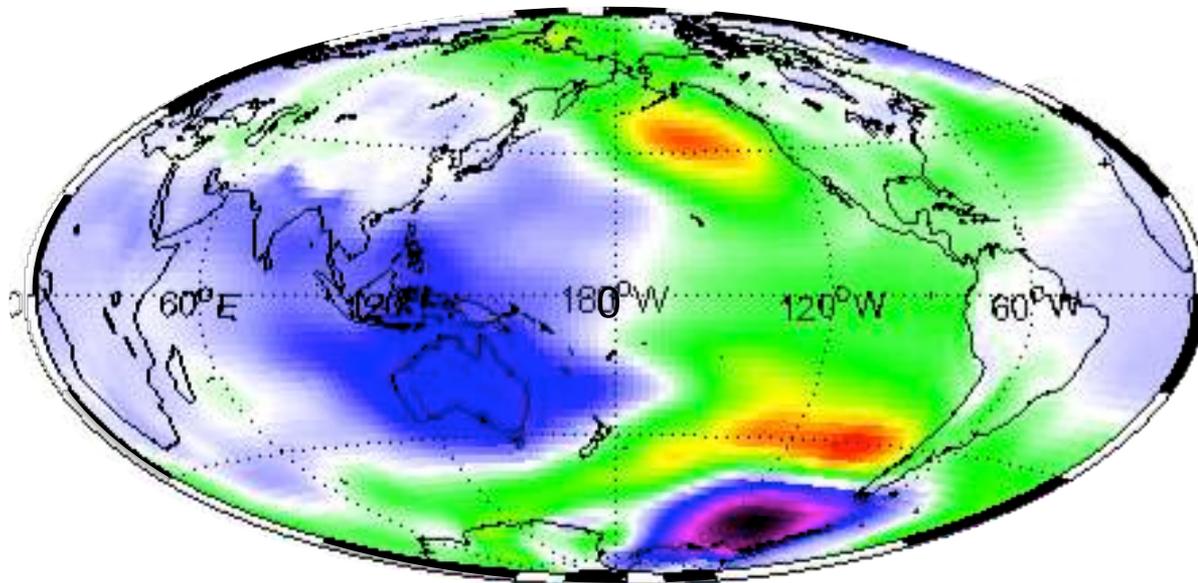


# Variations de la longueur du jour

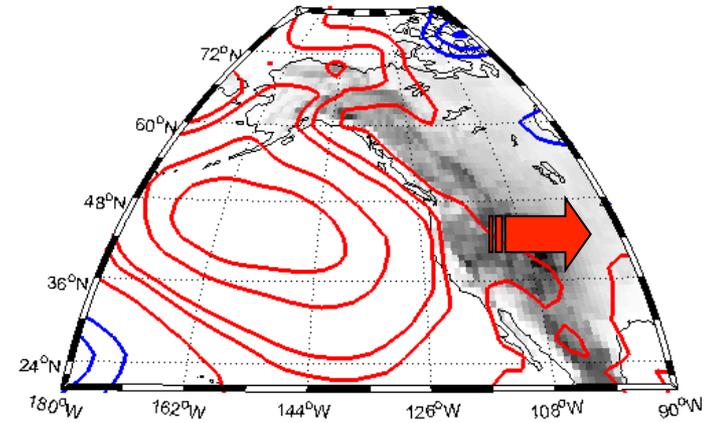
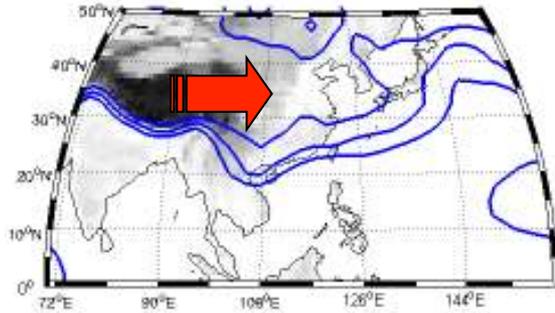


# D'où vient-elle?

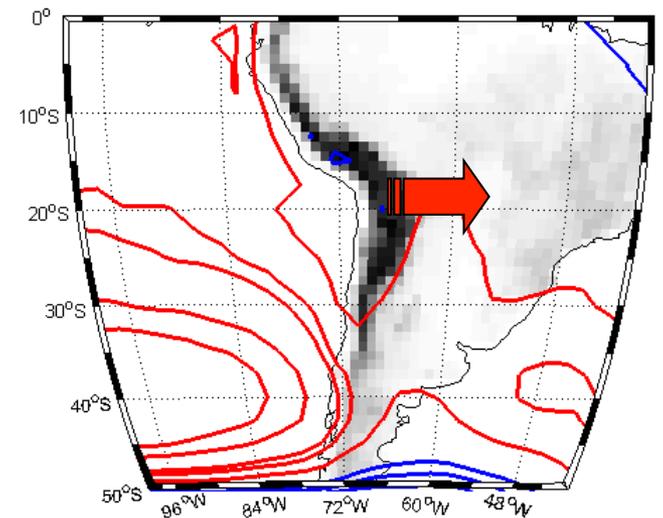
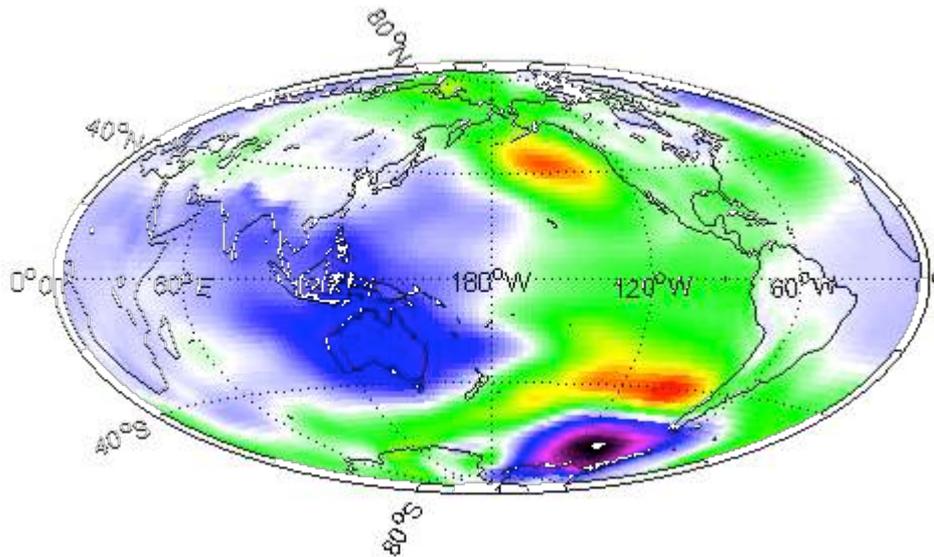
Anomalie de pression



# D'où vient-elle?

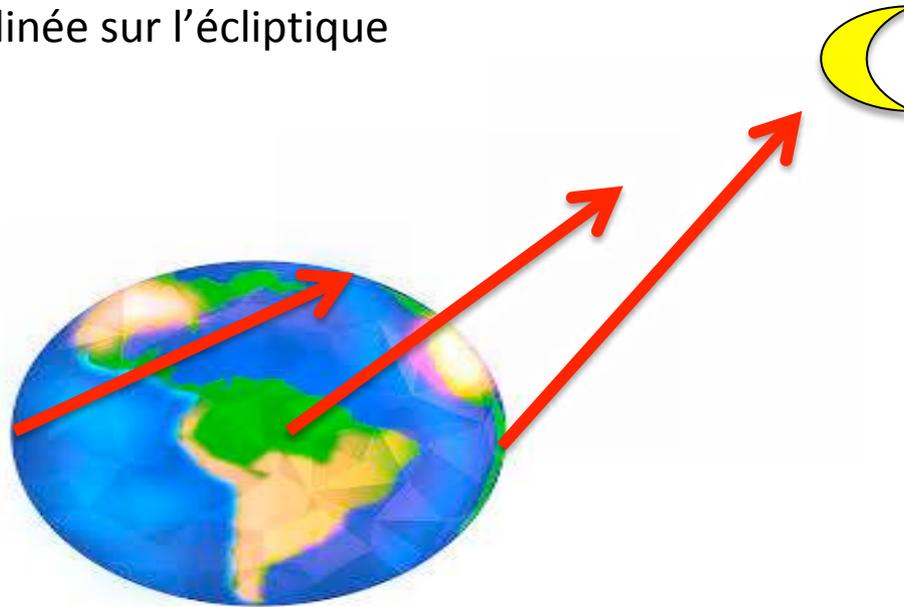


## Anomalie de pression



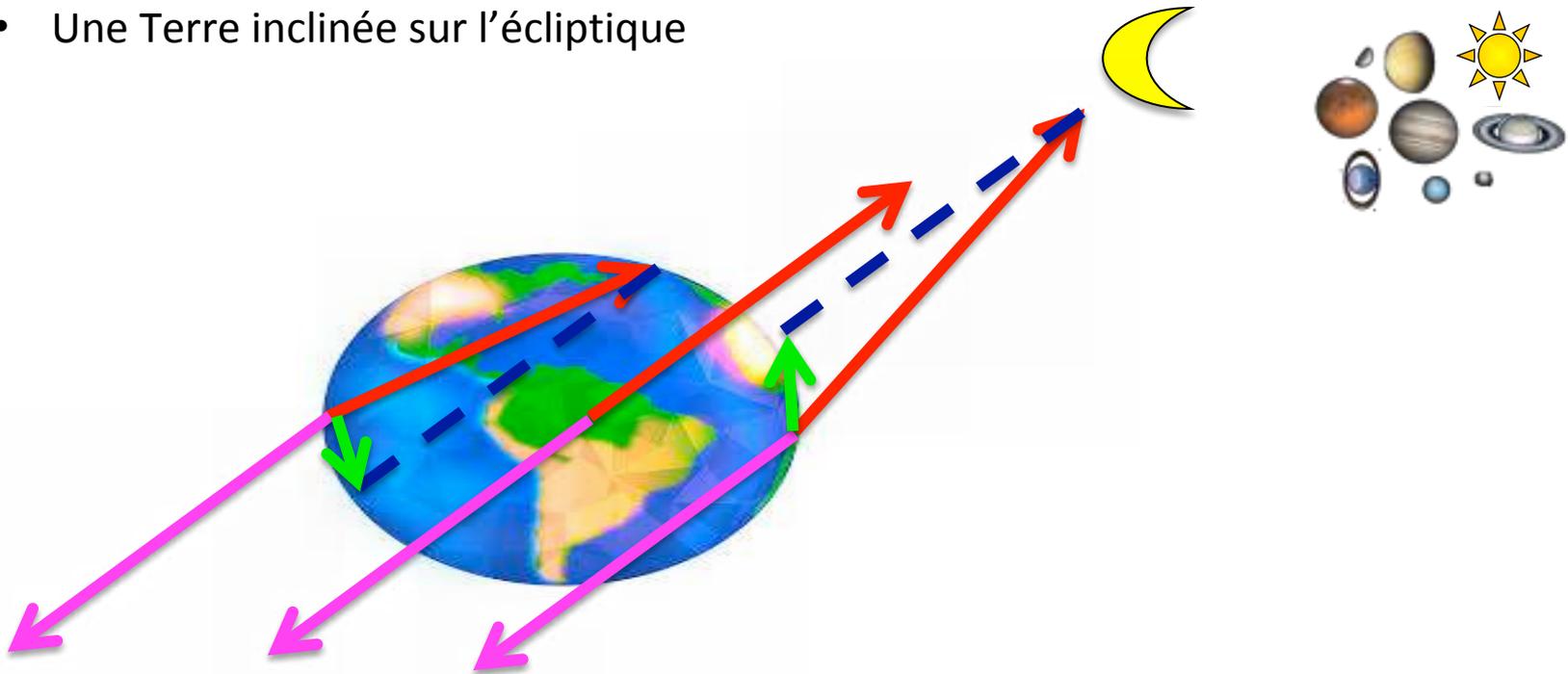
# La précession et les nutations de la Terre

