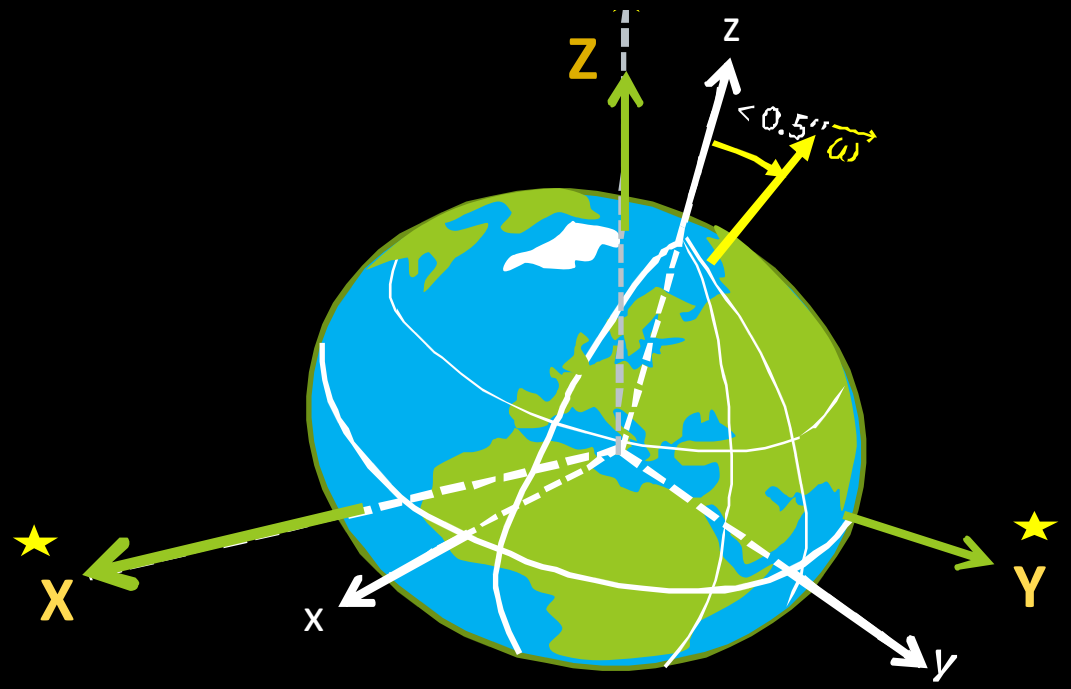
Rotation de la Terre et IERS

(International Earth Rotation and Reference System Service)

Christian Bizouard, Observatoire de Paris



Plan de l'exposé

I. Rotation de la Terre et systèmes de référence spatio-temporels
II. La découverte des irrégularités de la rotation de la Terre par astrométrie optique – BIH et ILS
III. L'astro-géodésie spatiale: déterminations géodynamiques globales (rotation + déformation) coordonnées par l'IERS
IV. Rotation de la Terre et géophysique

I- La Rotation de la Terre: une affaire de référence d'espace…

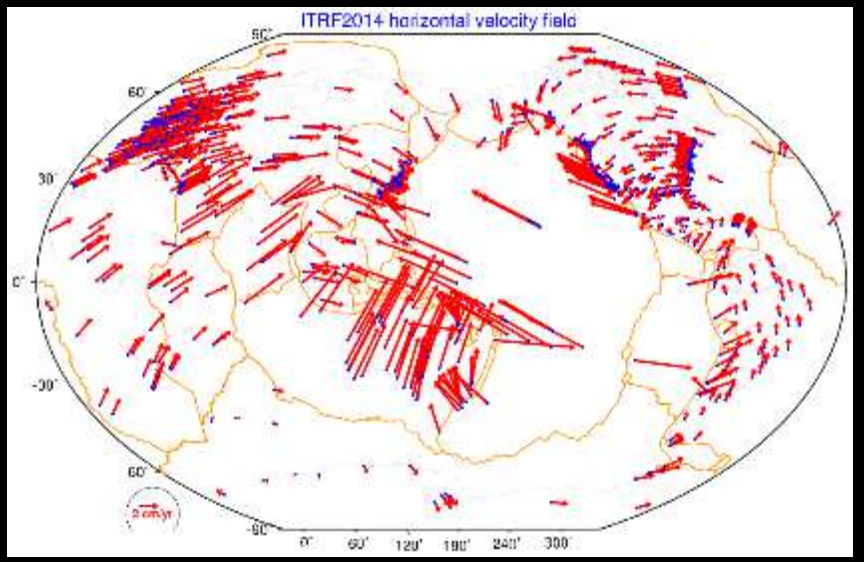
C'est la rotation

d'un repère attaché la croûte terrestre – et ne présentant d'autres déformations que celles linéaires dans le temps –

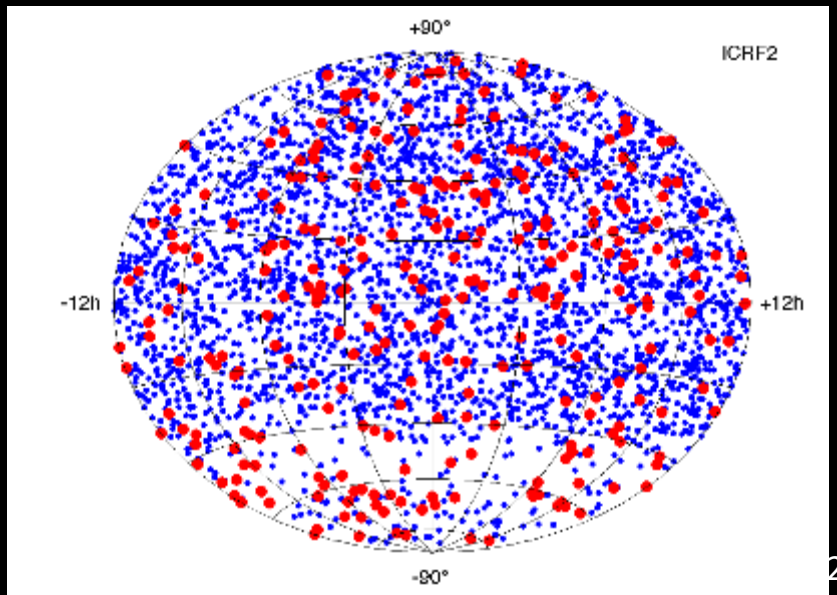
par rapport

à un repère céleste - matérialisé depuis 1997 par les directions barycentriques de quelques centaines de radio-sources extragalactiques

Le repère terrestre international, version 2014

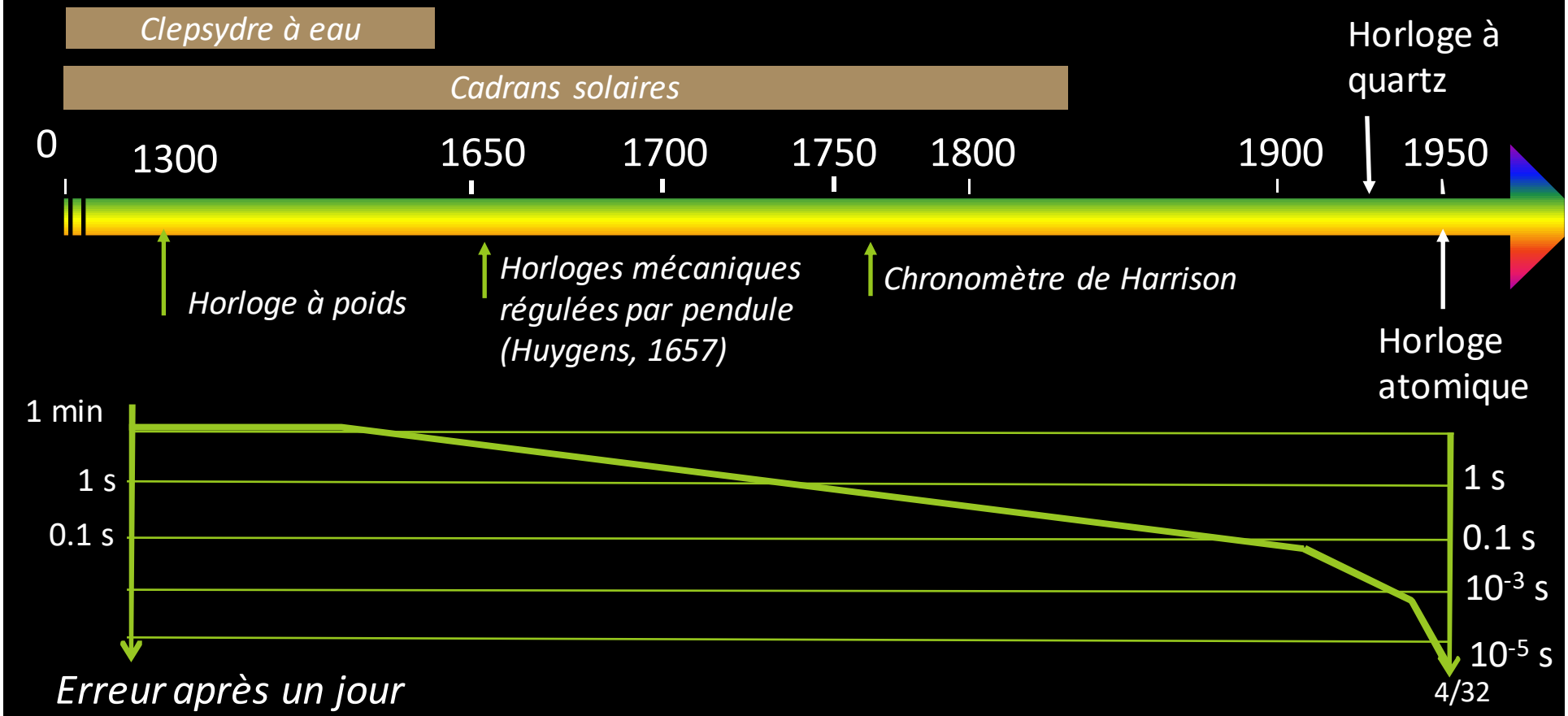


Le repère céleste international, version 2



I- La Rotation de la Terre: une affaire de … de temps aussi

- La seule position des objets constituants les repères spatiaux ne dit pas comment leur rotation relative évolue dans le temps
- Cette évolution se déduit de la datation des objets observés (étoiles, quasars, satellites,…)

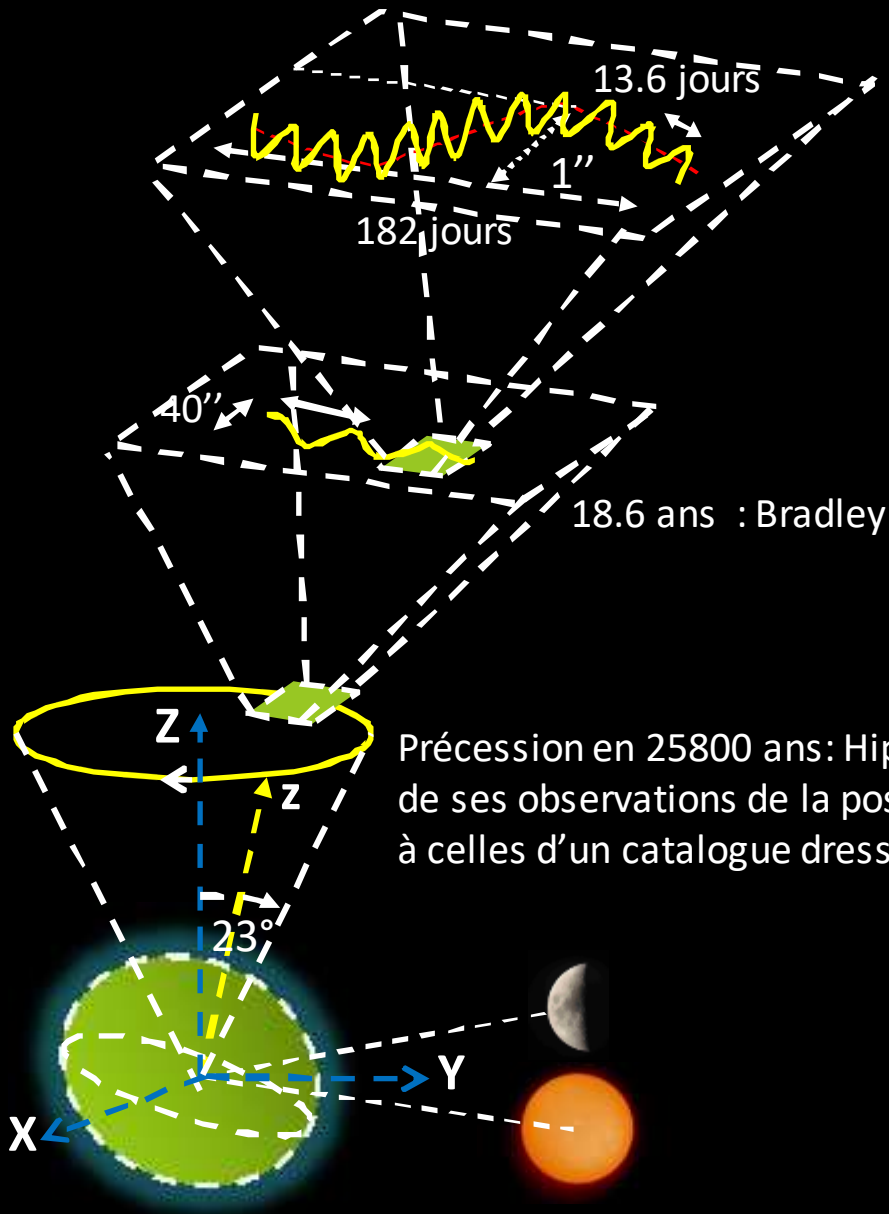


I- Jusqu'en 1890 la rotation terrestre était régulière

Jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle tout allait bien: la rotation de la terre ronronnait, assurant le rôle d'une horloge sans défaut - le temps universel - et son axe n'était affecté que par des oscillations régulières.

