

La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace

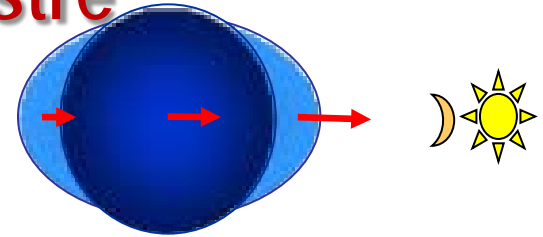
*Les déformations
de la Terre*

Leçon n° 2

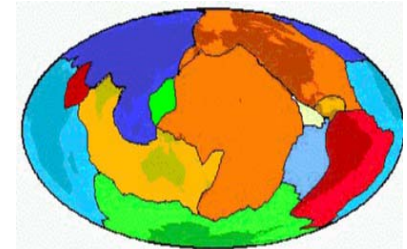
Anny Cazenave



Les déformations du globe terrestre



- Marées terrestres (périodiques, 30 cm)
- Variations de l'aplatissement de la Terre (séculaire, saisonnier, interannuel)
- Mouvements horizontaux → (*Tectonique des plaques*: séculaire, mm/an → cm/an; *déformations zones sismiques actives*: mm/an)
- Mouvements verticaux



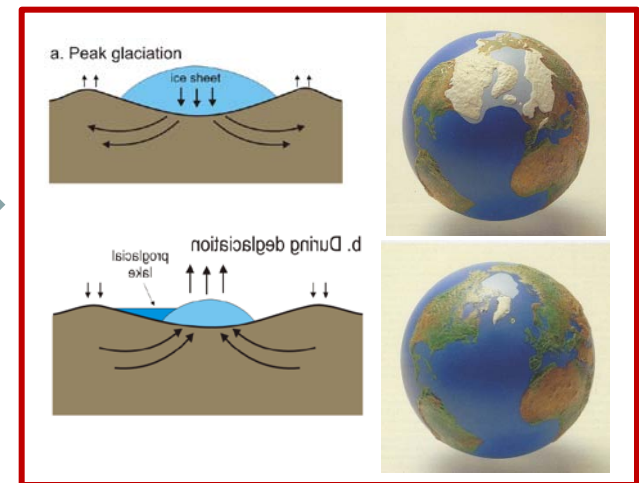
• **Effets de charge** (atmosphère, hydrologie, etc.) (saisonniers; interannuels → cm)

• Séismes, volcanisme, ... (mm à m)

• **Rebond post glaciaire** (mm/an)