- Une Terre ellipsoïdale
- Une Terre en rotation
- Une Terre inclinée sur l'écliptique



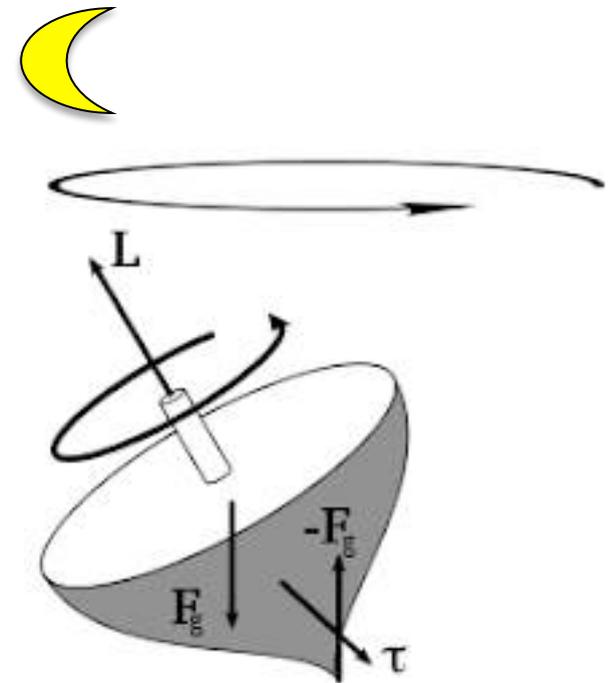
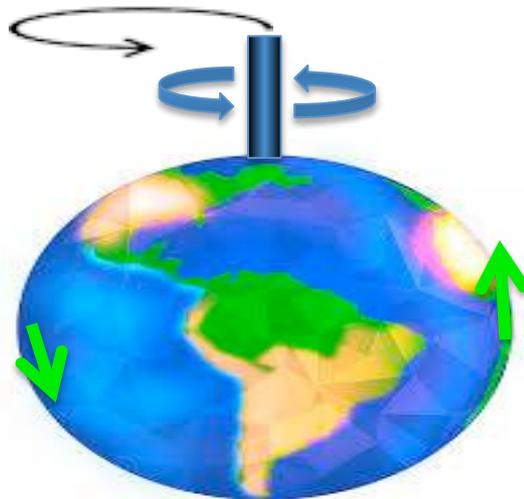
# La précession et les nutations de la Terre

- Une Terre ellipsoïdale
- Une Terre en rotation
- Une Terre inclinée sur l'écliptique



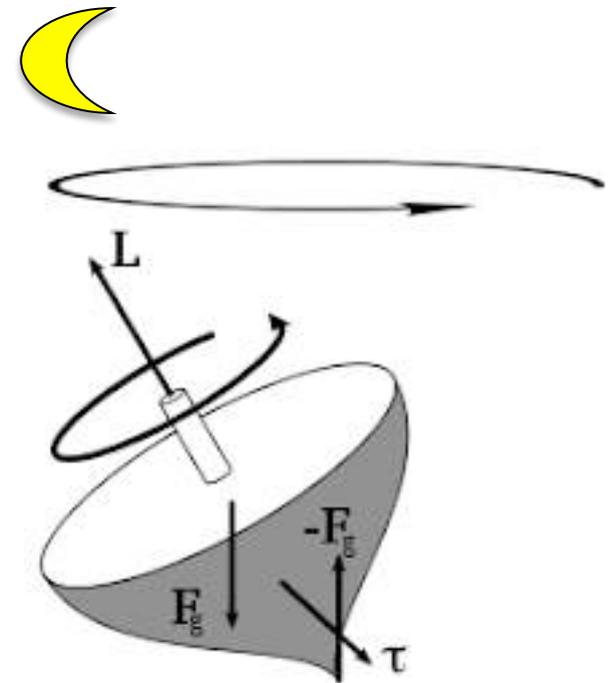
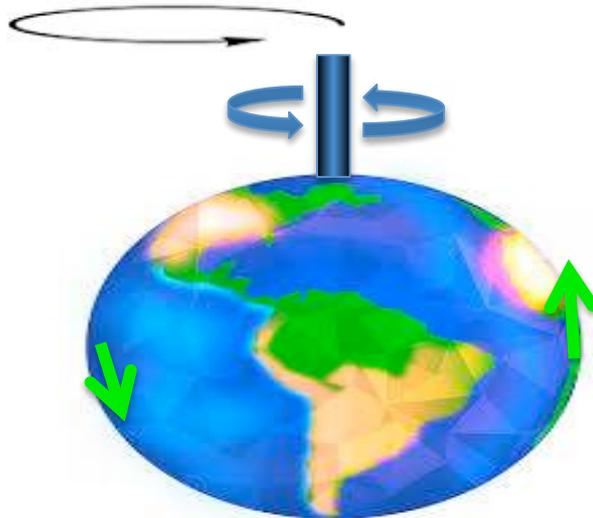
# La précession et les nutations de la Terre

- Une Terre ellipsoïdale
- Une Terre en rotation
- Une Terre inclinée sur l'écliptique



# La précession et les nutations de la Terre

- Une Terre ellipsoïdale
- Une Terre en rotation
- Une Terre inclinée sur l'écliptique



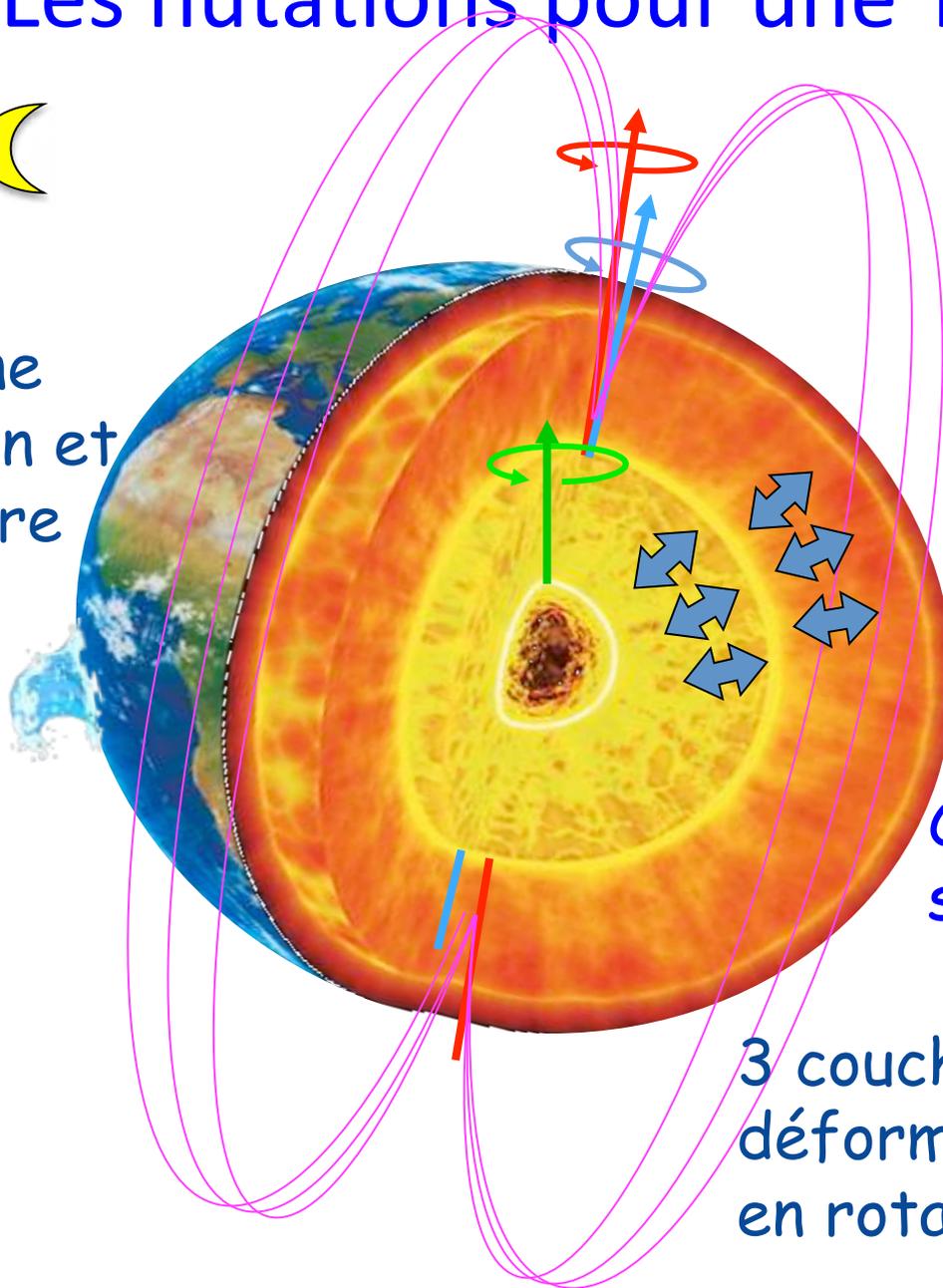
# Nutation d'un Terre rigide

- Différentes méthodes de calcul
  - Hamiltonien (Kinoshita et al. + ...)
  - Torque approach (Roosbeeck, Bretagnon, Souchay, Hartmann)
- On part des éphémérides de la Lune, du Soleil et des planètes
- On calcule le moment de force ou le Hamiltonien du système
- Il y a des tas d'effets perturbateurs
  - Certains sont déjà dans les éphémérides
  - D'autres pas (triaxilité, couplage precession/nutation, relativité)