I- La précession-nutation à la fin du XIXe siècle

Effet du couple de marée luni-solaire sur le bourrelet équatorial



18.6 ans : Bradley ~1720 grâce à un télescope

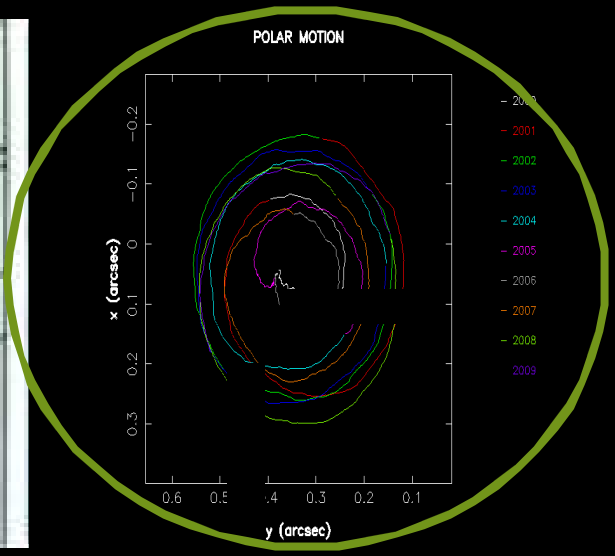
Précession en 25800 ans: Hipparque ~-130 AV JC par comparaison de ses observations de la position des étoiles dans le système équatorial à celles d’un catalogue dressé un siècle avant par Timocharis

Rotation diurne uniforme + précession-nutation de l'axe: c'est 99,9999% de la transformation de rotation!

Résidu de 1 millionième: pas de quoi fouetter un chat.

Cependant...

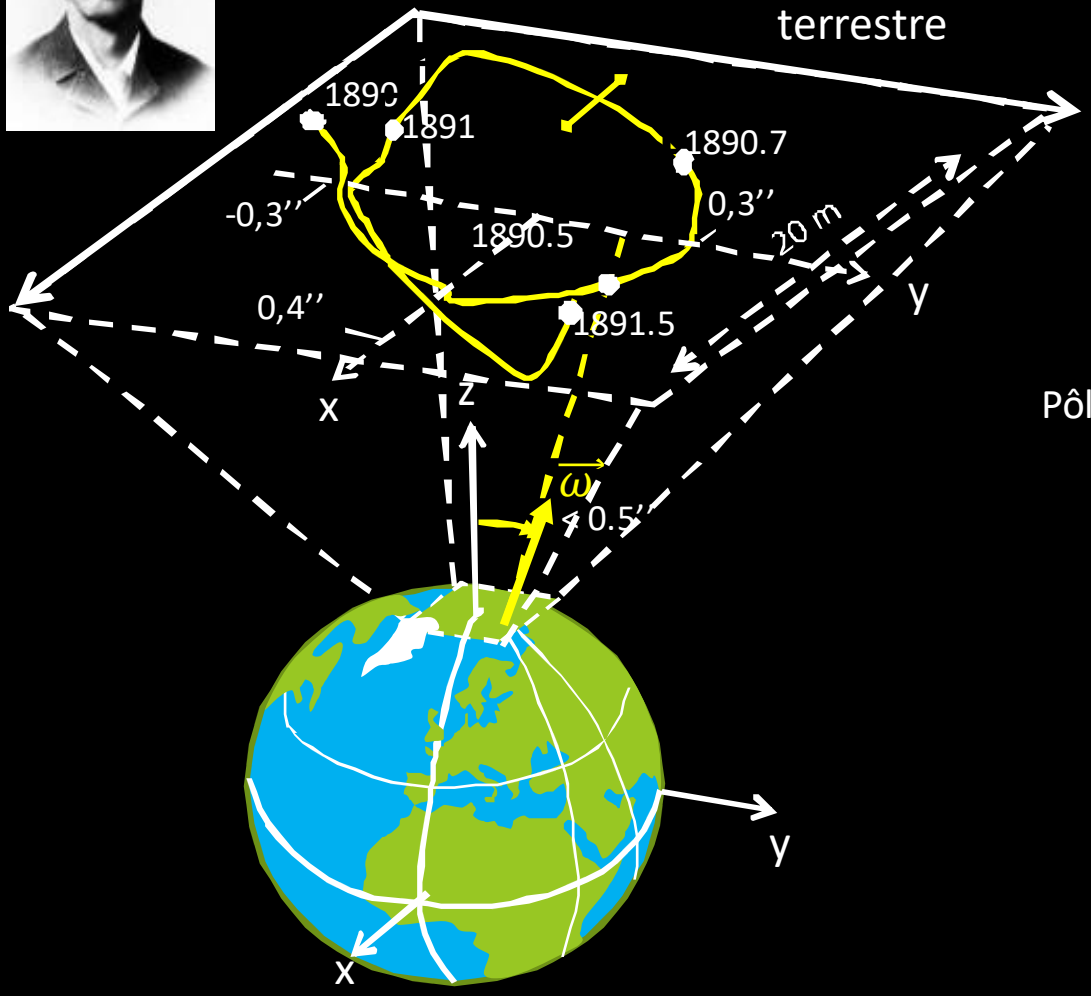
II- Les irrégularités de la rotation terrestre par astrométrie optique (~1940-1980)



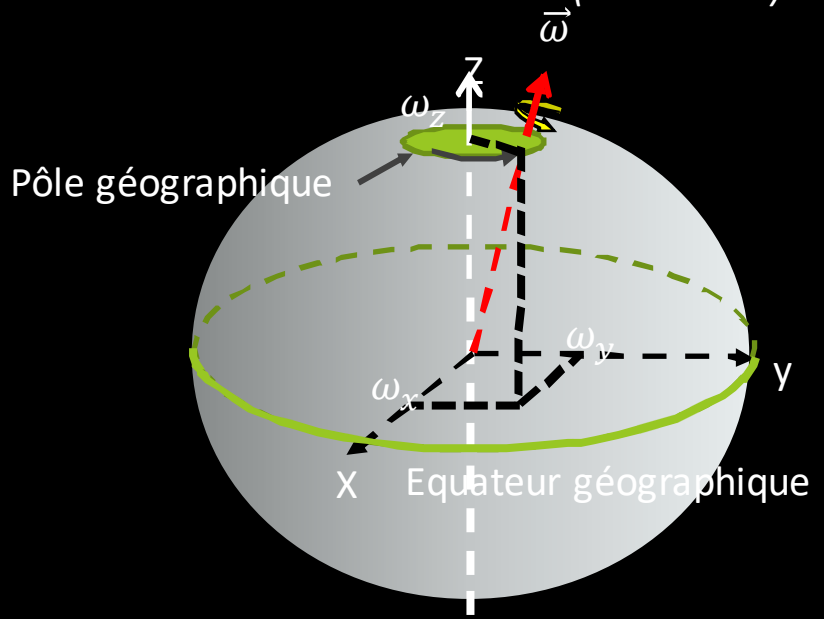
Lunette méridienne + horloge mécanique + chronographe

II- Découverte du mouvement irrégulier du pôle dans le repère terrestre de nature géophysique

Découvert en 1891,
par C.S. Chandler (1846-1913)



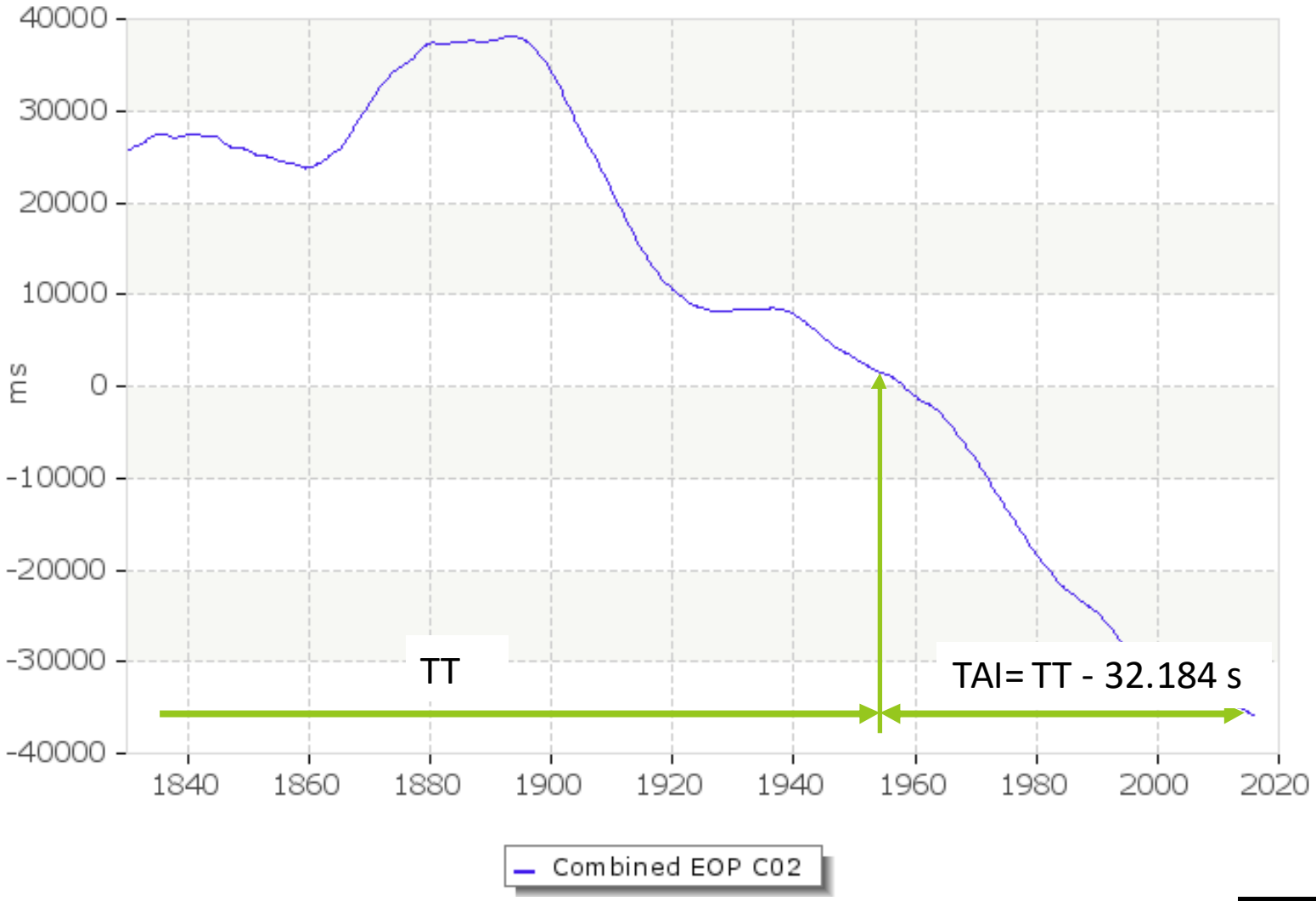
Leonard Euler (1707-1783)



Gxyz: axes principaux d'inertie

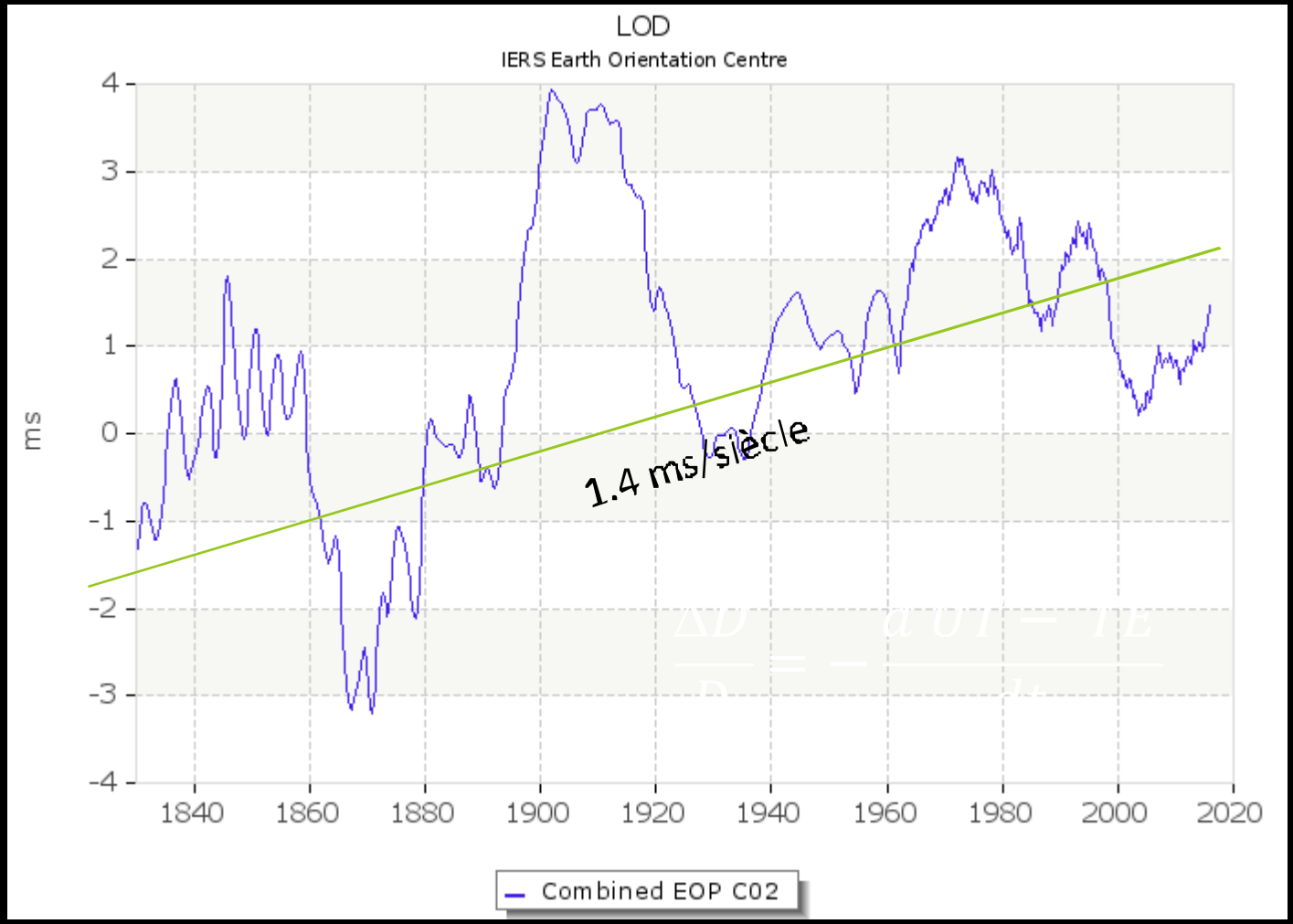
II- 1920-1930: Irrégularités dans UT par comparaison au temps de la mécanique céleste