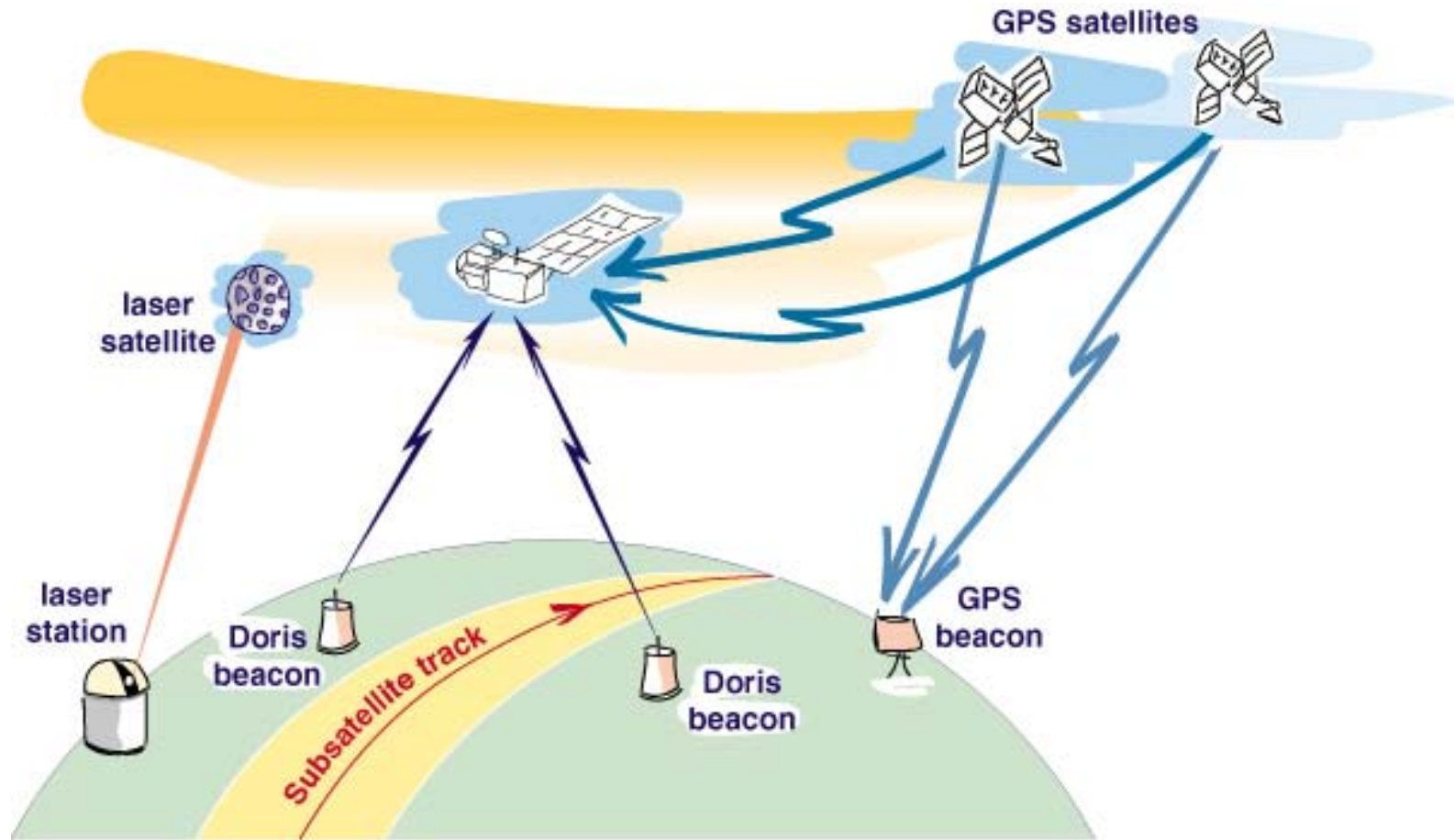
• Subsidences dues au pompage eau, pétrole



Quelques ordres de grandeur des déformations

	vertical	horizontal
Marée terrestre	30 cm	10 cm
Charge de marée océanique	10 cm	2 cm
Charge pression atmosphérique	1 cm	2 mm
Charge hydrologique	5 cm	1 cm
Rebond post-glaciaire	1 cm/an	2 mm/an
Tectonique	1 cm/an	1-10 cm/an
Mouvements du géocentre	4 mm	2 mm

Les techniques de poursuite des satellites artificiels permettent de mesurer les déformations de la Terre