# Les nutations pour une Terre non-rigide

Marées et cycle diurne dans l'océan et l'atmosphère



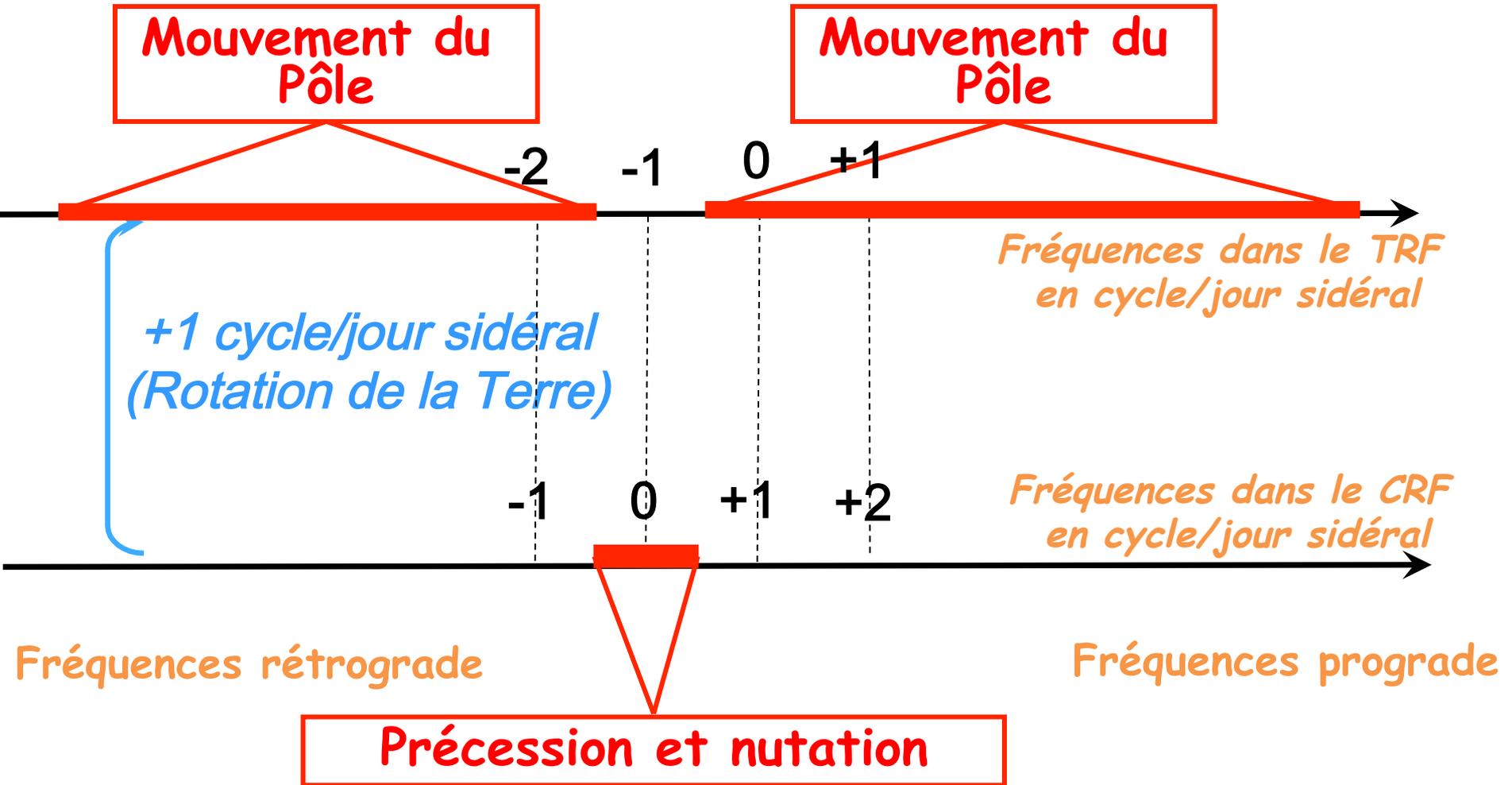
Couplage électromagnétique

Couplage gravitationnel

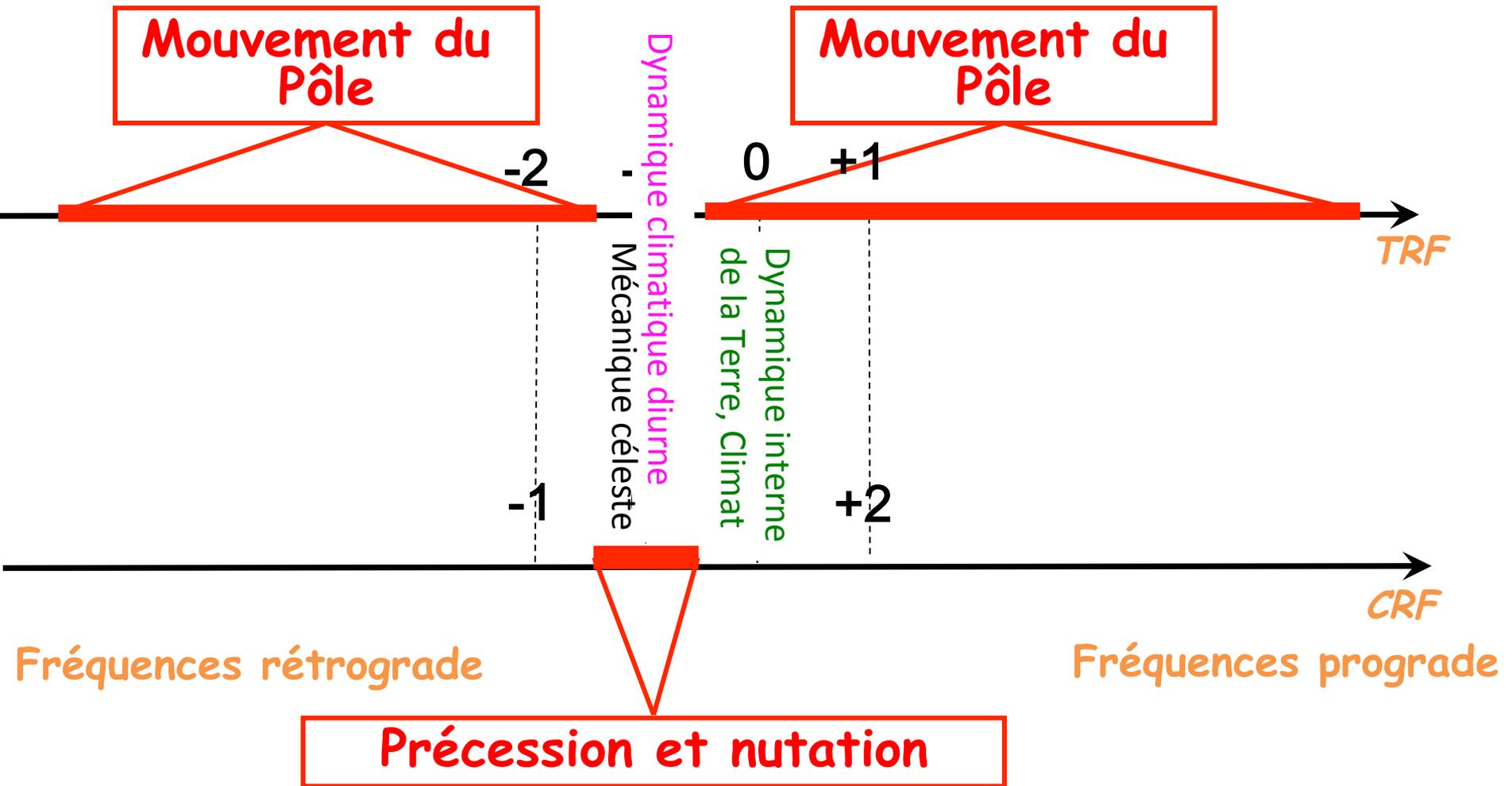
Couplage par pression sur les interfaces

3 couches ellipsoïdales déformables et homogène en rotation rigide

# Composantes équatoriale



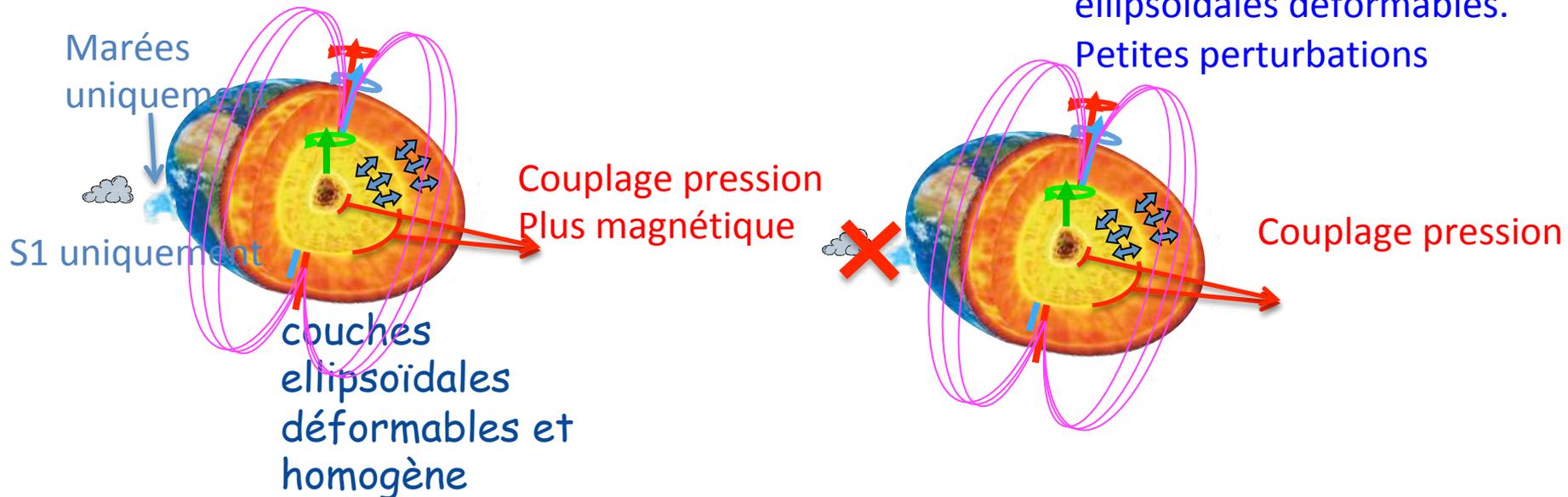
# Composantes équatoriales



# Effet géophysique sur les nutations?

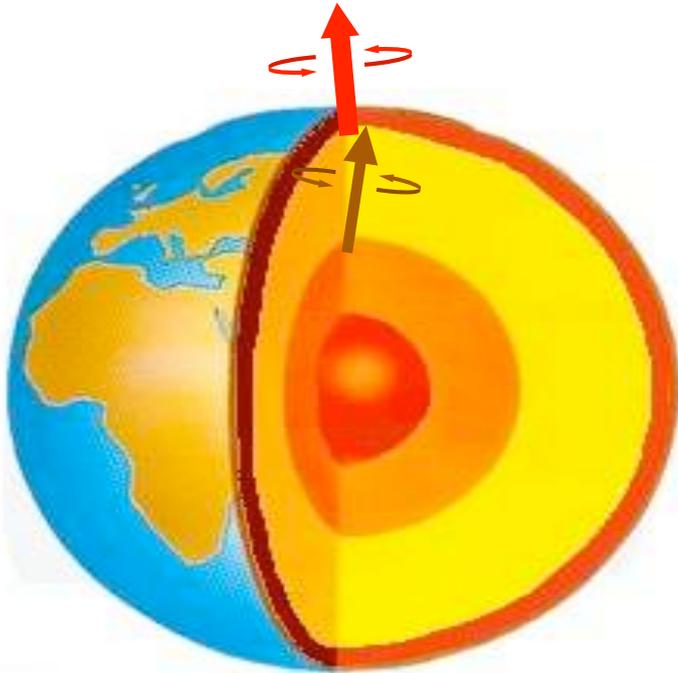
Méthode 1: Modèles simples dont les paramètres sont ajustés sur les observations (IAU2000)

Méthode 2: Modèles de Terre (PREM), équations du mouvements (tronquées) sont résolues partout. (Dehant et al.)



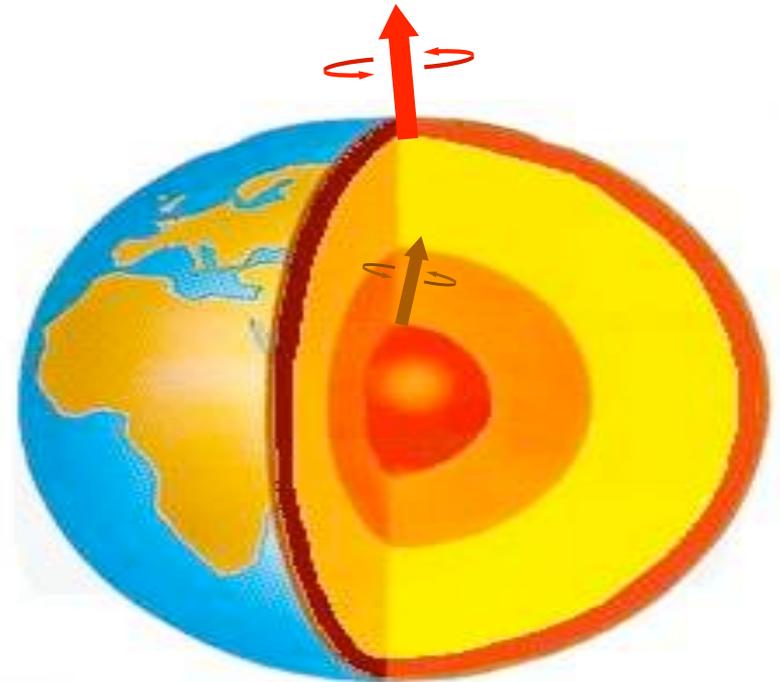
**JAMAIS MEILLEURES QUE LE MODELE DE TERRE**

# Modes libres en nutation



Free inner core  
Nutation  
( $T=?$ )

Free core  
Nutation  
( $T=-430$  j)