UT1 – (TT - 32.184s) = UT1 – TAI après 1958

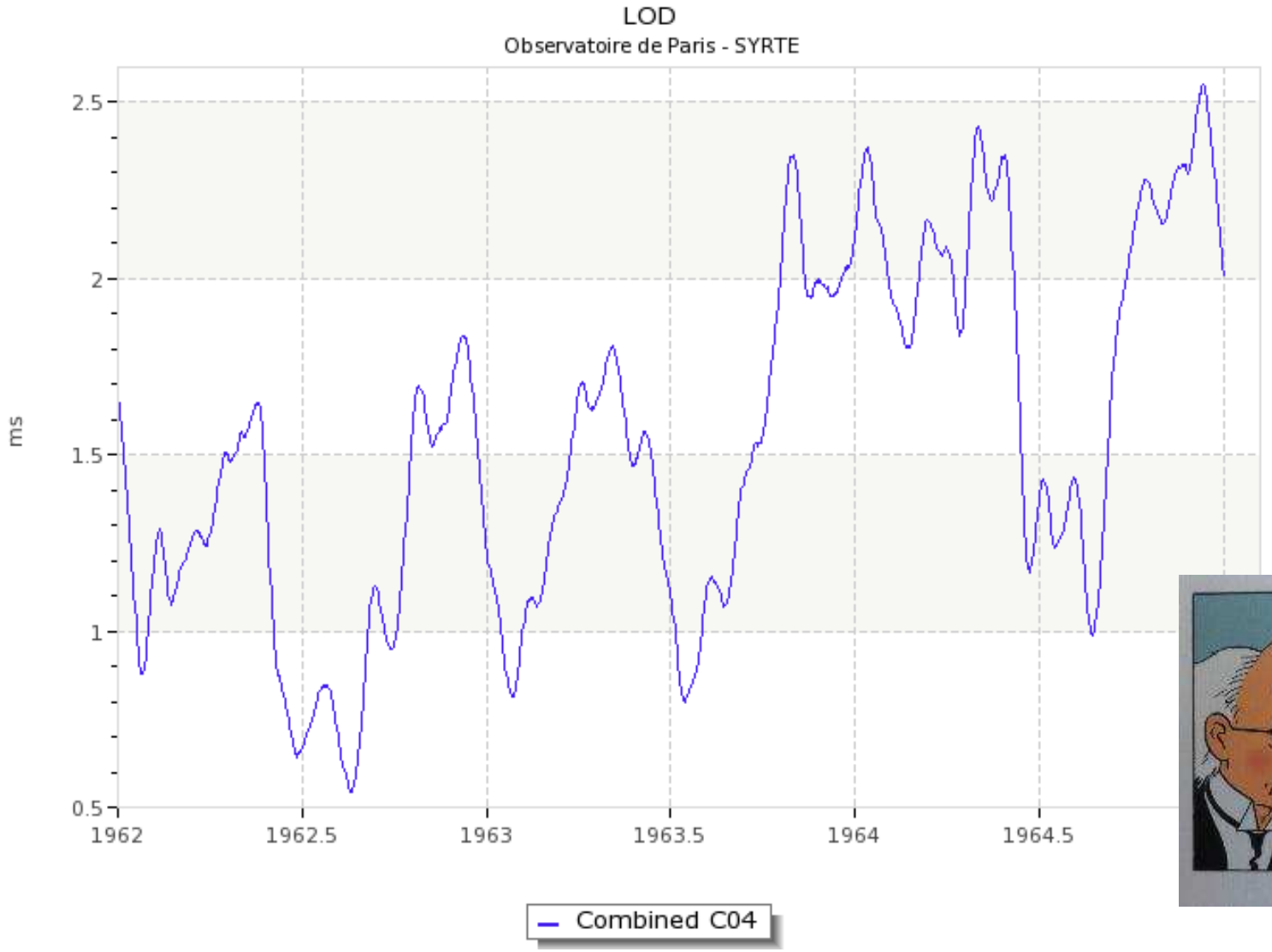


II- 1920-1930: Variations multi-décennales et séculaires de la durée du jour par comparaison au temps lunaire

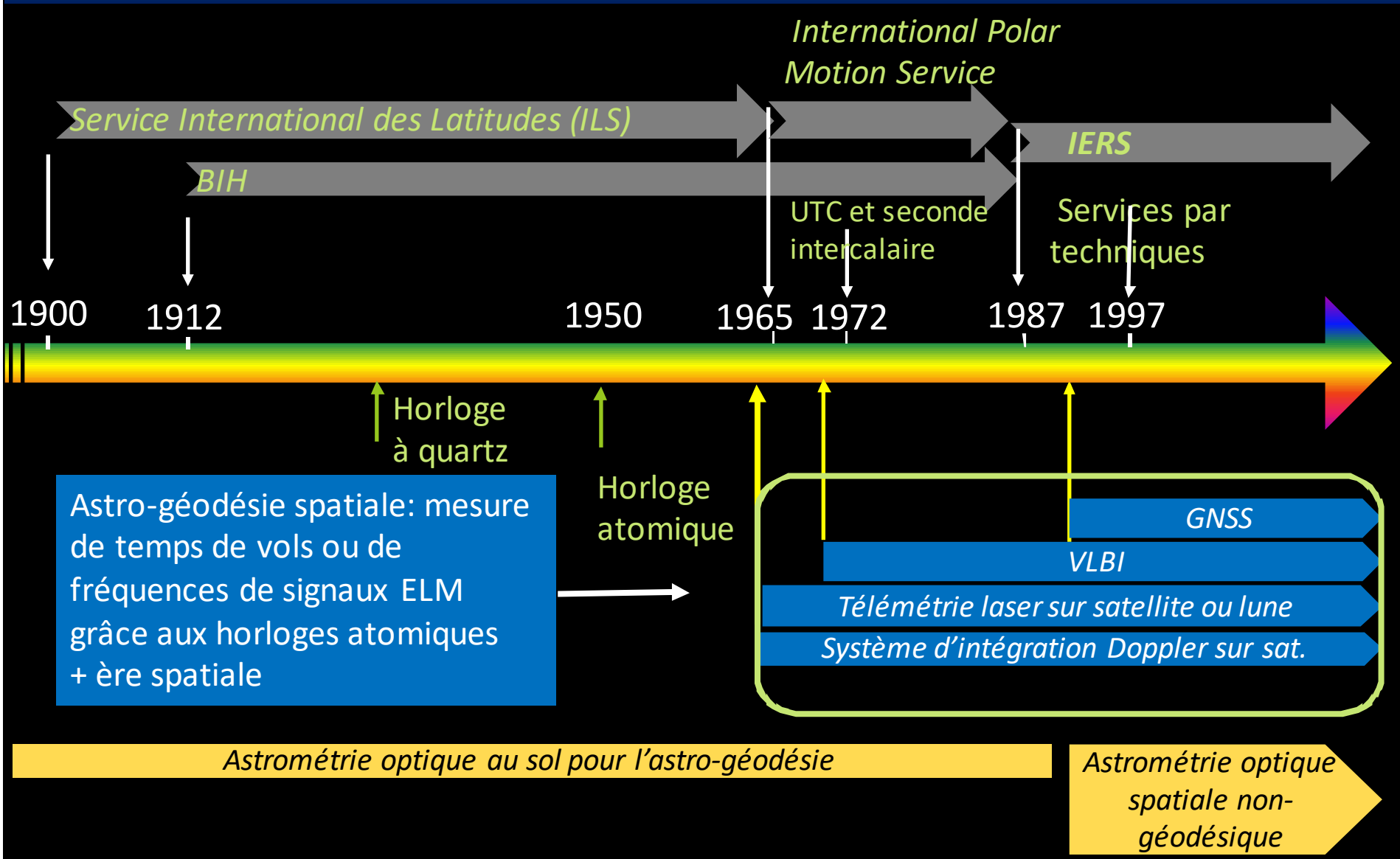
Spencer Jones (1926), de Sitter (1927) - Effet du noyau et freinage due aux marées



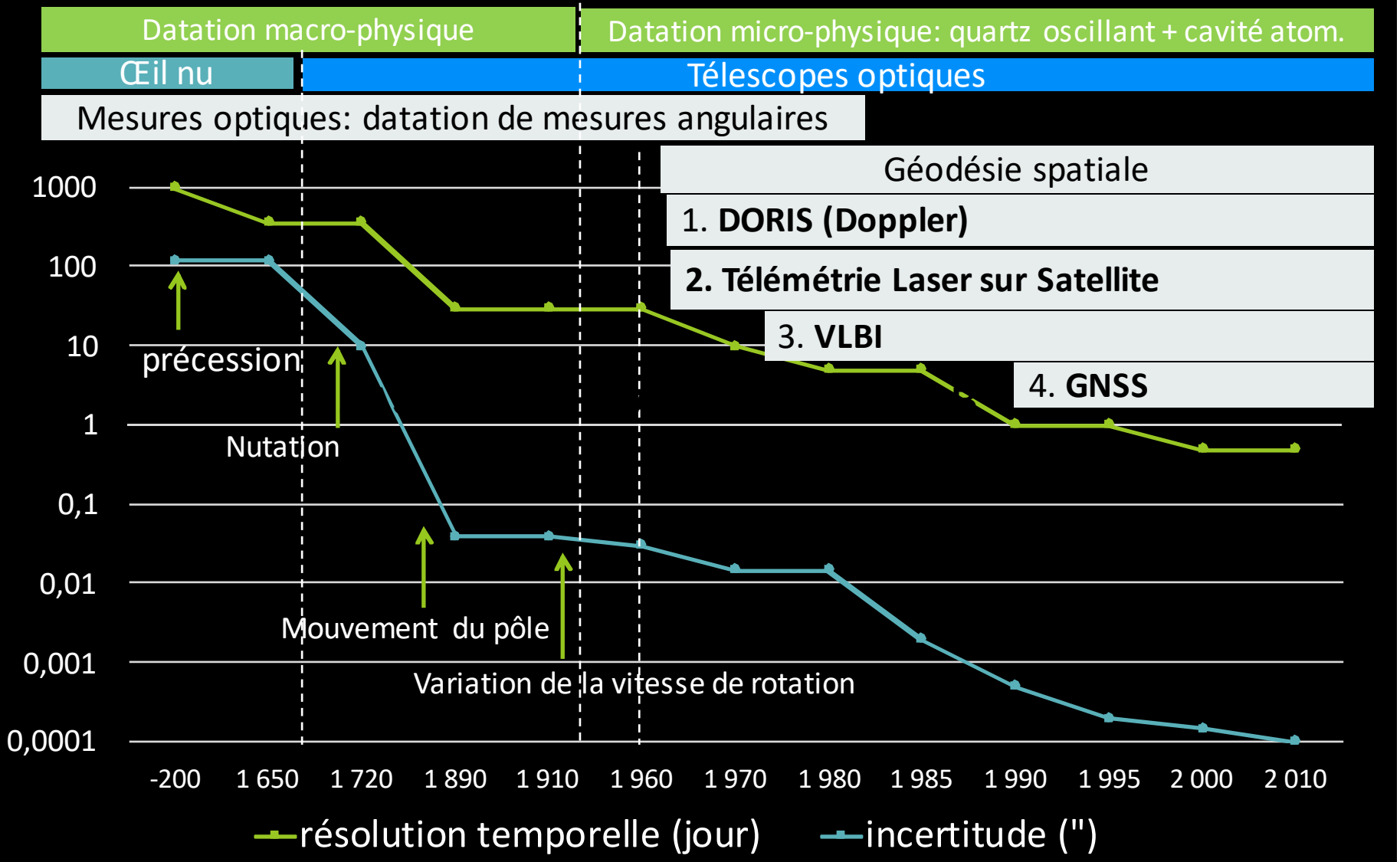
II- 1940-1950: horloges à quartz →Découverte des variations saisonnières du temps universel ou de la durée du jour