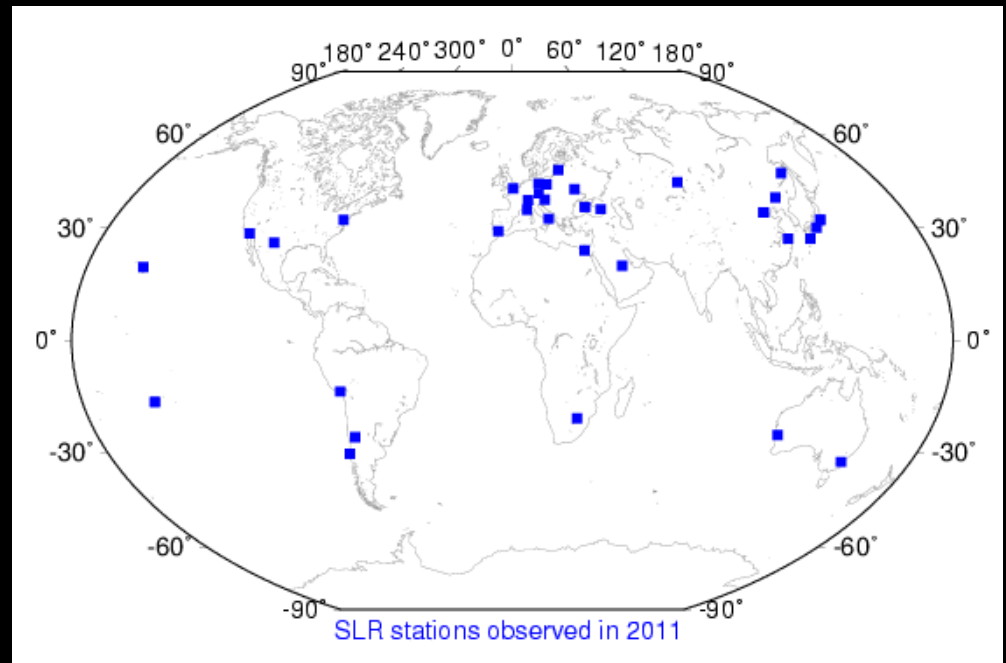


Télémétrie Laser sur satellite

Lageos (USA)



Starlette, Stella
(France)

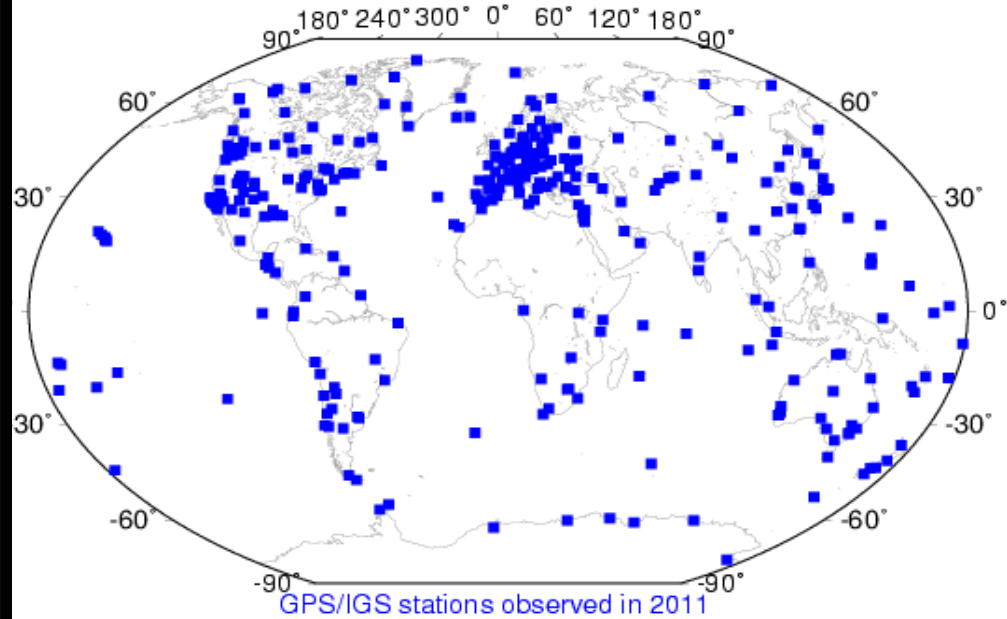
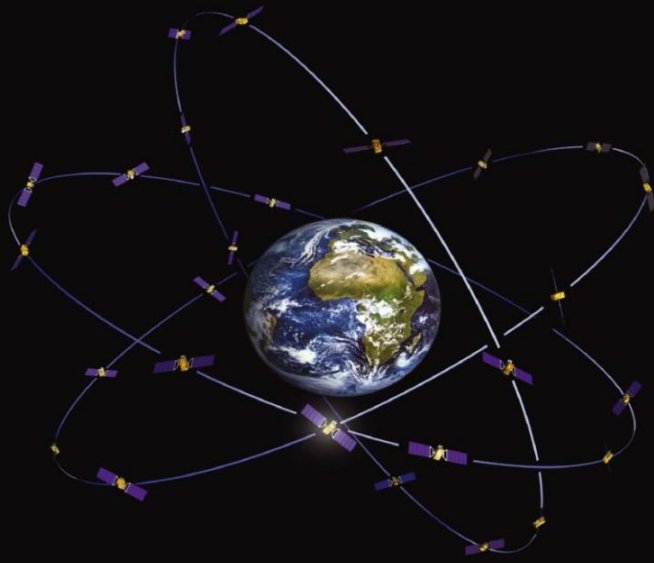