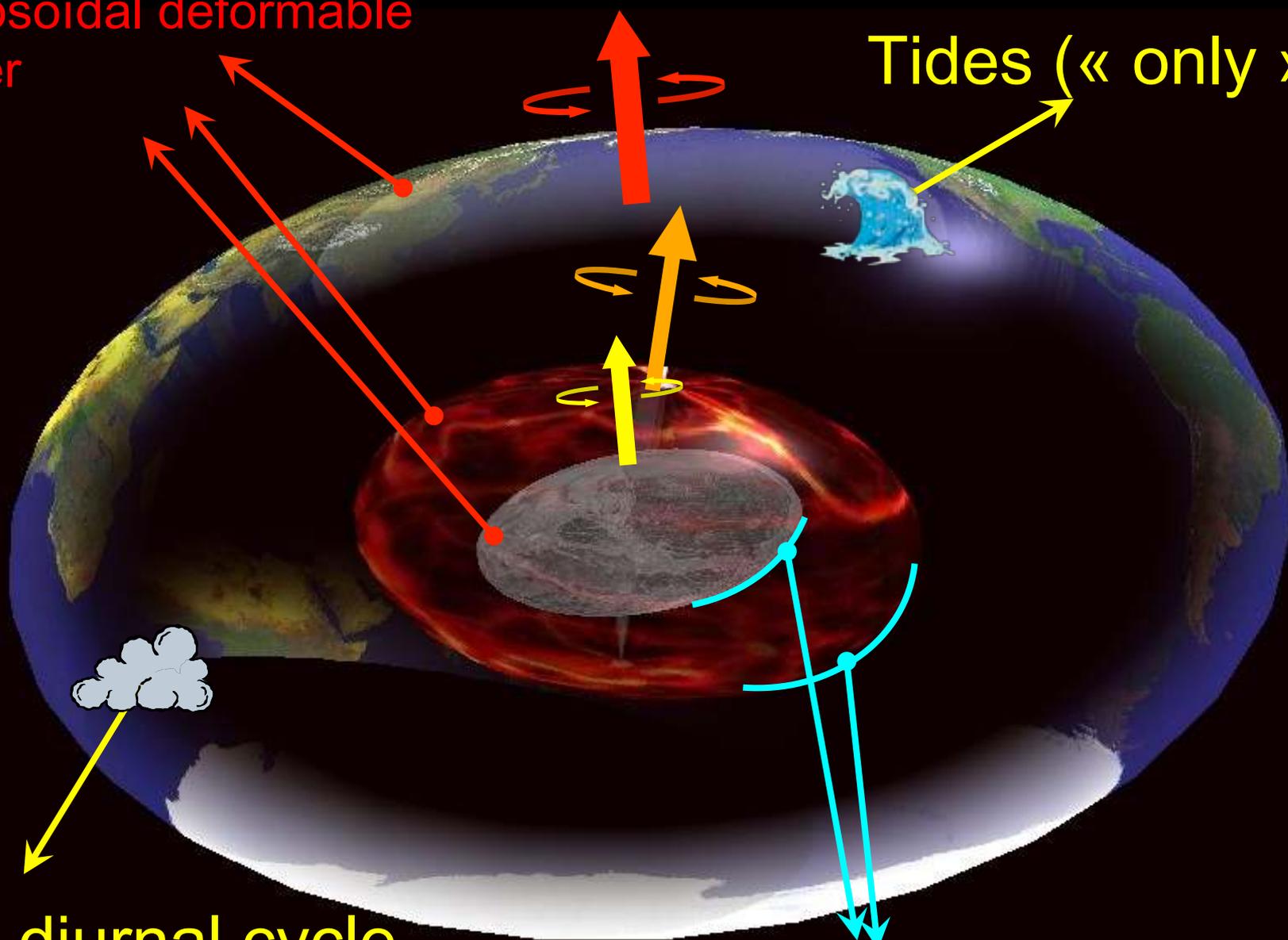


Ellipsoïdal deformable layer

Tides (« only »)

Fit diurnal cycle (only)

Pressure + Gravitational + « magnetic » coupling



# Effet des marées océaniques

Distribution de hauteur d'eau liée à la marée (T/P – 1996!)



Courants de marées (Equation de Laplace des Marées)



Termes de masse et de mouvement en terme d'amplitudes et de phases

4 ondes (P1, K1, O1, Q1)

Pour avoir plus d'ondes:

$$A(\sigma) = \text{FCN} \times \text{Dynamique de l'océan } F(\sigma, \sigma_0) \times A(\sigma_0)$$

Fonction linéaire  
ajustée sur les 4 ondes



# Fonction de transfert de la nutation

Valeur théorique

Facteur d'échelle

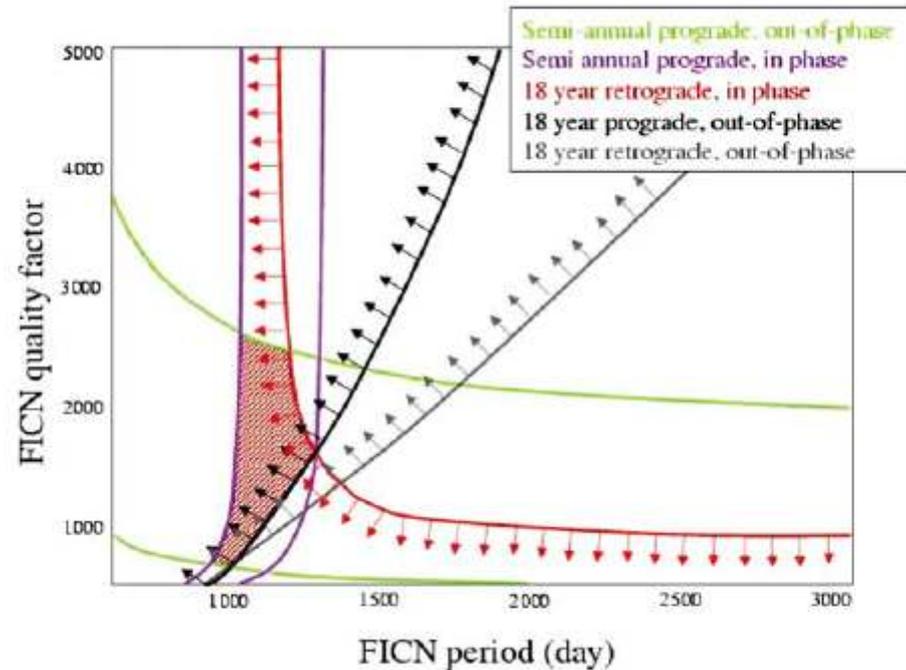
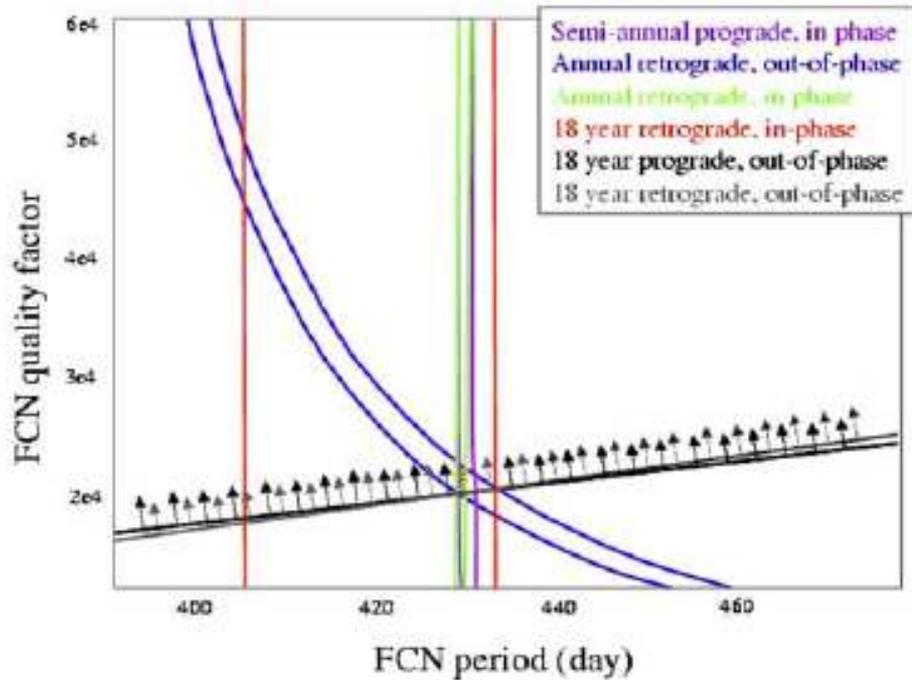
Amplitudes

$$TF(\sigma) = \frac{e_R - \sigma}{1 + e_R} \frac{H}{H_R} \left( 1 + (1 + \sigma) \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{\sigma - \sigma_i} \right)$$