III-L'astro-géodésie spatiale et la création de L'IERS



III- Précision et résolution temporelle sur la transformation de rotation



III- Précision du positionnement → la croûte terrestre perd sa rigidité

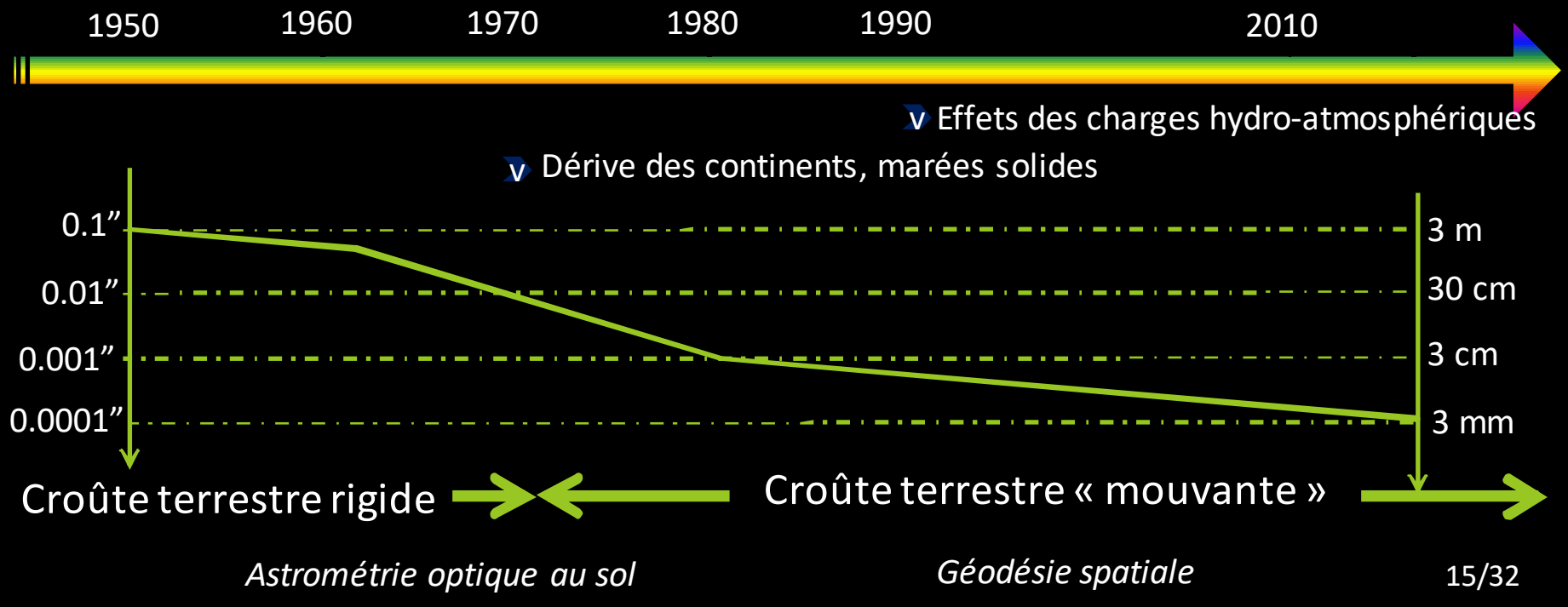
Avec la géodésie spatiale la croûte Terre devient mouvante. D'une précision de 1 m avec l'astrométrie optique en 1960, on mesure les positions des stations à 3 mm à l'heure actuelle:

→ Mouvement tectonique qq cm/an

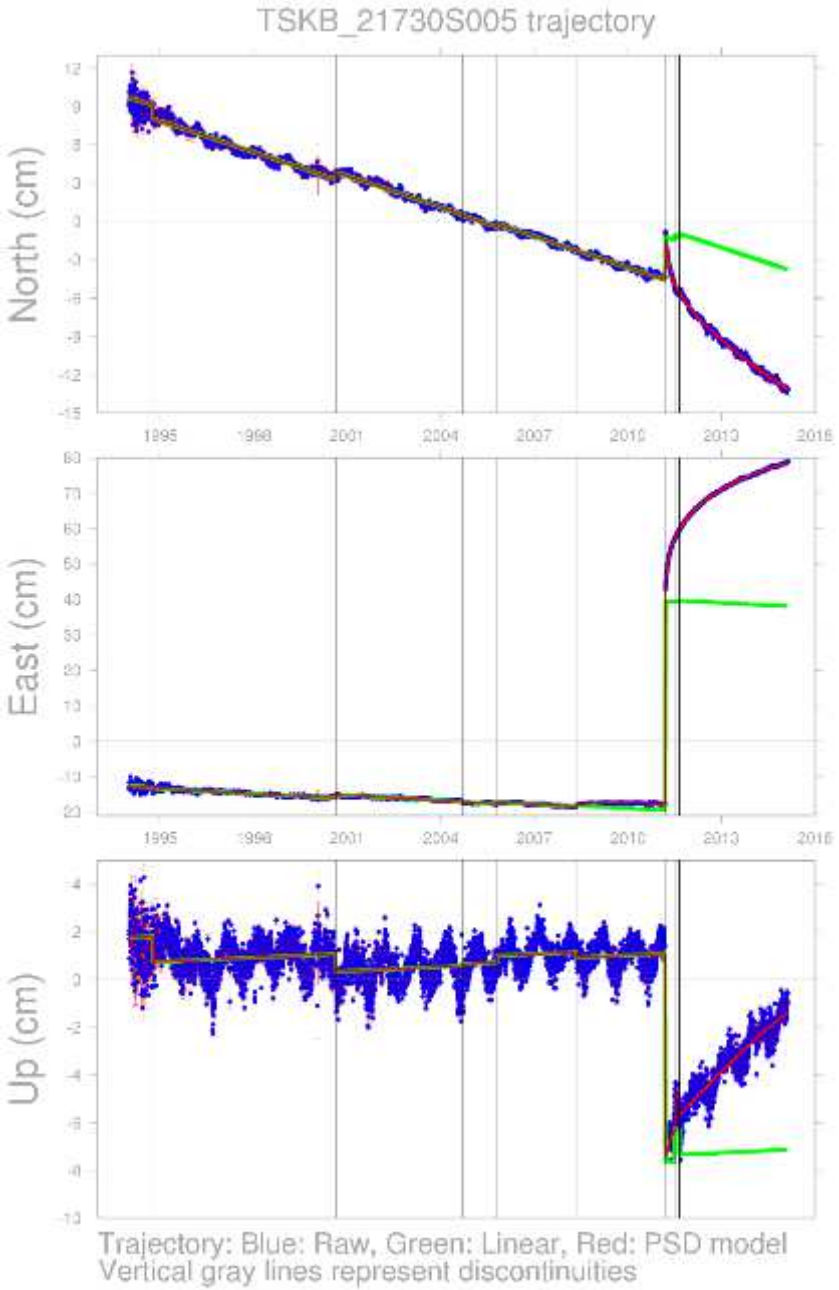
→ marées (modèle) < 1 m/jour

→ Déplacements provoquée par les charges superficielles atmosphériques, océaniques (hors marées) et hydriques continentales

→ Déplacements sismiques < 20 m en 1 minute et post-sismique par relaxation



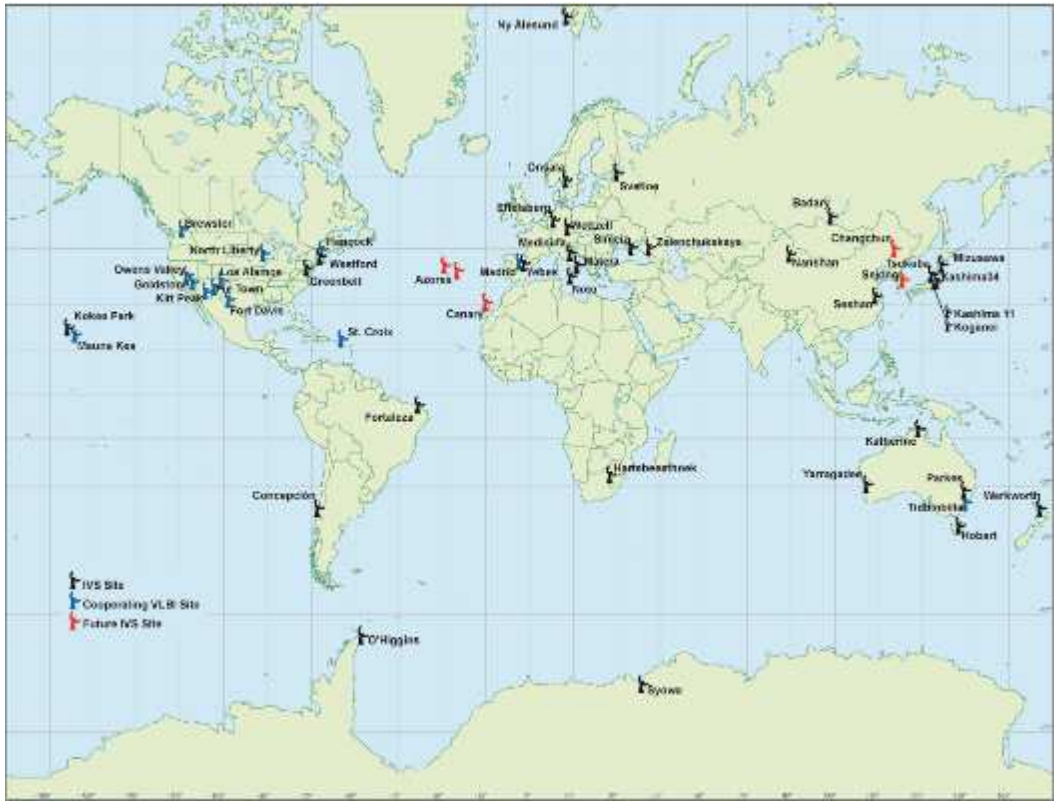
III- Déplacement de la station de Tsukuba (Japon) depuis 2002



Effets de marées et de dérive des continents retirés

III- Réseau international de stations d'observations: principale raison d'être de l'IERS

Radio-télescope de Simiez (Crimée, 2003)



Réseau VLBI pour l'astro-géodésie

III- La réduction des observations: exemple des systèmes de navigation spatiale par satellite (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU)

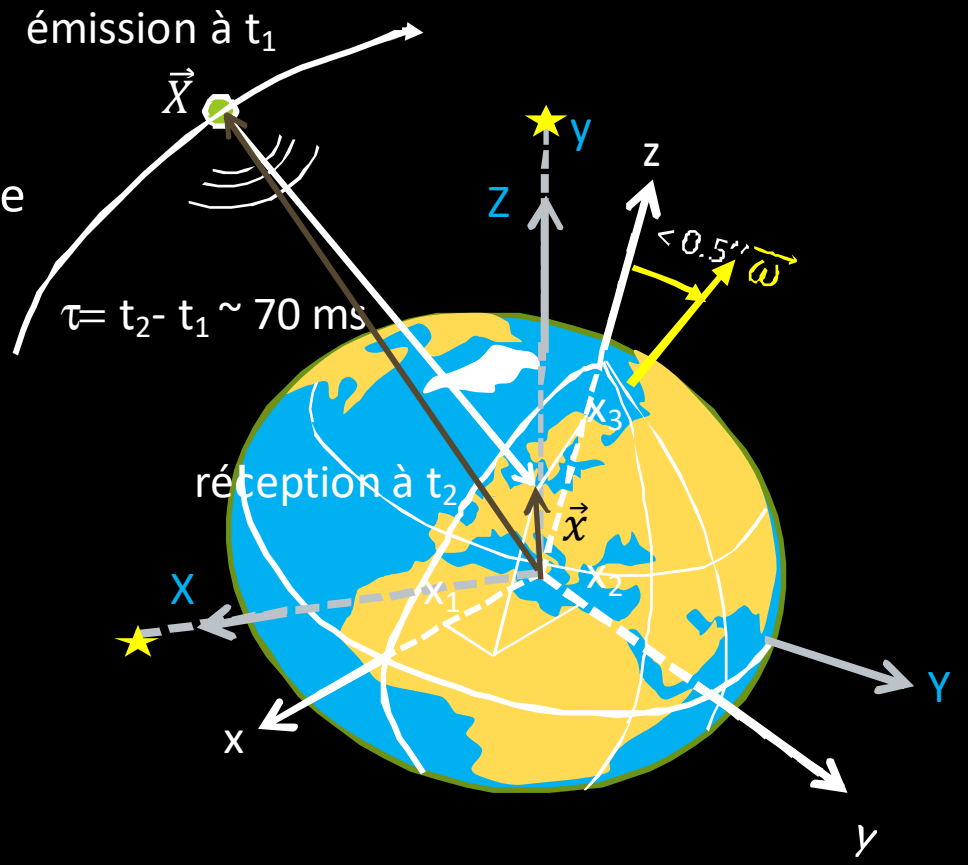
La pseudo-distance d ou temps de vol et ses grandeurs d'influence:

- $[X]$= coordonnées célestes du satellite (dans GXYZ)
- $[x]$ = coordonnées terrestre du récepteur (dans Gxyz)
- $[X]$ = R $[x]$

R = matrice de rotation de la terre

$$R = R_{\mathrm{mod}}\, \delta R(\ \underbrace{x, y, UT1 - TAI}_{Paramètre\ de\ Rotation\ de\ la\ Terre}\ )$$

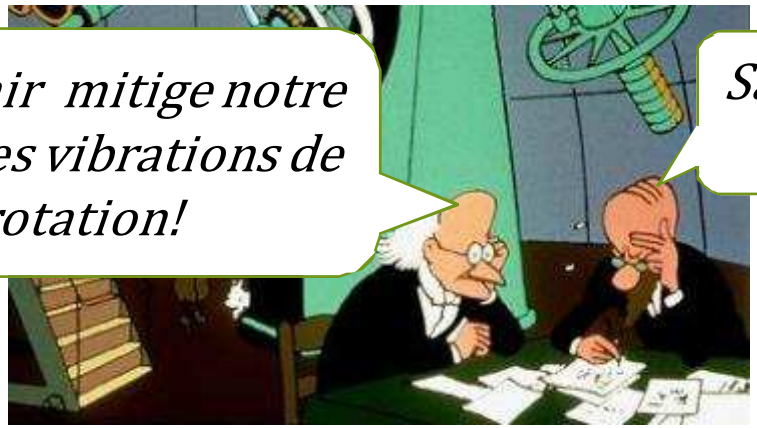
$$d = \tau/c = f(\ \underbrace{[x], PRT}_{Influence\ géodynamique}\ ,\ \underbrace{[X]}_{Influence\ orbitale}\ ,\ \underbrace{d_{tropo}, \ldots}_{Influence\ atmosphérique}\ , d_{iono}\ \ldots.)$$