Réseau mondial de stations laser en 2011

Système de positionnement GPS (GNSS)

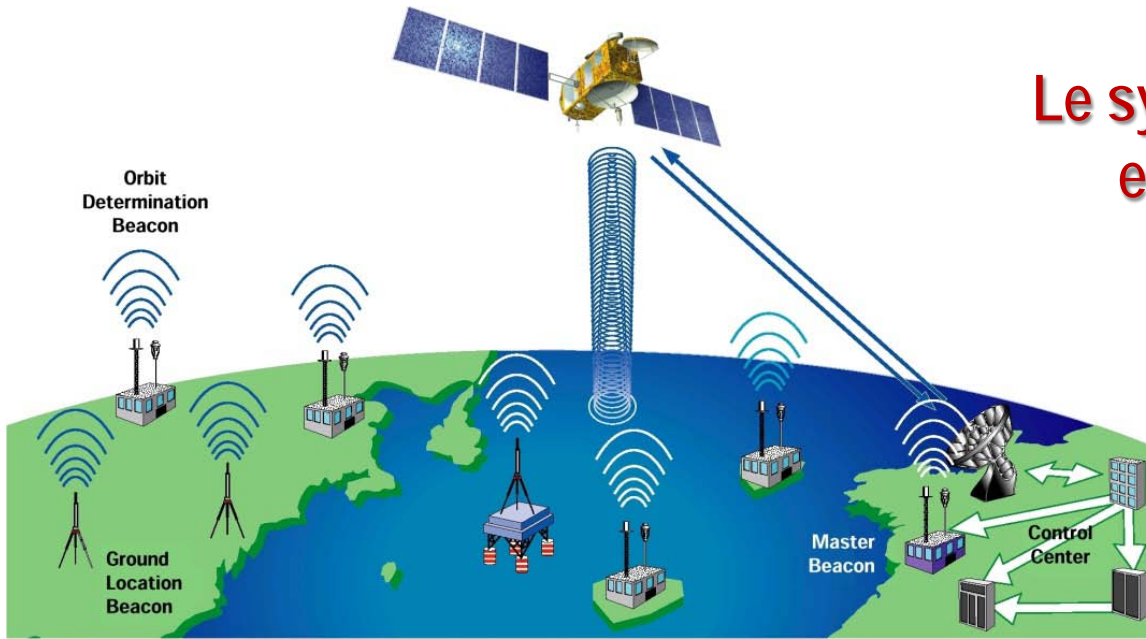


GALILEO

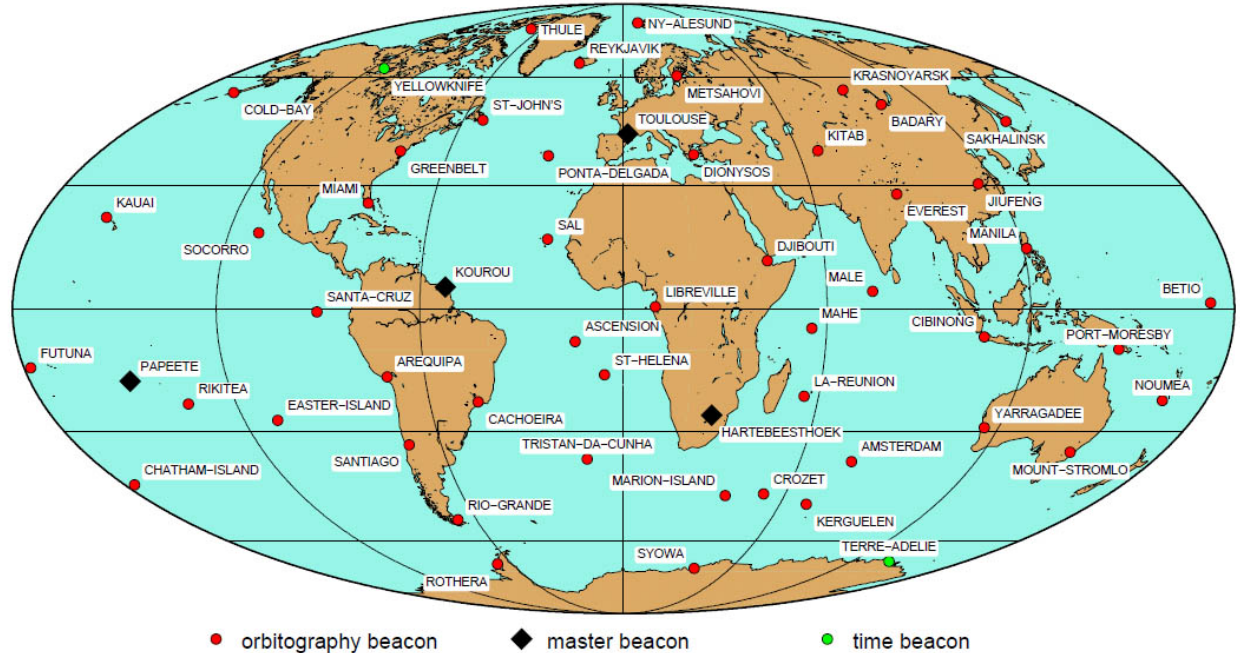


Réseau de stations permanentes
GPS en 2011