Valeur théorique

Fréquences de résonance

# Contrainte sur les paramètres

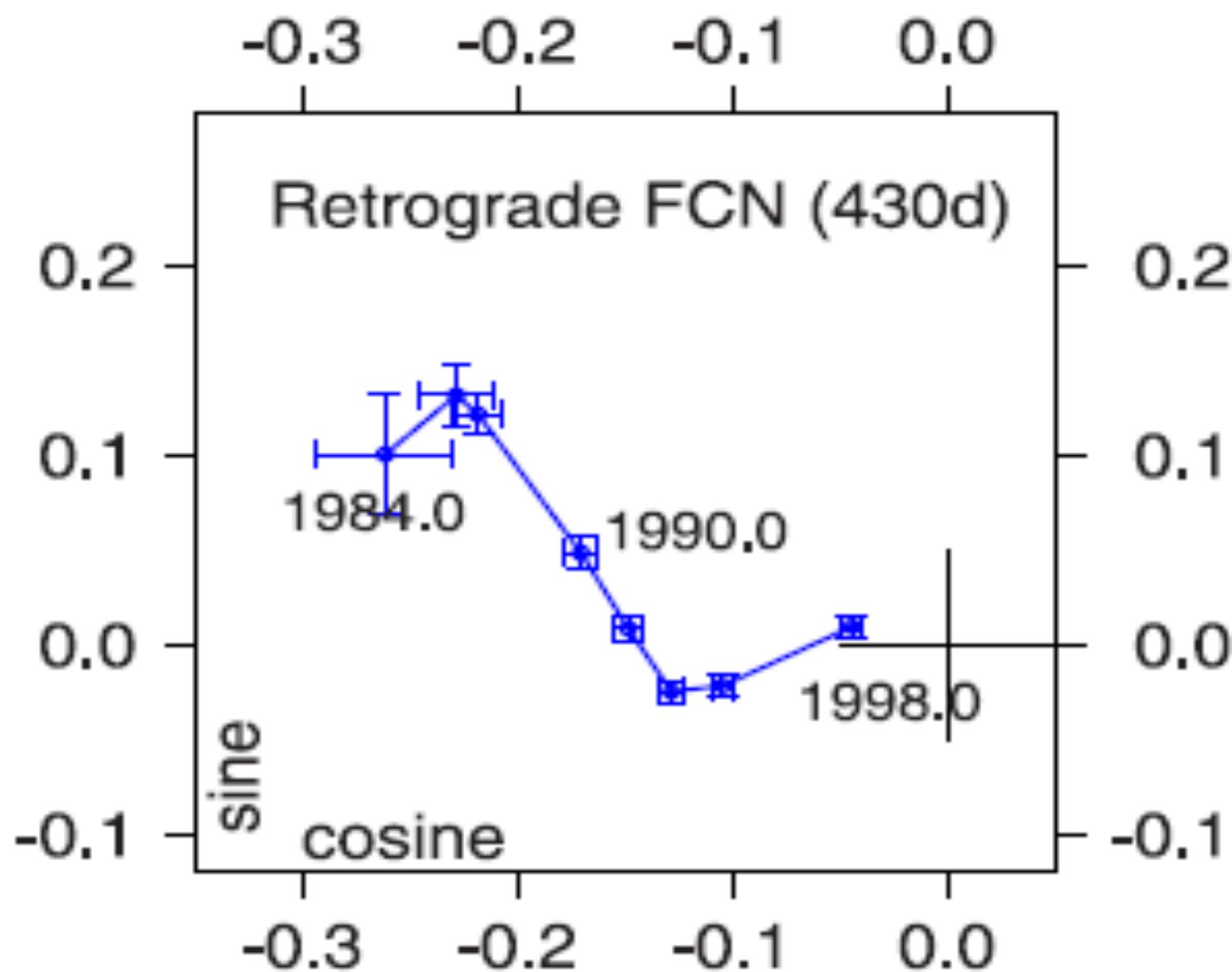


## Paramètres estimés

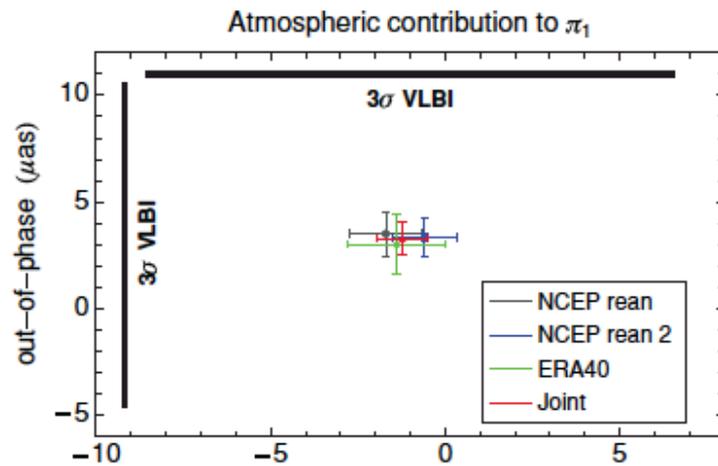
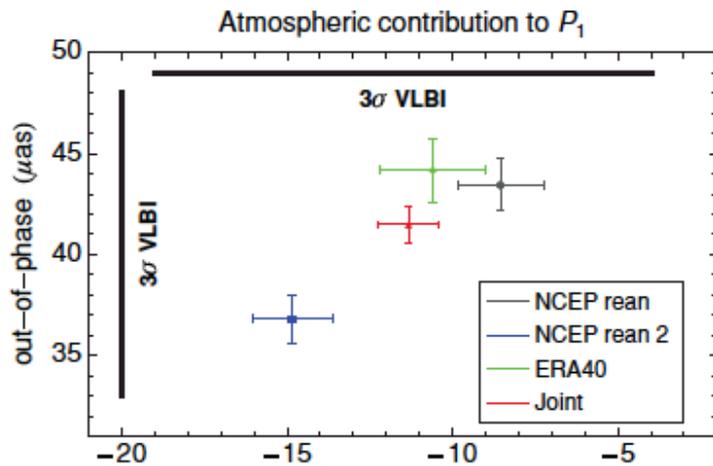
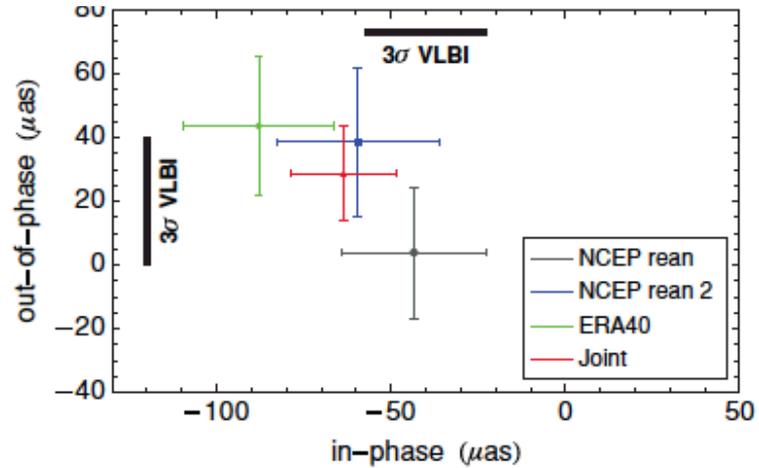
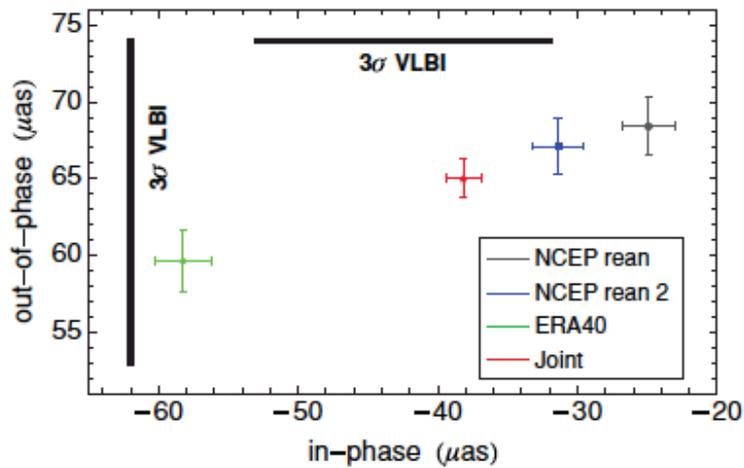
TAB. 3.3: Ensemble des paramètres choisis pour être estimés à partir des observations de nutation.

Symbole	Définition
<i>Paramètres géophysiques :</i>	
$e$	Ellipticité dynamique de la Terre entière
$e_J + \text{Re}(K_{CMB})$	Ellipticité dynamique du noyau liquide + Constante de couplage à la CMB (partie réelle)
$\text{Re}(\kappa)$	Compliance de la Terre entière (partie réelle)
$\text{Im}(\kappa)$	Compliance de la Terre entière (partie imaginaire)
$\text{Re}(\gamma)$	Compliance du noyau liquide (partie réelle)
$\text{Im}(\gamma)$	Compliance du noyau liquide (partie imaginaire)
$\text{Im}(K_{CMB})$	Constante de couplage à la CMB (partie imaginaire)
$\text{Re}(K_{ICB})$	Constante de couplage à l'ICB (partie réelle)
$\text{Im}(K_{ICB})$	Constante de couplage à l'ICB (partie imaginaire)
<i>Contribution atmosphérique au terme annuel prograde :</i>	
$\text{Re}(a_{ap})$	Correction sur la partie réelle de l'amplitude de ce terme
$\text{Im}(a_{ap})$	Correction sur la partie imaginaire de l'amplitude de ce terme
<i>Amplitude de l'oscillation libre de la FCN :</i>	
$a_{fcn}^R$	Parties réelles des 11 amplitudes complexes
$a_{fcn}^I$	Parties imaginaires des 11 amplitudes complexes
<i>Paramètre de la dépendance temporelle linéaire :</i>	
$\Delta\epsilon$	Taux d'obliquité
$c_\psi$	Décalage constant en longitude
$c_z$	Décalage constant en obliquité
<i>Paramètre de la modélisation probabiliste :</i>	
$\sigma_M$	Déviation standard de l'incertitude de modélisation gaussienne

Mathews et al., 2002,  
Koot et al., 2010

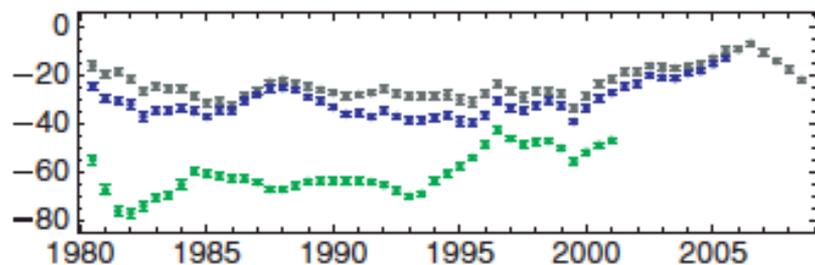


# Effets atmosphériques sur les nutations

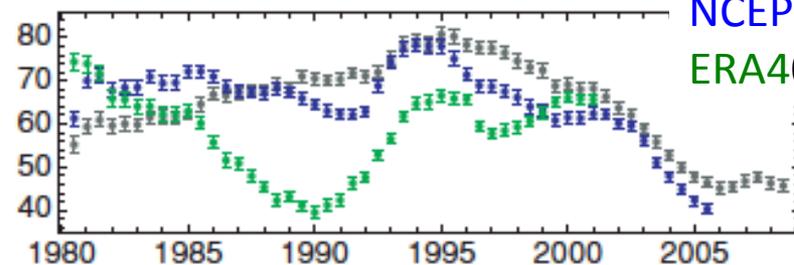


NCEP R1  
NCEP R2  
ERA40

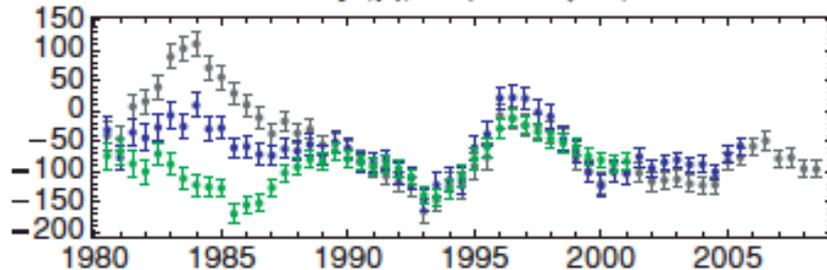
+1 y ( $S_1$ ) in-phase ( $\mu\text{as}$ )



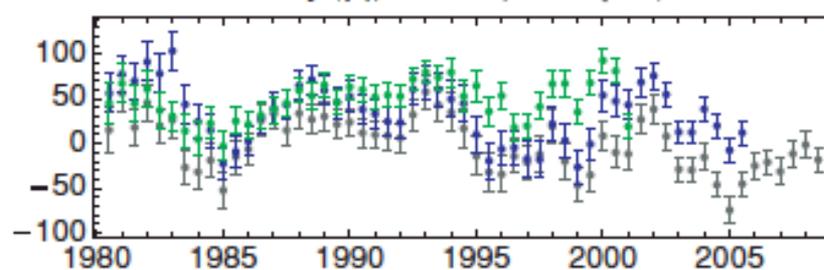
+1 y ( $S_1$ ) out-of-phase ( $\mu\text{as}$ )



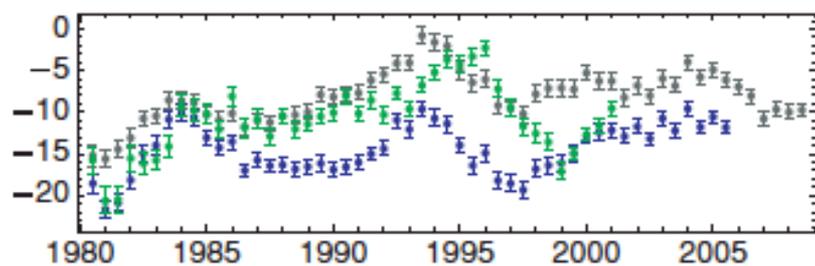
-1 y ( $\psi_1$ ) in-phase ( $\mu\text{as}$ )



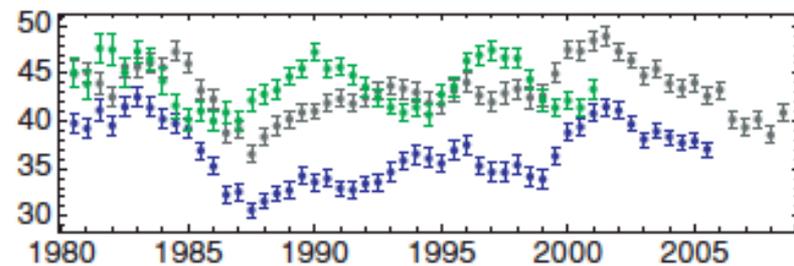
-1 y ( $\psi_1$ ) out-of-phase ( $\mu\text{as}$ )