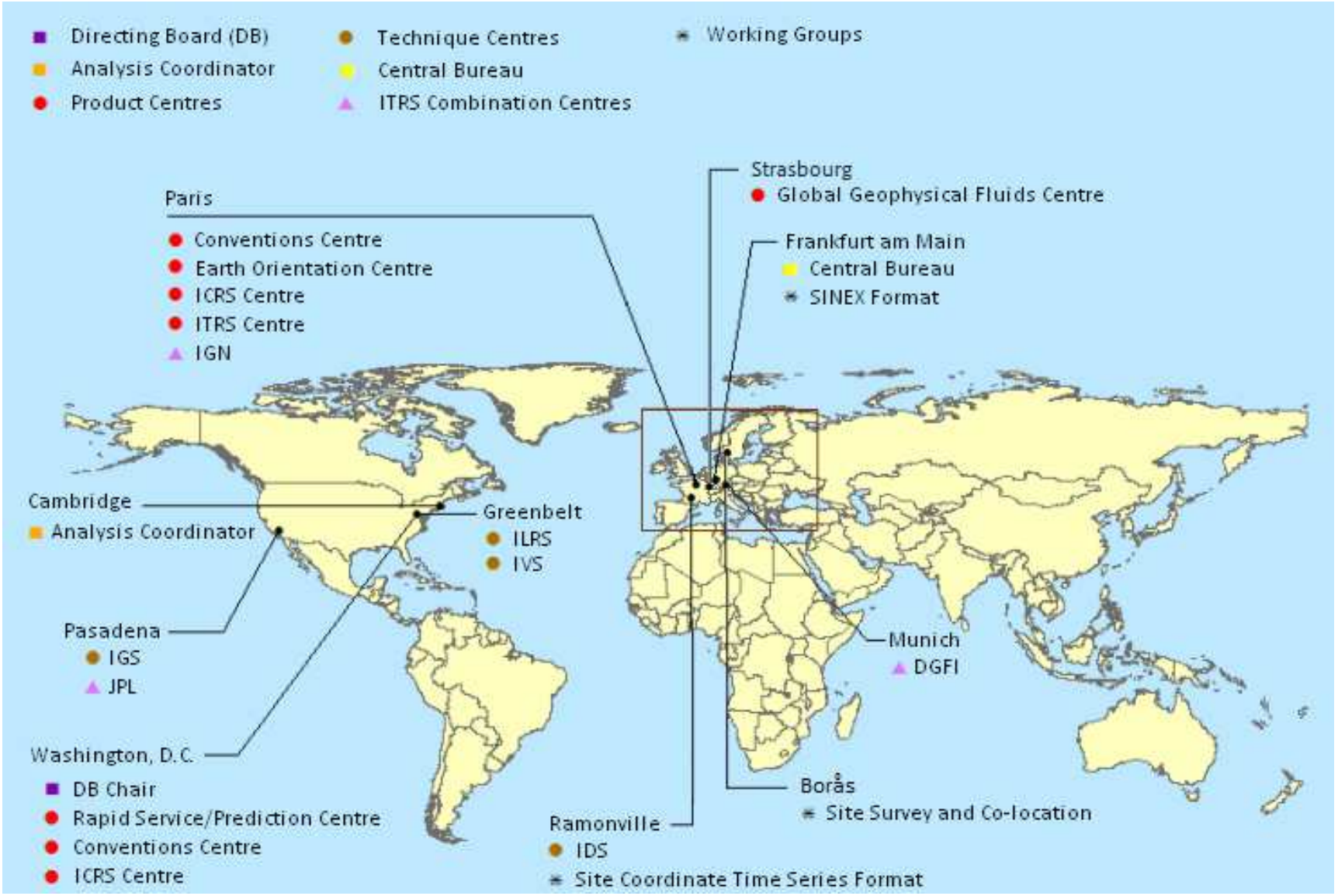
II- Modélisation du temps de vol

	VLBI	GNSS	SLR
reference	quasars	satellites	satellites
altitude	∞	25000 km	$1000 - 25000$km
one way/echo	quasar $\rightarrow$ ground	sat. $\rightarrow$ ground	ground $\rightarrow$ sat. $\rightarrow$ ground
accuracy			
delay in 10^{-9} s			
geometric delay	$0 - 10^8$	10^8	$10^7 - 10^8$
ionospheric delay	$3 - 300$	$3 - 300$	negligible
	bi-frequency correction	bi-frequency correction	
tropospheric delay	$1 - 10$	$1 - 10$	
instrumental delay	$100 - 1000$		
receptor clock bias	$100 - 1000$	3000	
relativistic delay	$0 - 100$	3	
	gravitational deflection	satellite velocity	

Table 3.1: Comparison of the space geodetic observable and order of magnitude



III- Organisation de l'IERS aujourd'hui



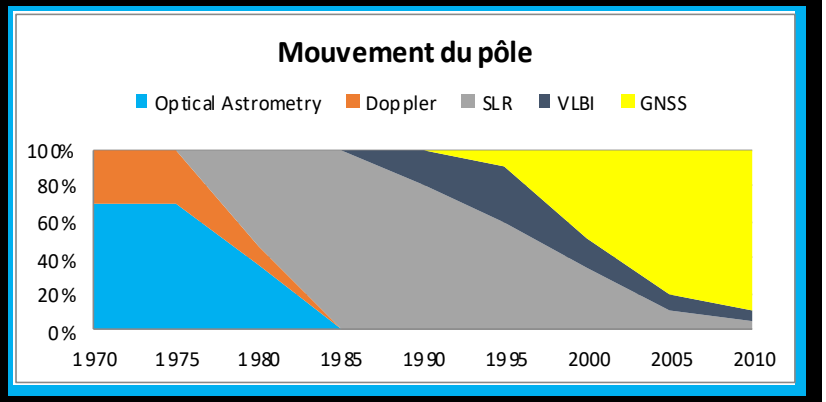
III- « Produits » de l'IERS de la rotation de la Terre

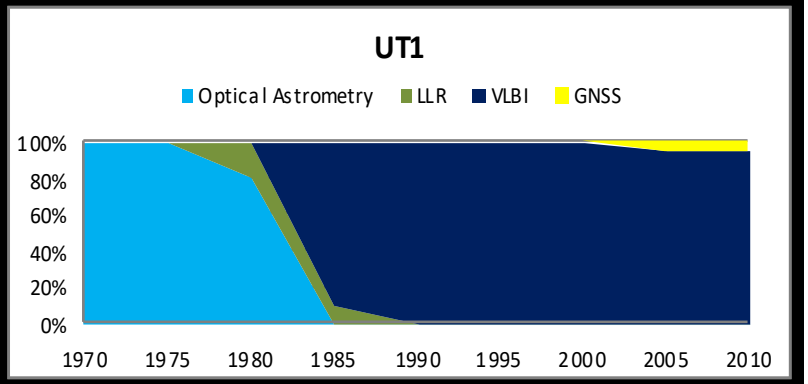
Par combinaison multi-technique, l'IERS fournit les irrégularités de rotation de la Terre sous la forme des paramètres de rotation de la Terre (coordonnées du pôle, UT1 – TAI, correction de nutation) les plus homogènes possibles

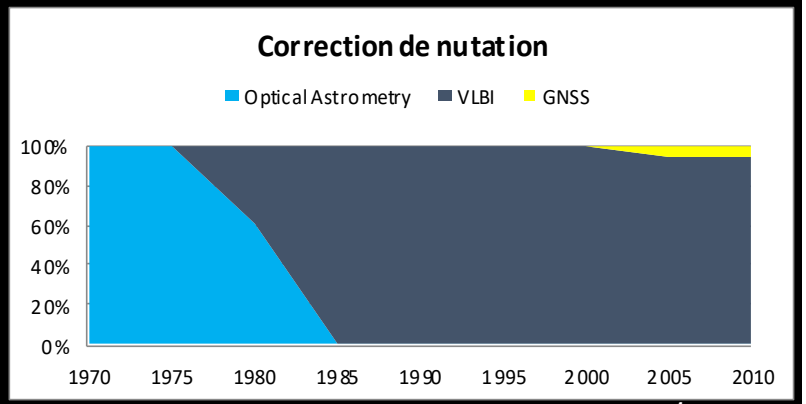
- Valeurs finales de référence remontant à 1840

- Valeurs rapides ou prédites de référence

Bien que toujours en place, la seconde intercalaire n'a plus d'utilité pratique



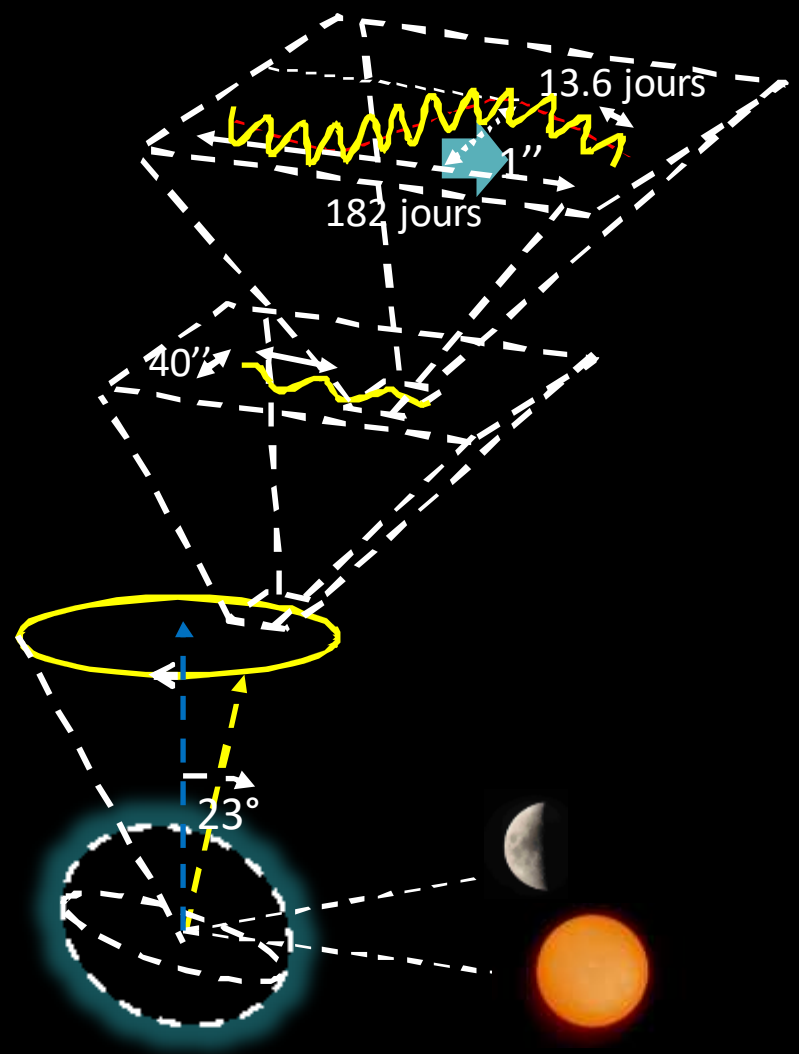




IV- Rotation de la Terre et Géophysique

IV- Théorie de la rotation d'une terre rigide

99,999% des variations de la rotation terrestre



Forces de marées luni-solaires

Distribution de masse terrestre rigide

Théorème du moment cinétique
Moment de force

Approche hamiltonienne
Potentiel de marée

1. Précession 50''/an- nutation < 20''
2. libration < 0.010 ms
3. Mouvement du pôle < 0.1 mas»

IV- Théorie de la rotation d'une terre non-rigide

Marée luni-solaire

Equations Différentielles LINEAIRES du 1er ordre

Nutation observée

Excitation « observée»

Nutation terre rigide

Excitation « géophysique »

Irrégularités de la rotation terrestre

Les calculs indiquent deux résonances effroyables dont les fréquences dépendent de l'élasticité du manteau et de l'aplatissement du noyau fluide!

Théorème du moment cinétique

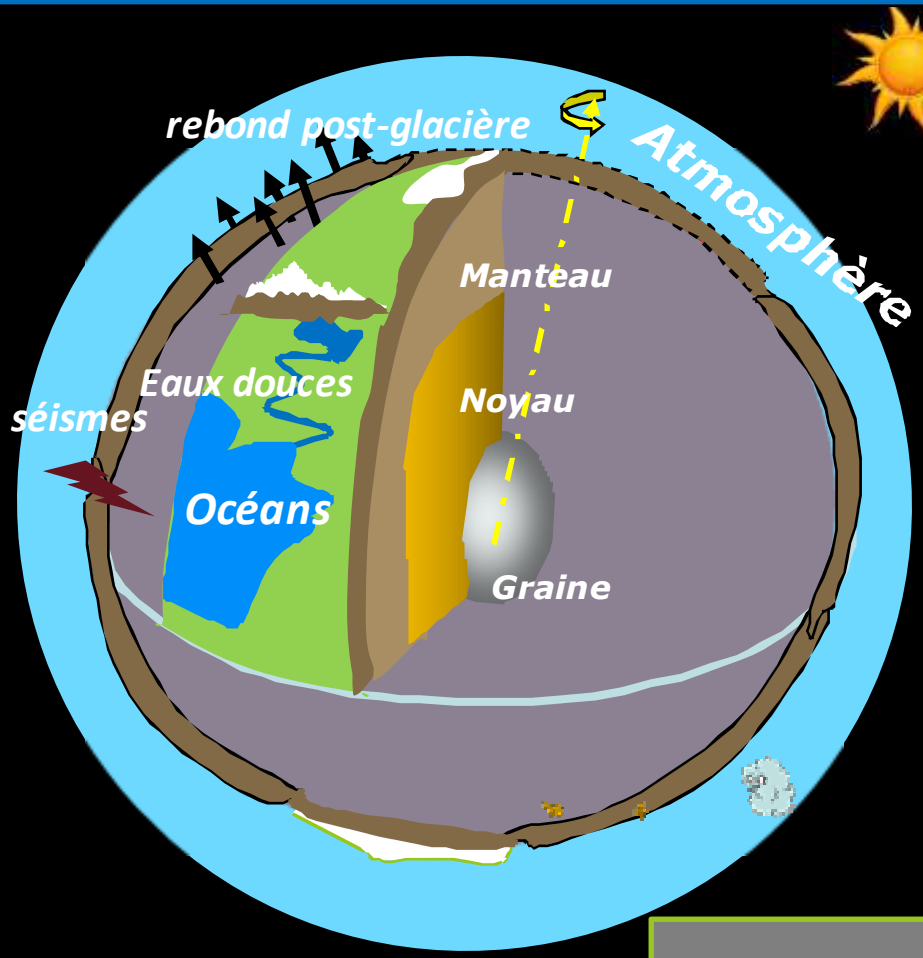
- système {Terre non rigide + fluides}
- linéarisé dans le repère terrestre
- Dépend modèle de Terre (rhéologie/structure interne)

Redistributions de masse géophysiques:

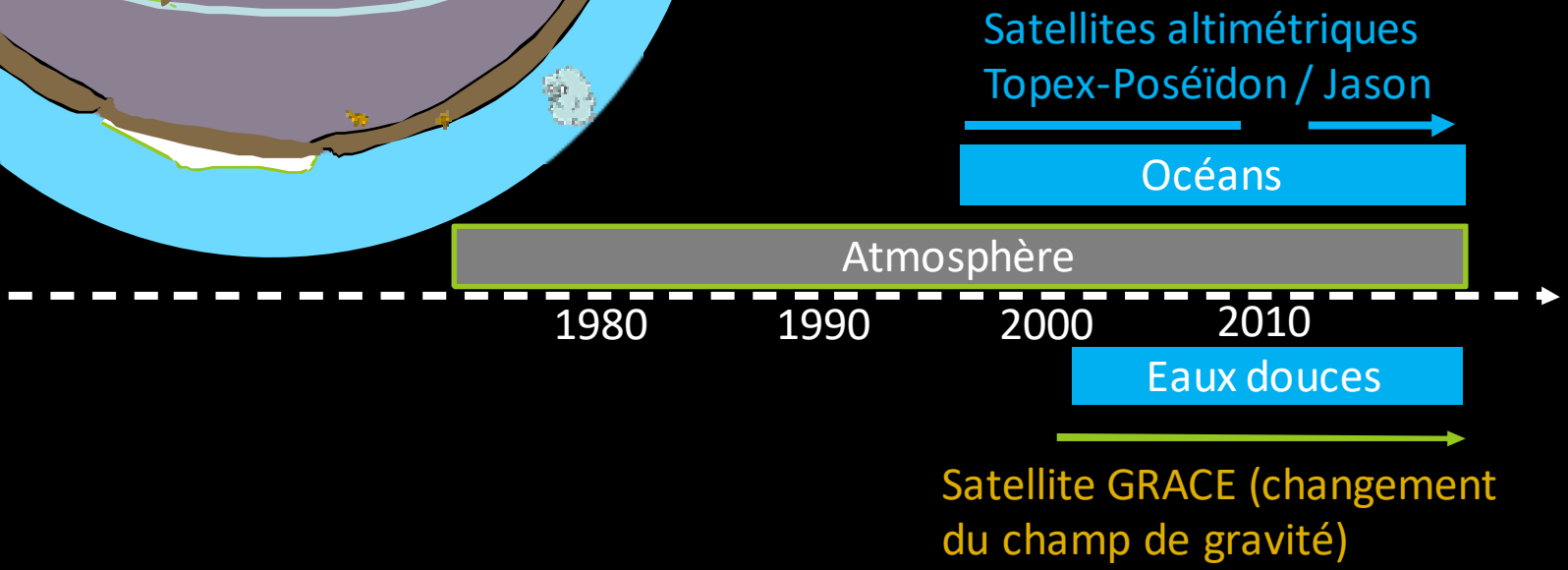
- ❑ Météorologique
- ❑ Océanographique
- ❑ Hydrologique …

couvrant la quasi-totalité de la surface terrestre

IV- Transports de masse « superficiels » et « internes »

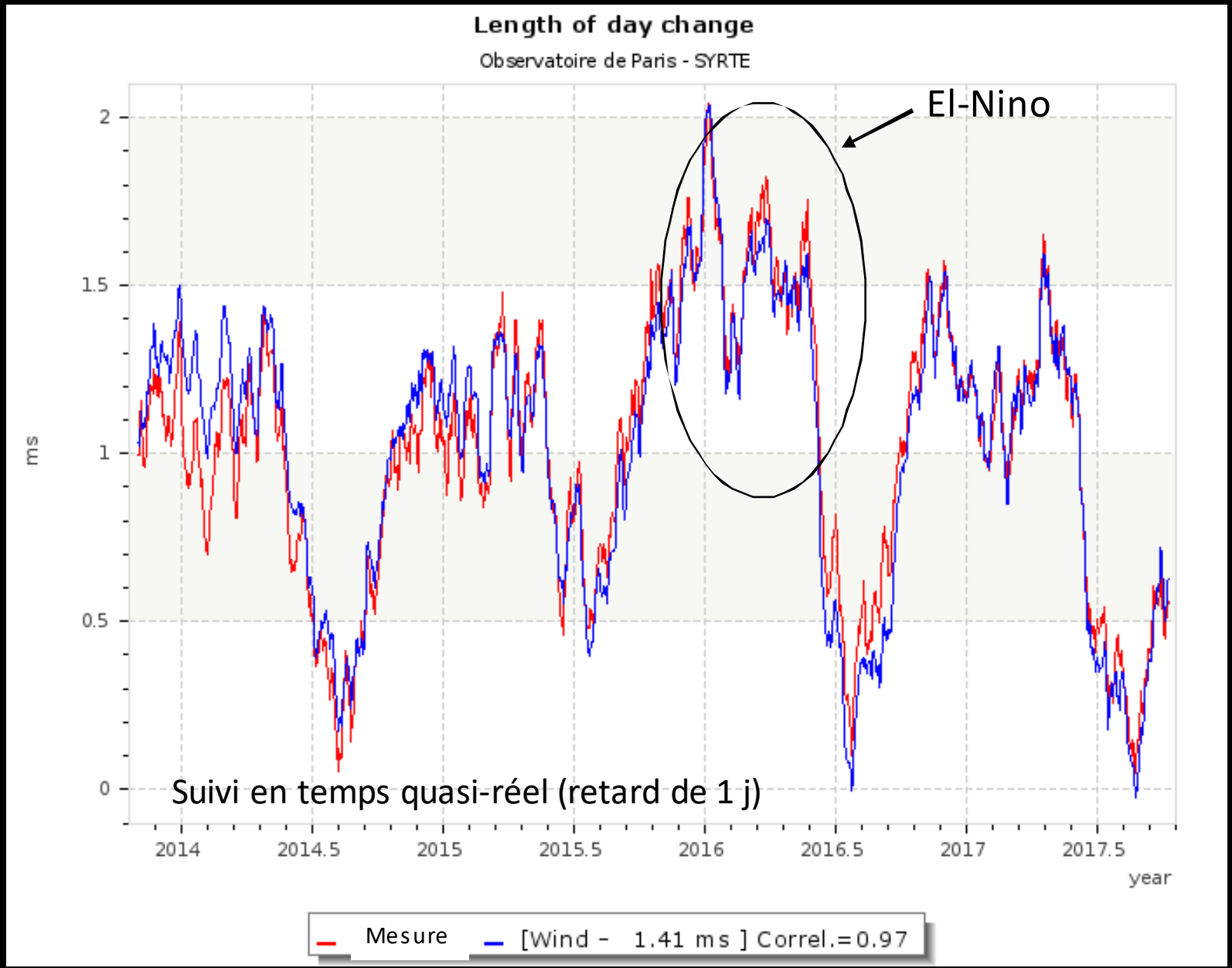


- Détermination partielle: redistributions internes non observables
- Multiplication des mesures (satellite)
- Capacité croissante du stockage
→ séries temporelles des moments cinétiques fluides de plus en plus précises

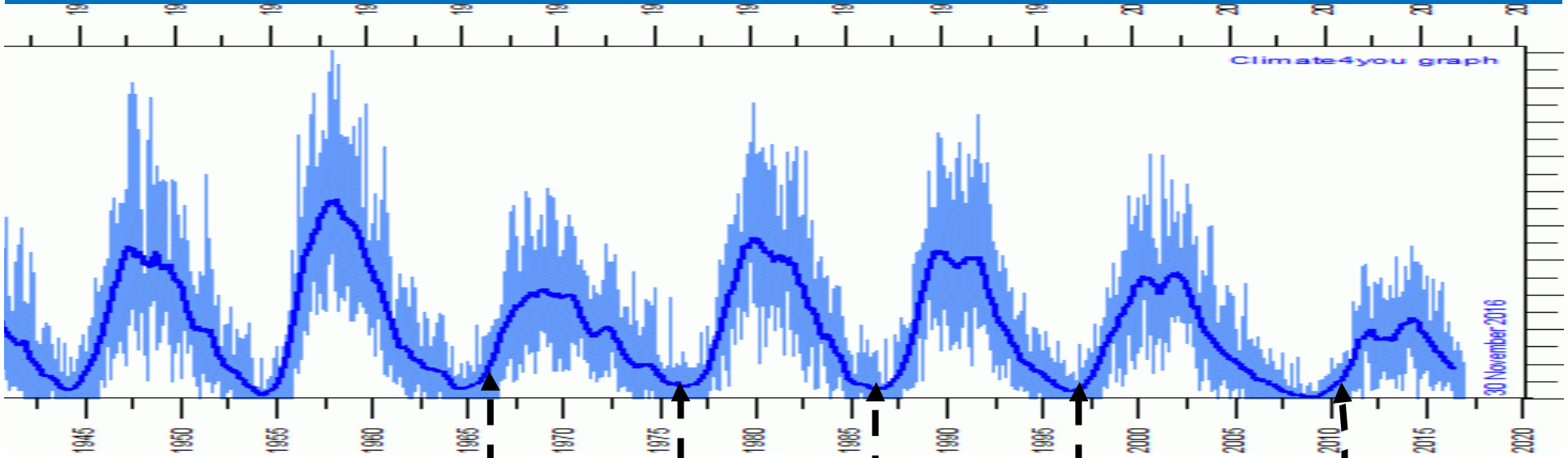


IV- Transports d’eau douce: le plus visible, mais le moins bien modélisé

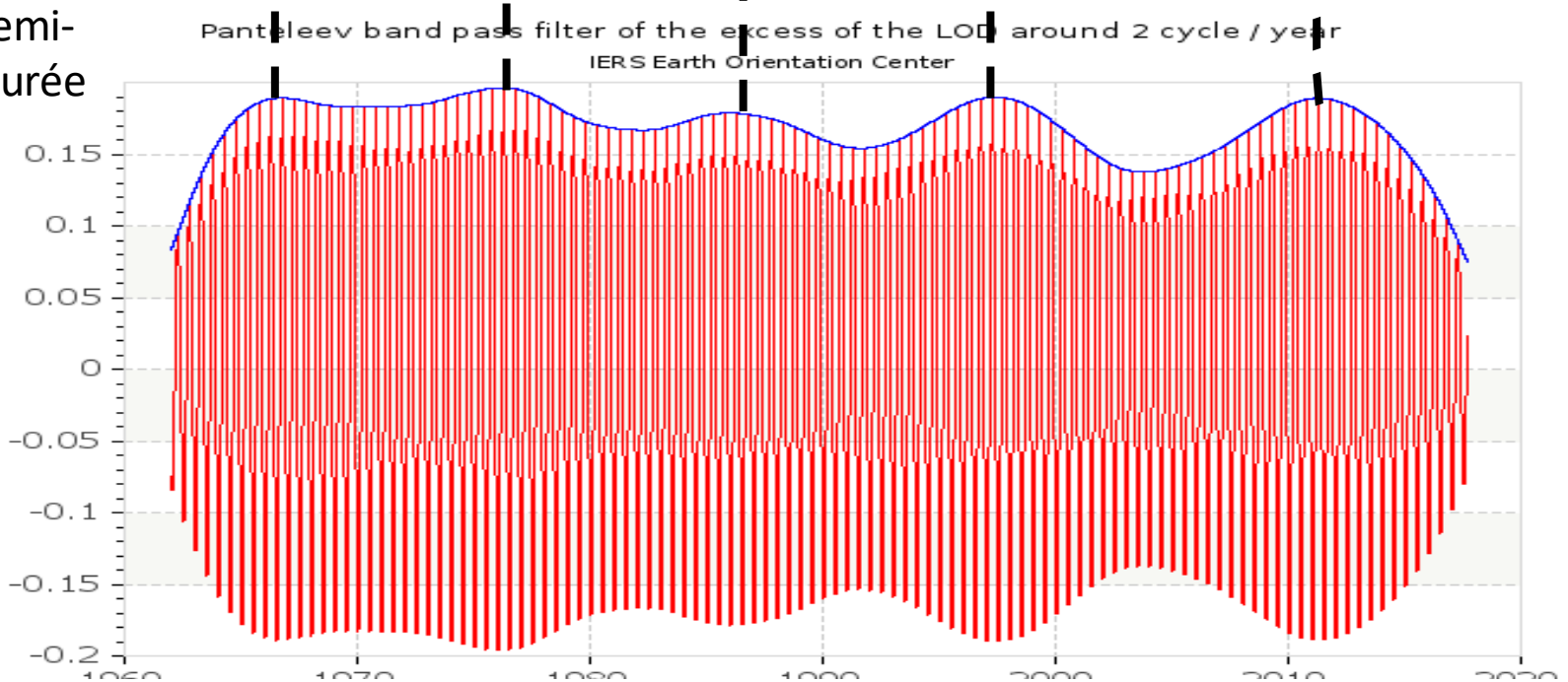
IV: Durée du jour: variation (sub)-saisonnière comme l'effet des vents