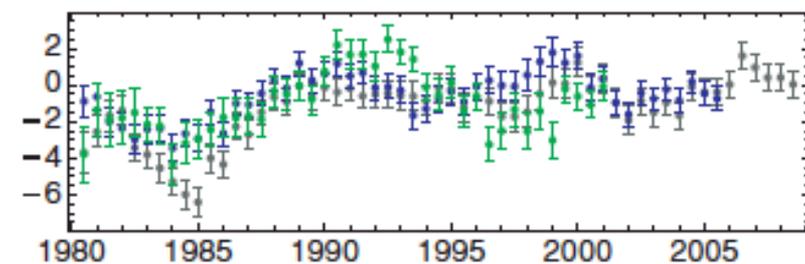
+1/2 y ( $P_1$ ) in-phase ( $\mu\text{as}$ )



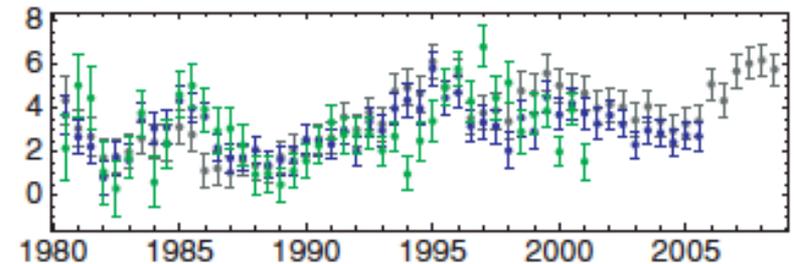
+1/2 y ( $P_1$ ) out-of-phase ( $\mu\text{as}$ )



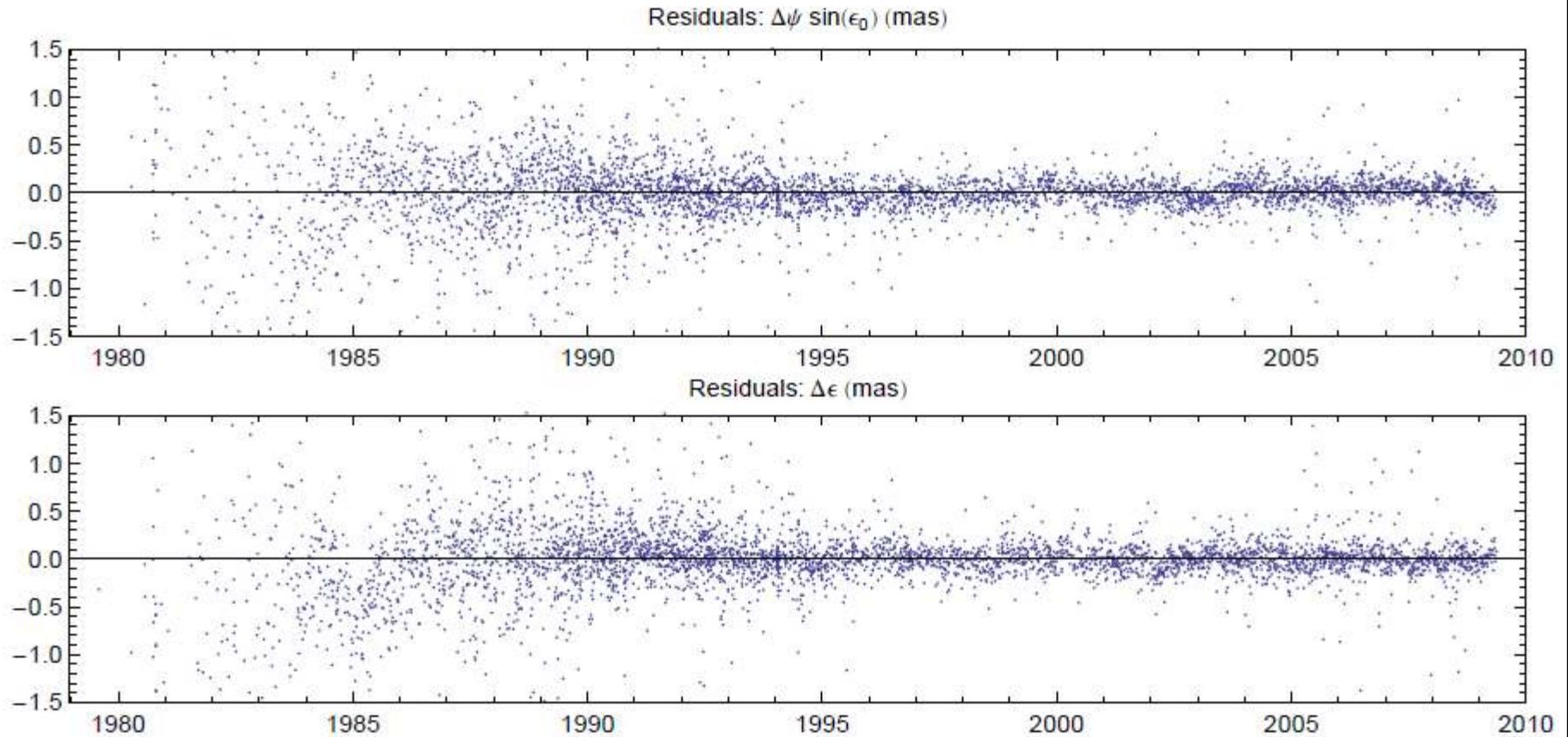
+1/3 y ( $\pi_1$ ) in-phase ( $\mu\text{as}$ )



+1/3 y ( $\pi_1$ ) out-of-phase ( $\mu\text{as}$ )

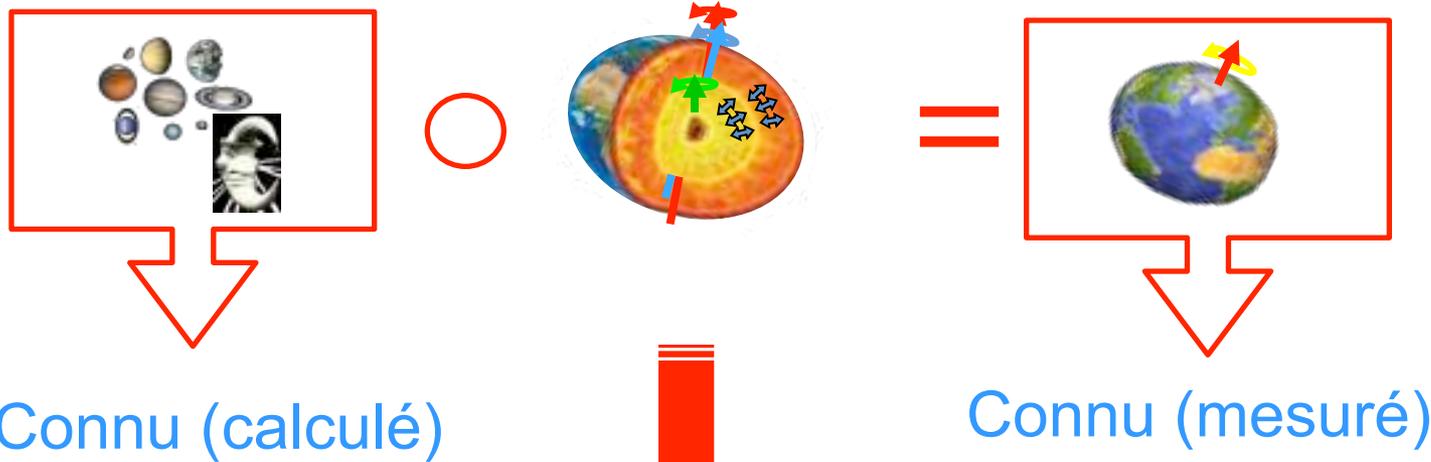


# Résidus

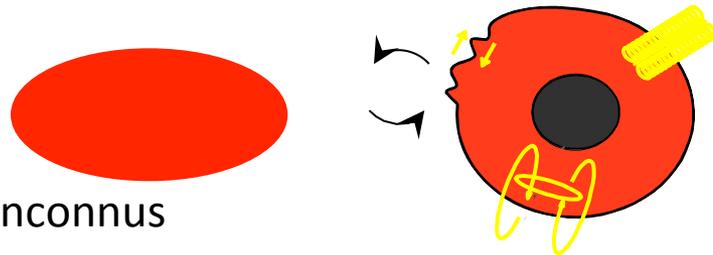


Coupling Parameters				FCN		FICN	
$e_f + \text{Re}(K_{\text{CMB}})$ ( $10^{-3}$ )	$\text{Im}(K_{\text{CMB}})$ ( $10^{-5}$ )	$\text{Re}(K_{\text{ICB}})$ ( $10^{-3}$ )	$\text{Im}(K_{\text{ICB}})$ ( $10^{-3}$ )	Period (days)	$Q$	Period (days)	$Q$
No atmospheric contribution:							
$2.6751 \pm 0.0001$	$-1.80 \pm 0.01$	$0.99 \pm 0.01$	$-1.06 \pm 0.02$	$-429.09 \pm 0.02$	$19641 \pm 90$	$904 \pm 10$	$467 \pm 10$
Mean atmospheric contribution from NCEP reanalysis ( $-54.7 - i1.5 \mu\text{as}$ ):							
$2.6729 \pm 0.0001$	$-1.83 \pm 0.01$	$0.98 \pm 0.01$	$-0.99 \pm 0.02$	$-429.55 \pm 0.02$	$19416 \pm 90$	$897 \pm 10$	$502 \pm 10$
Time-variable atmospheric contribution from NCEP reanalysis:							
$2.6715 \pm 0.0001$	$-1.89 \pm 0.01$	$0.96 \pm 0.01$	$-0.95 \pm 0.02$	$-429.82 \pm 0.02$	$19042 \pm 90$	$883 \pm 10$	$526 \pm 10$

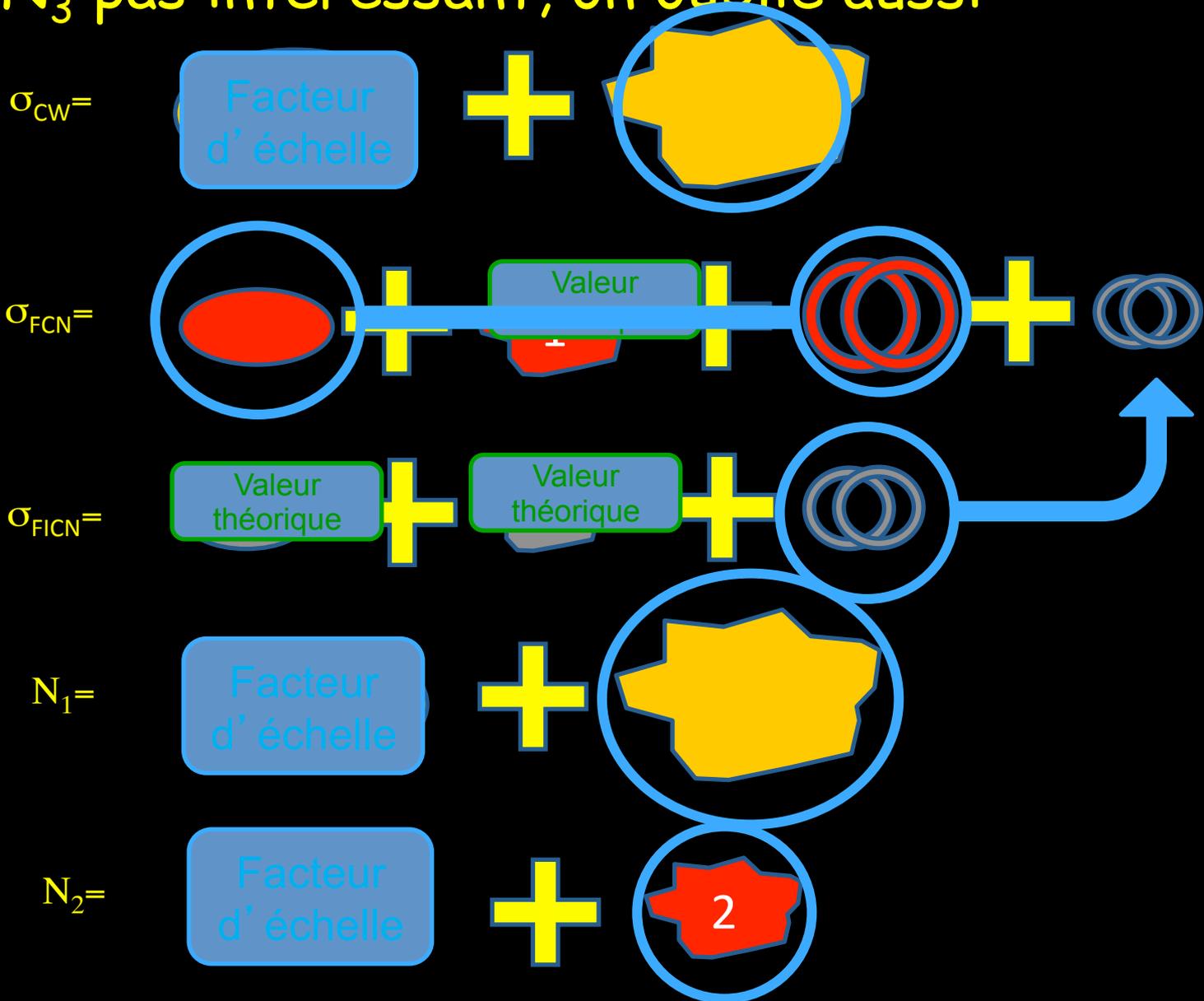
# Fonction de transfert de la nutation



Dépend de paramètres  
Géophysique connus et inconnus

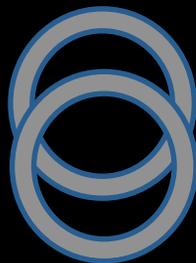
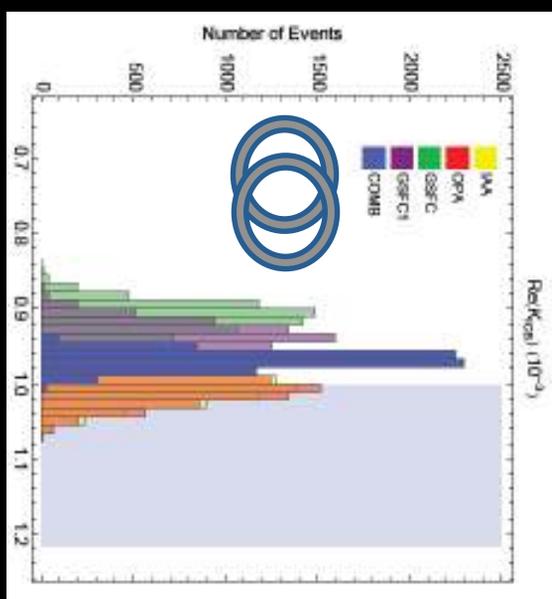
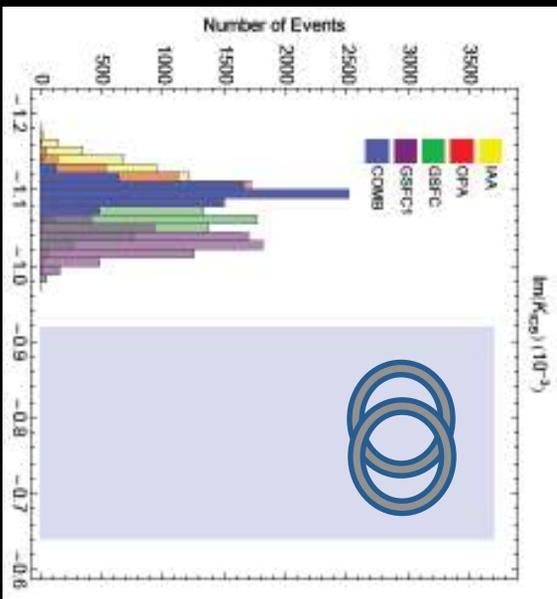
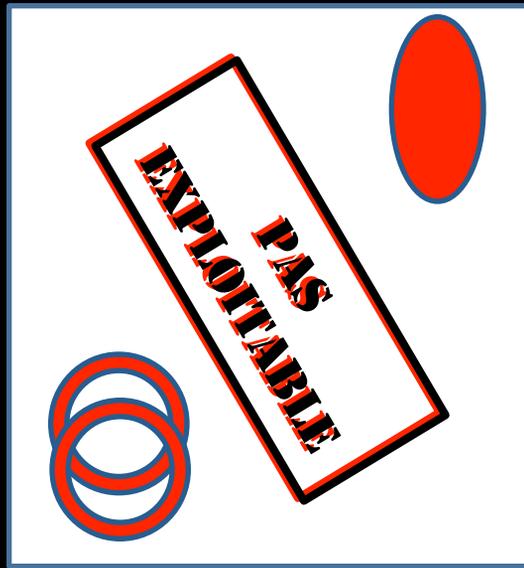
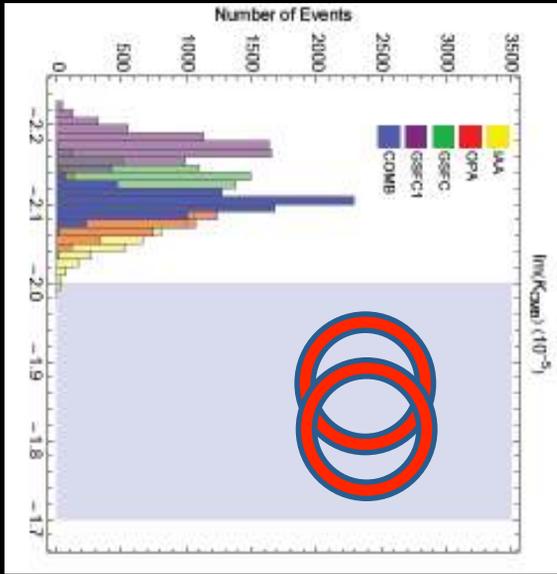


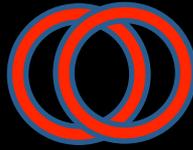
$\sigma_4$  = pas d'effet, on oublie  
 $N_3$  pas intéressant, on oublie aussi



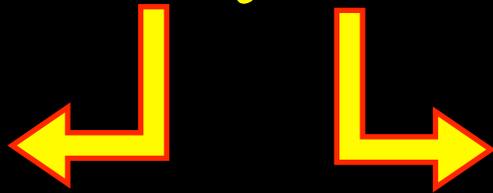
# Partie Imaginaire

# Partie Réelle





Couplage visco-  
magnétique

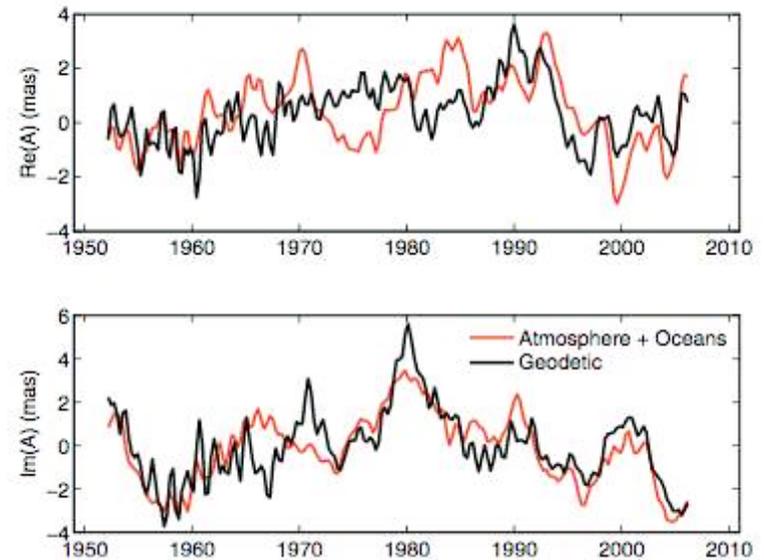
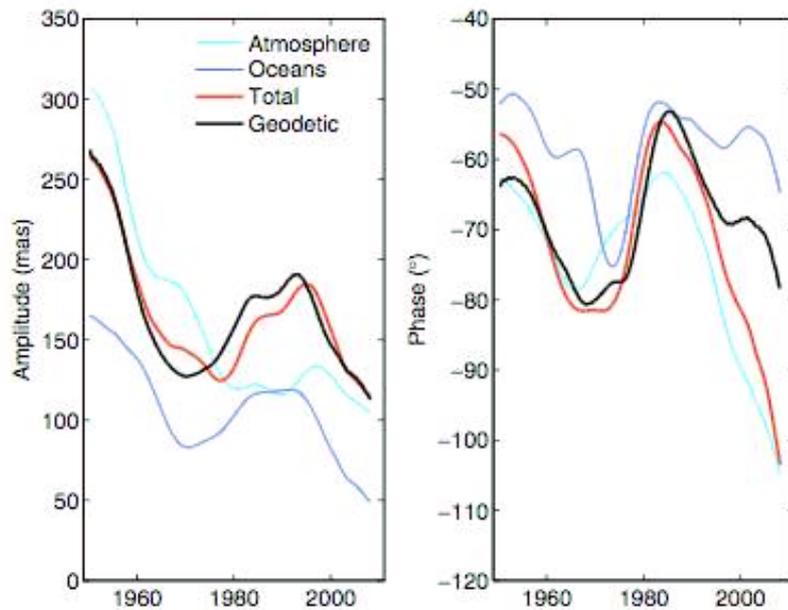


Couplage magnétique  
pur

# L'excitation des modes libres

- Candidats: Océans, atmosphère, tremblements de Terre

# L'excitation des modes propres: I. Chandler

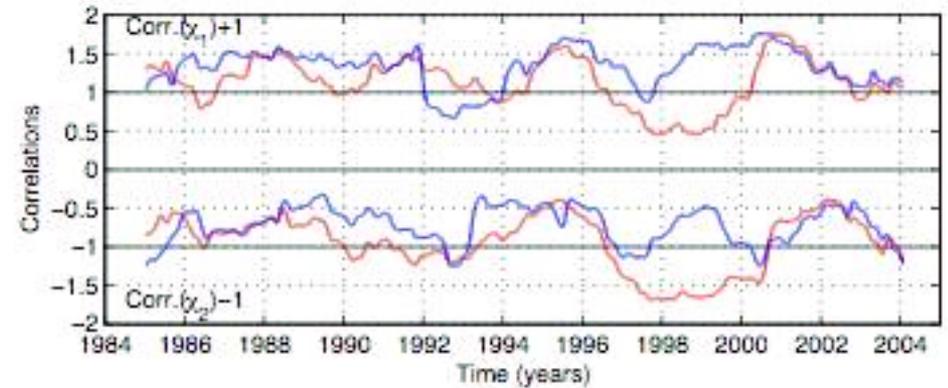
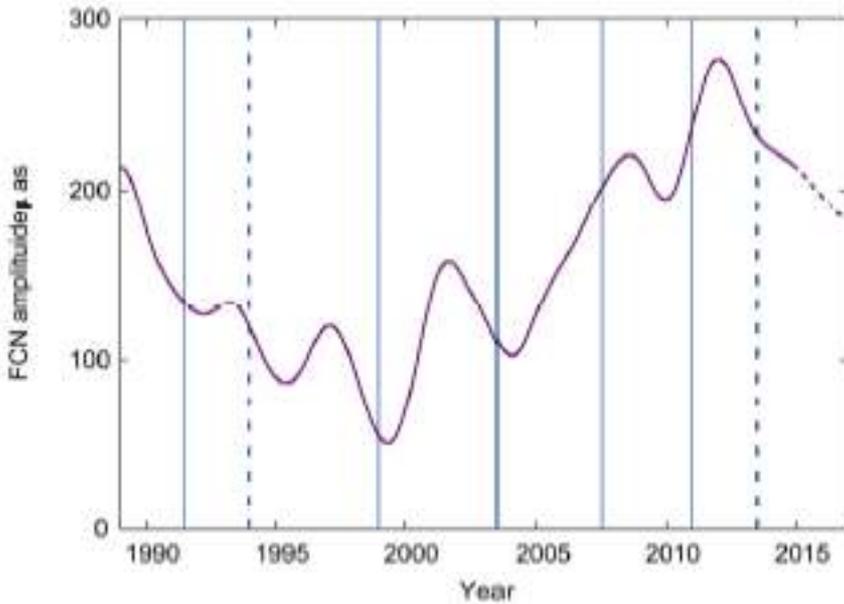