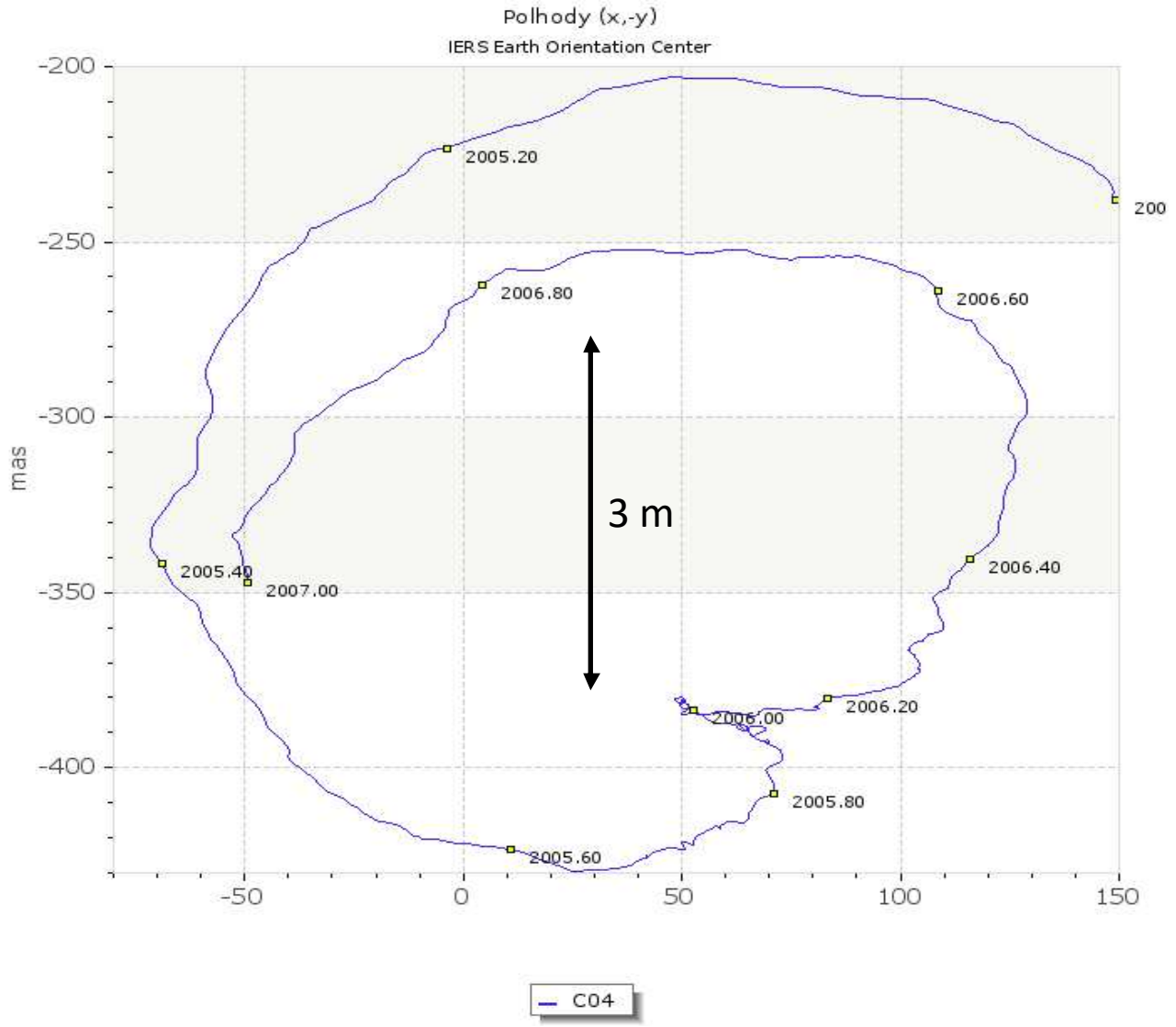
IV- Durée du jour: modulation en 11.8 ans de la composante semi-annuelle



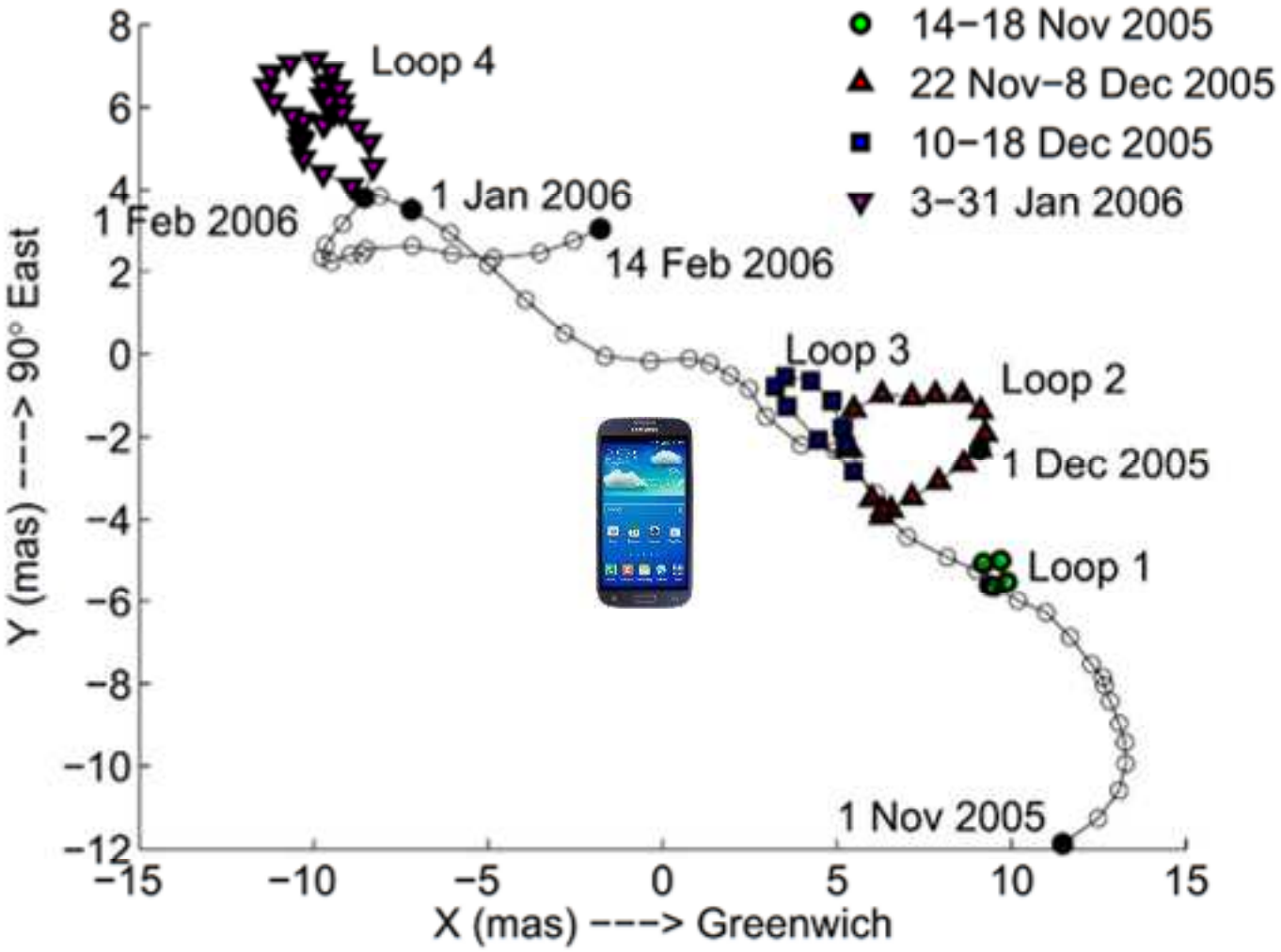
Composante semi-annuelle d la durée du jour (ms)



IV- Mouvement du pôle > 2 jours: effet combiné des océans et de l'atmosphère, et des eaux douces continentales

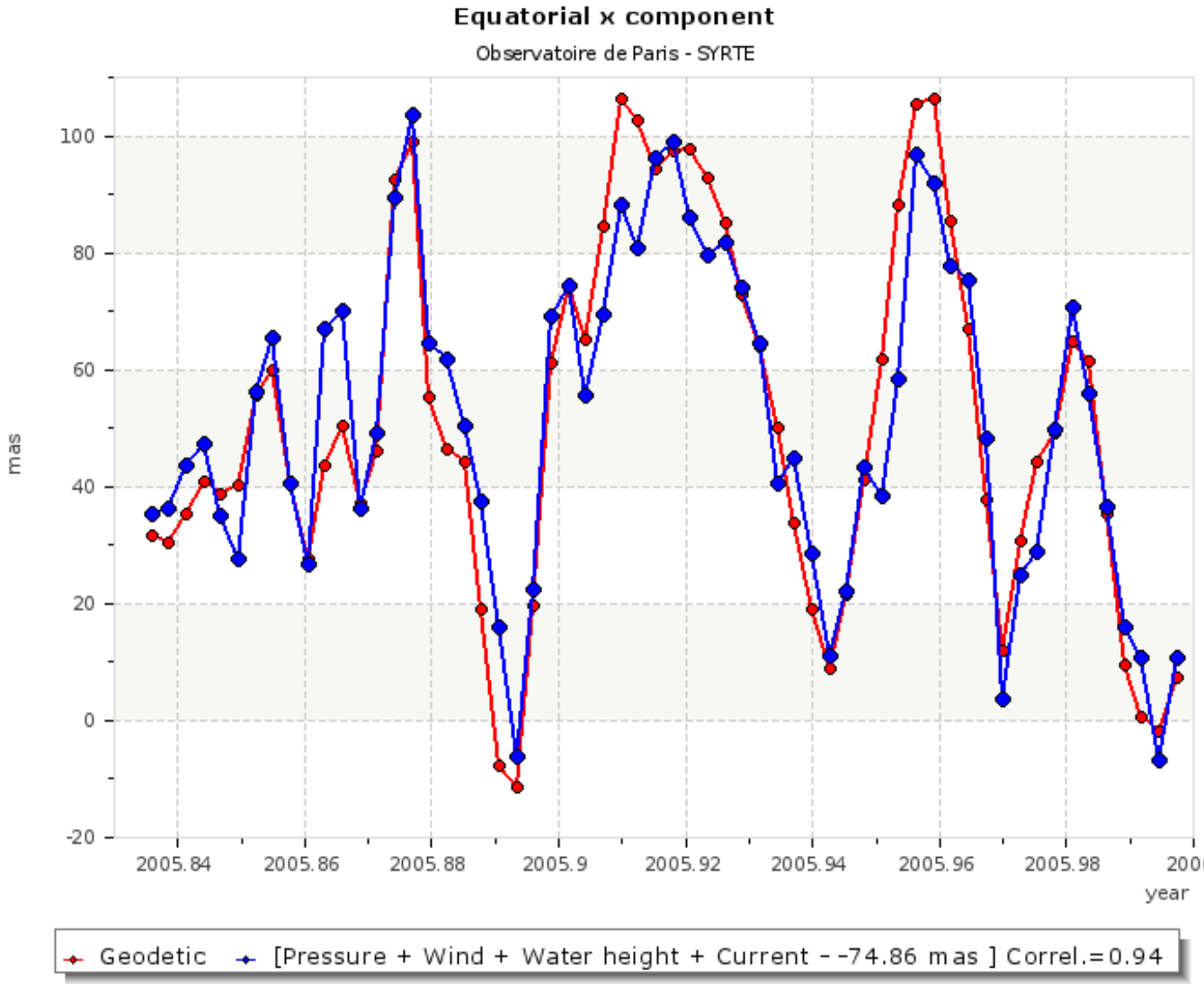


IV- Mouvement du pôle « rapide »



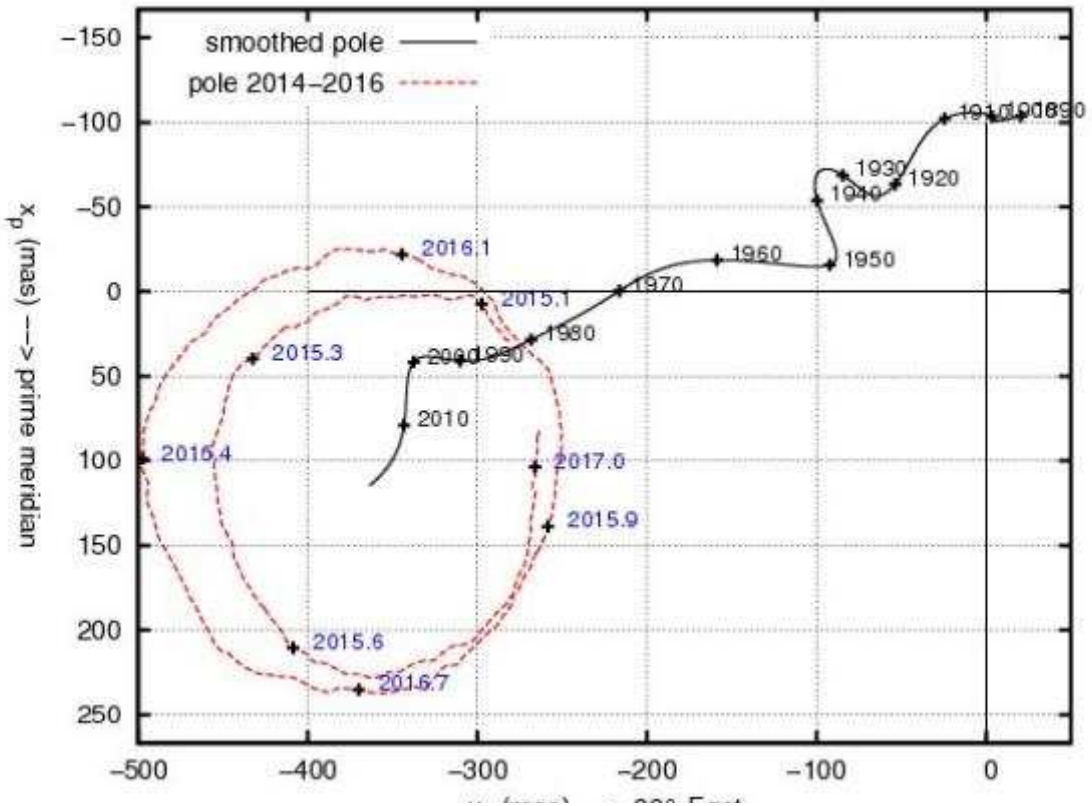
IV- Excitation rapide du mouvement du pôle

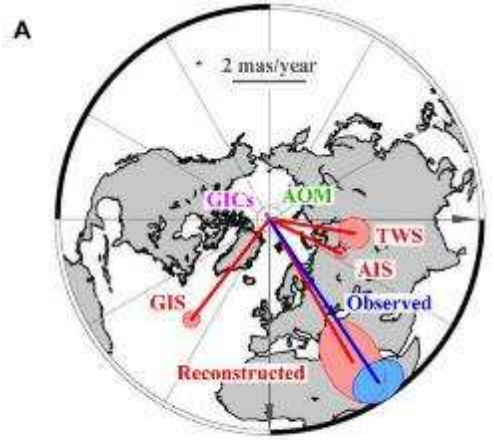
Composante x: Atmos + Océans

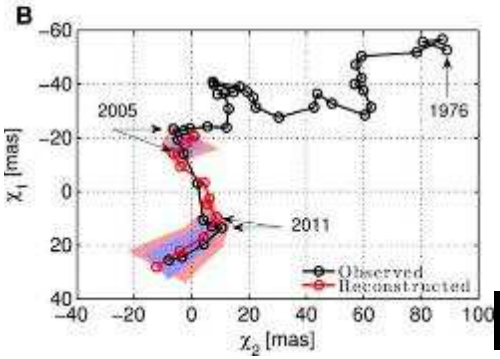


IV- La dérive du pôle: effet des calottes glaciaires et du noyau (?)