**Fig. 3.** The observed and modeled variations in the amplitude and the phase of the Chandler mode.

Bizouard et al., 2011

Chandler: OK

# FCN



Atmosphère et océans?  
Brzezinski et al., 2011

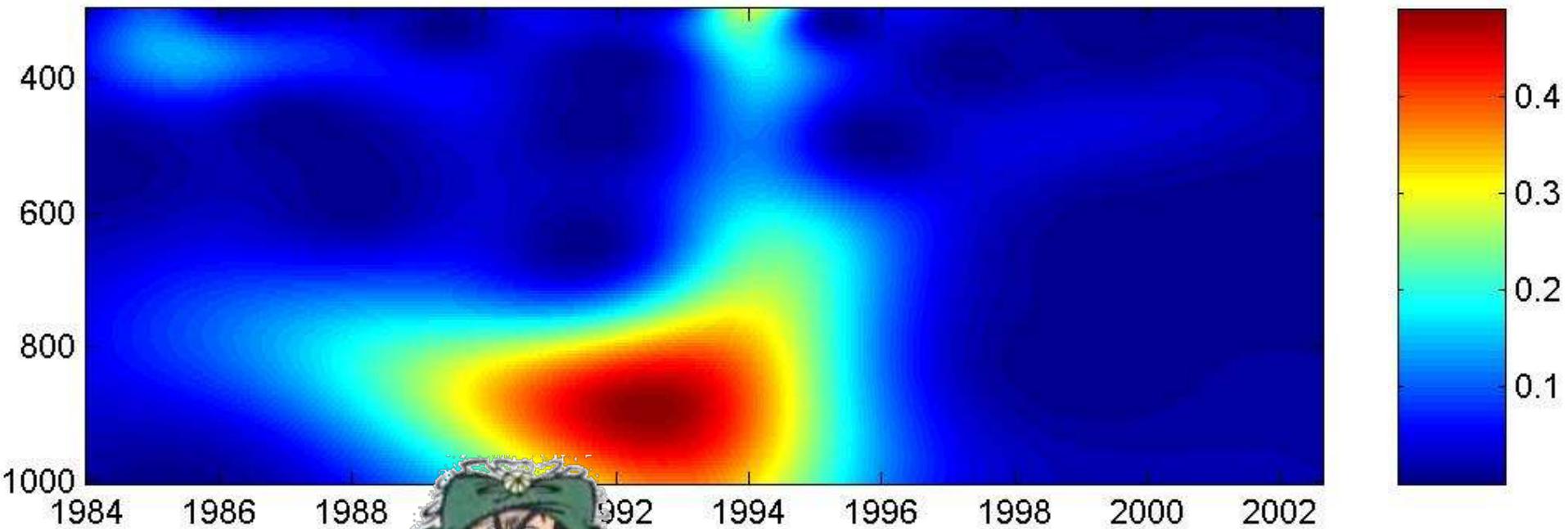
Jerk géomagnétiques?  
Malkin 2015

Tremblement de terre?  
Degryse & Dehant, 1996

Table 3  
Changes in obliquity and in longitude

Localization	$\Delta\epsilon_F$ (mas)	$\sin \epsilon_0 \Delta\psi_F$ (mas)	$\Delta\epsilon_{FI}$ (mas)	$\sin \epsilon_0 \Delta\psi_{FI}$ (mas)
Chile	$-2.65 \times 10^{-3}$	$-9.72 \times 10^{-4}$	$9.53 \times 10^{-9}$	$-1.48 \times 10^{-8}$
Alaska	$-3.01 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-3}$	$-7.35 \times 10^{-9}$	$-3.57 \times 10^{-9}$
Alaska (Kanamori)	$-7.48 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$-1.04 \times 10^{-8}$	$-7.12 \times 10^{-9}$
Bonin Islands	$-2.55 \times 10^{-7}$	$-6.35 \times 10^{-7}$	$4.21 \times 10^{-12}$	$-6.82 \times 10^{-13}$
Mexico	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$-1.12 \times 10^{-10}$	$9.54 \times 10^{-11}$
Fiji Islands	$-5.67 \times 10^{-7}$	$1.58 \times 10^{-6}$	$-8.86 \times 10^{-12}$	$-5.61 \times 10^{-12}$
Sakhalin	$2.44 \times 10^{-6}$	$-6.47 \times 10^{-7}$	$5.98 \times 10^{-13}$	$1.57 \times 10^{-11}$
Bolivia	$-5.22 \times 10^{-5}$	$-1.51 \times 10^{-7}$	$7.22 \times 10^{-11}$	$-3.17 \times 10^{-10}$
Kuril Islands	$-7.97 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-5}$	$-4.94 \times 10^{-11}$	$-5.20 \times 10^{-10}$
Japan	$1.65 \times 10^{-5}$	$-3.19 \times 10^{-5}$	$1.72 \times 10^{-10}$	$1.44 \times 10^{-10}$

## Et la FICN?



J'ai observé la FCN!

C' est pas pour critiquer mais...A la louche... vu la taille de la graine...

L' effet devrait être...

1000 fois plus petit...



Enquiquineur (vill!)



~~Pleins de pages~~  
Quelques ~~lignes~~ de math plus tard...

$$\int x(t) dt = \frac{x(t)}{dt^n} = (\omega)^n$$
$$u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial t}$$
$$v = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}\right) \tan k}$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha(k) e^{i(kx - \omega t)} + \beta(k) e^{i(kx + \omega t)}) \cos\left(\frac{r \pm 2}{2}\right)$$
$$E = mc^2$$

Damned, il a raison!

Le vil!



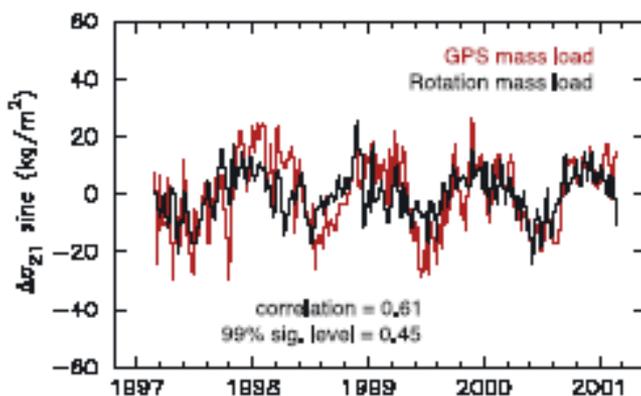
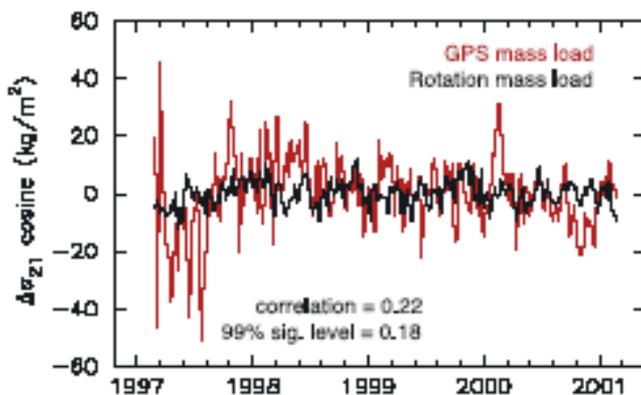
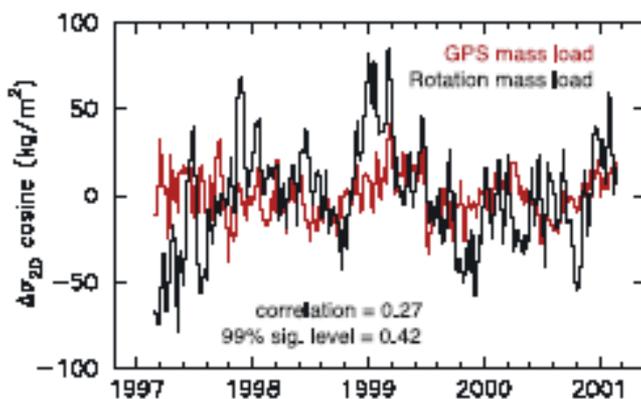
Le chercheur peut alors laisser libre court à sa perplexité...



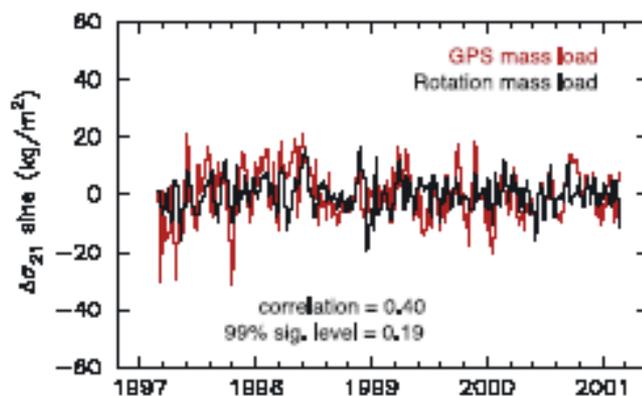
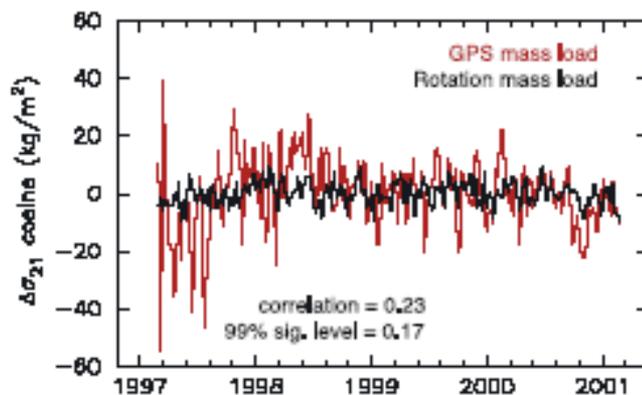
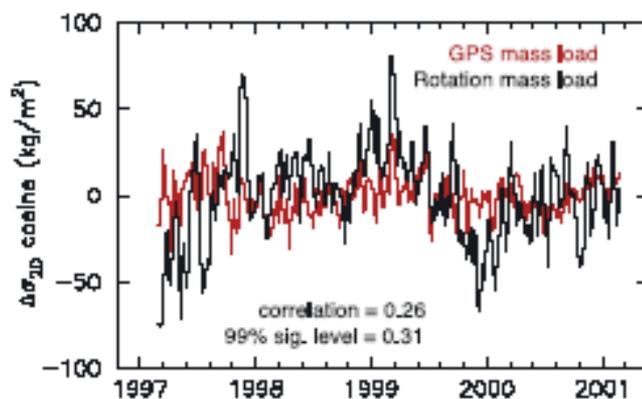
# Et si on prenait la masse de la gravimétrie?

- Mauvaise idée...
  - la dynamique est « forcée » par les différences de pression
  - introduire une masse indépendante violerait la conservation du moment cinétique
- par contre, les masses pourraient être assimilées dans les modèles.
- mais il faudrait pouvoir séparer...

## SEASONS INCLUDED



## SEASONS REMOVED



# Conclusions

La rotation de la Terre est un sujet complexe, passionnant, interdisciplinaire, et on n'est pas encore au bout.

Il y a plus dans la dynamique que ce qui est présent dans les conventions.

En particulier, l'effet des couches fluides (atmosphère, océan, hydrologie, noyau) souffre encore de notre connaissance imparfaite de leur dynamique

- Et donc, pour les conventions:
  - Difficile de proposer une correction pour les effets fluide (hors marée), car en amélioration
  - Peut-être proposer des solutions combinées des options existantes, mais sur quelle base?
  - Peut-être proposer des méthodes statistiques d'évaluation des options existantes?