- Le pôle dérive en raison de la réaction visco-élastique de la Terre ayant suivi la dernière déglaciation
- Variation multi-décennales de Markowitz traduisant un couplage noyau-manteaux?
- Effet climatique associé à l'épaisseur des glaciers et des redistributions d'eau douce: l'inflexion observée de 2000 à 2010 a pour origine la redistribution d'eau douce. *Adhikari S. and Ivins E. R. (2016)*

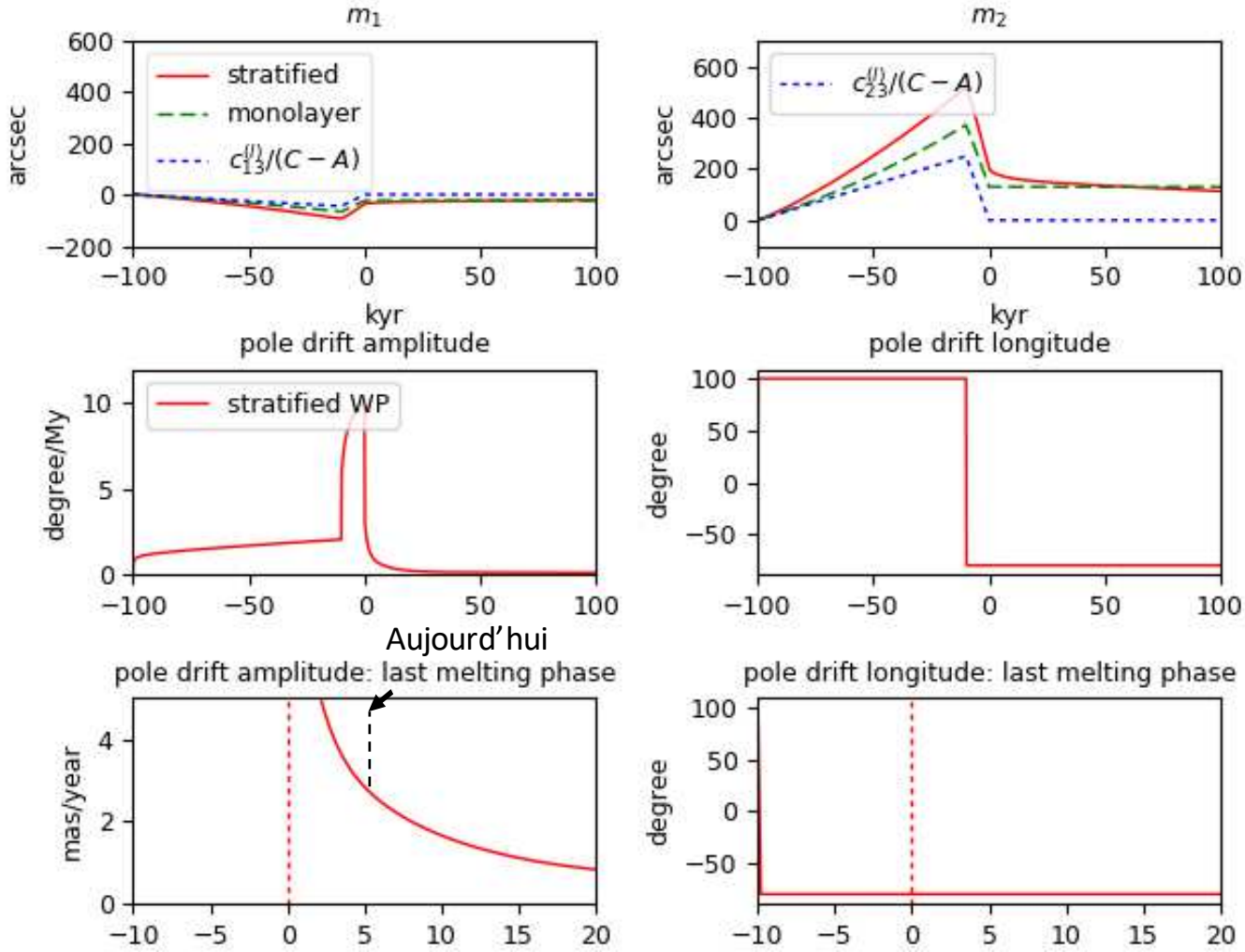




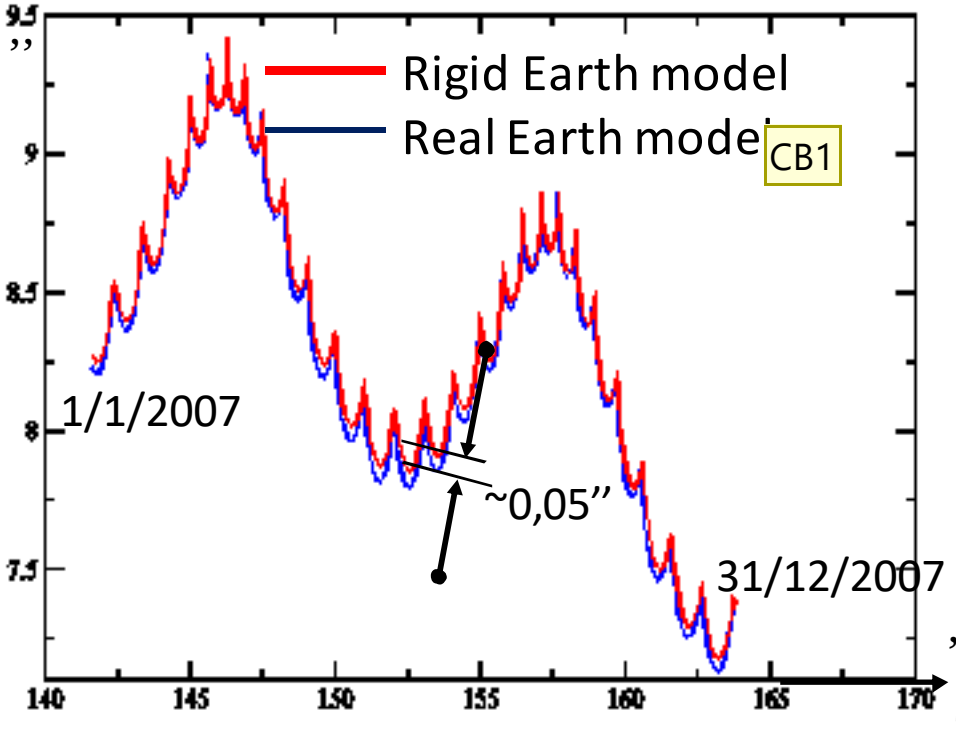


IV. Dérive linéaire du pôle: rebond visco-élastique post-glaciaire

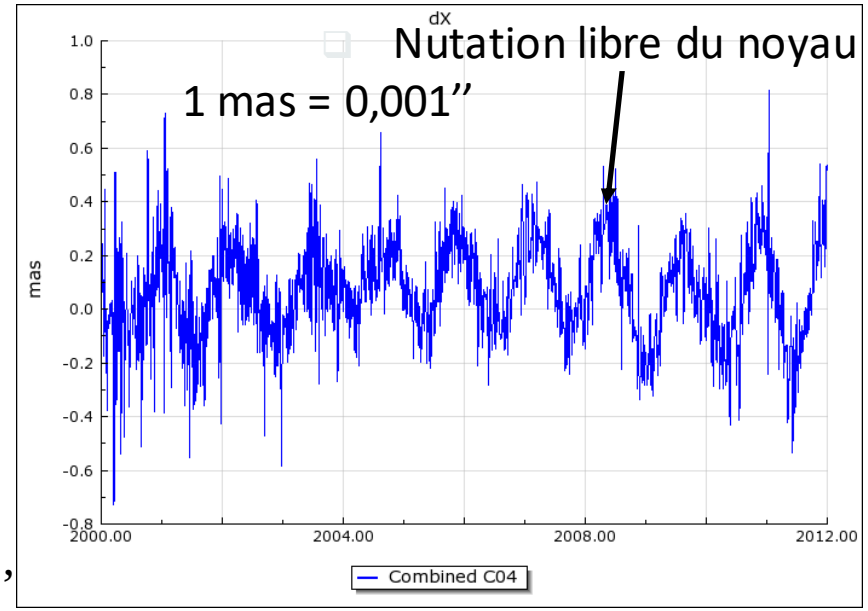
Modélisation de la dérive linéaire comme un effet visco-élastique post-glaciaire



IV. Correction de nutation (VLBI): le noyau fluide « révélé »



Mouvement de l'axe d'inertie projeté sur le plan équatorial de l'époque 2000



Correction de nutation dX, dY

Effets de non-rigidité dans les termes luni-solaires dépendant des paramètres internes

→ Moyen de préciser l'ellipticité du noyau fluide (1986), l'élasticité du manteau, le couplage noyau-manteau

→ Effet de la graine solide?

Diapositive 34

CB1 Christian Bizouard; 04/12/2014

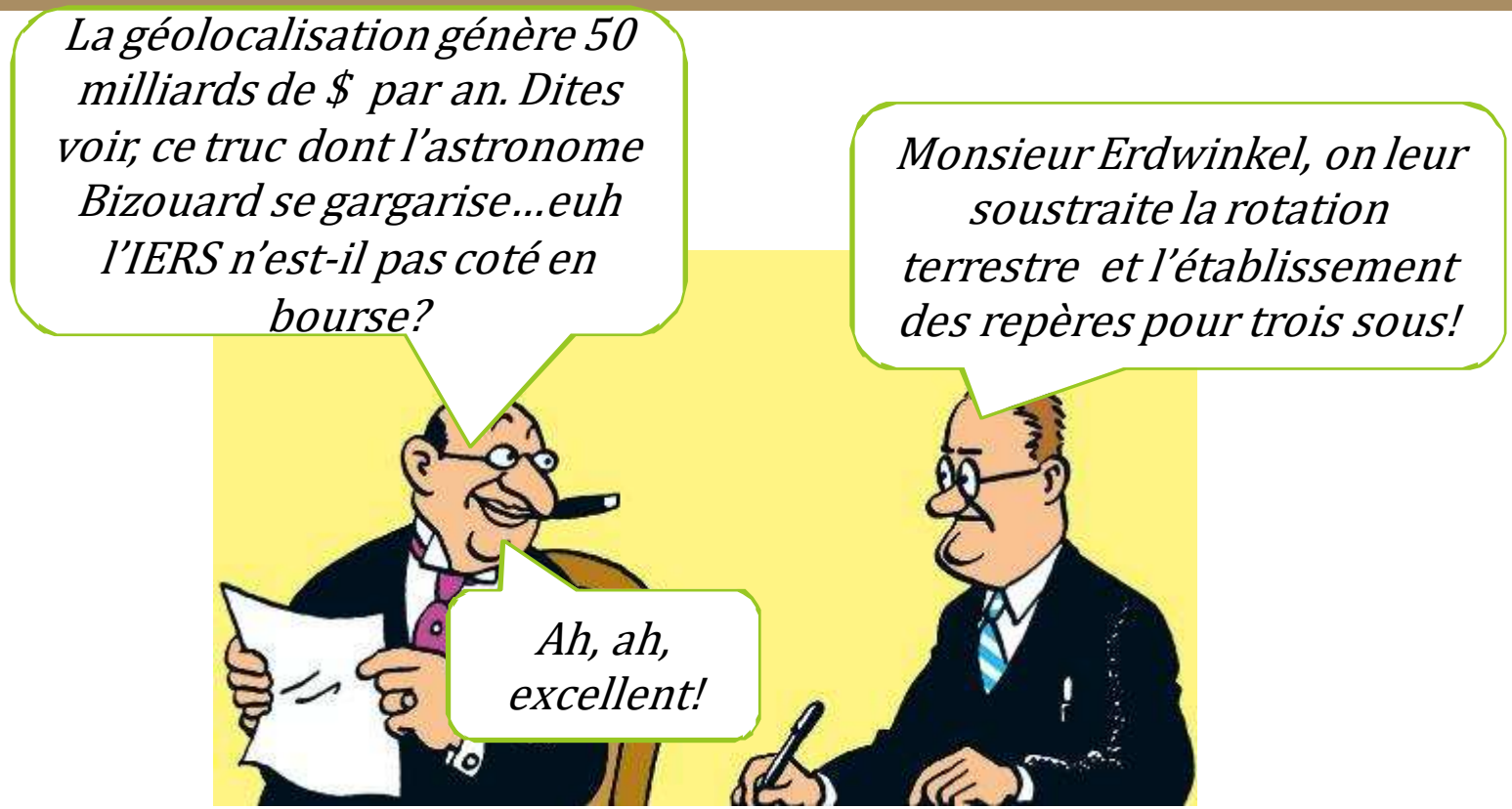
Conclusion

Irrégularités de la rotation de la Terre:

- Révolution des techniques de géodésie spatiale (incertitude divisée par un facteur 100) nécessitant des réseaux internationaux d'observation pilotés par l'IERS et les services par technique

- Une sonde géophysique
  - ✓ Précisant le couplage hydro-atmosphère – Terre Solide
  - ✓ Déterminant la rhéologie et la structure interne de la Terre

Conclusion



Nombreuses applications :

- ✓ Géolocalisation à qq mm près, navigation temps réel au m près (erreur de qq m au bout d'un an si les irrégularités sont négligés)
- ✓ réalisation du temps légal