Le système d'orbitographie et de positionnement DORIS



56 stations
permanentes

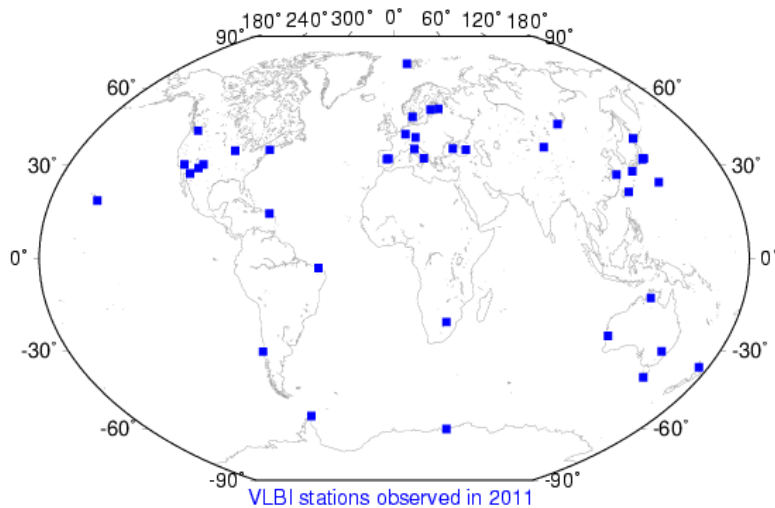
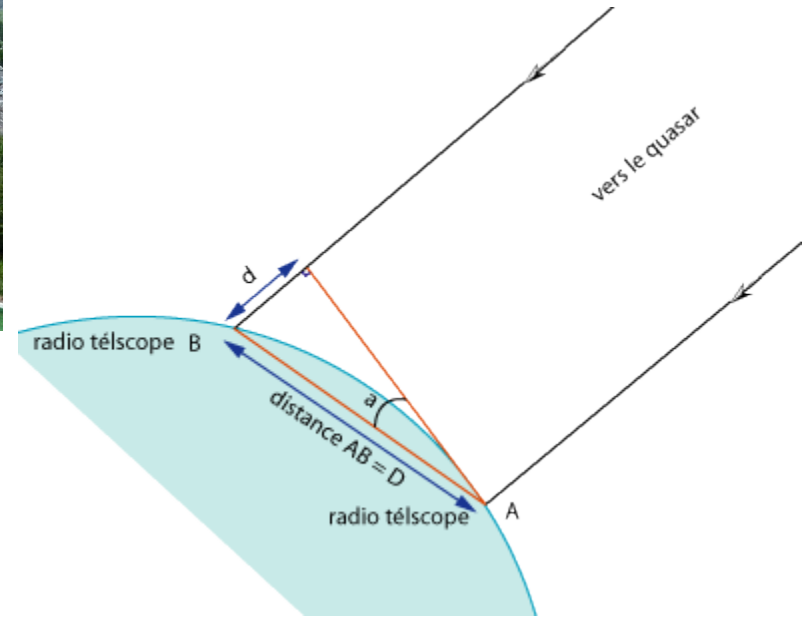




Le système DORIS installé à bord d'une dizaine de satellites depuis le début des années 1990

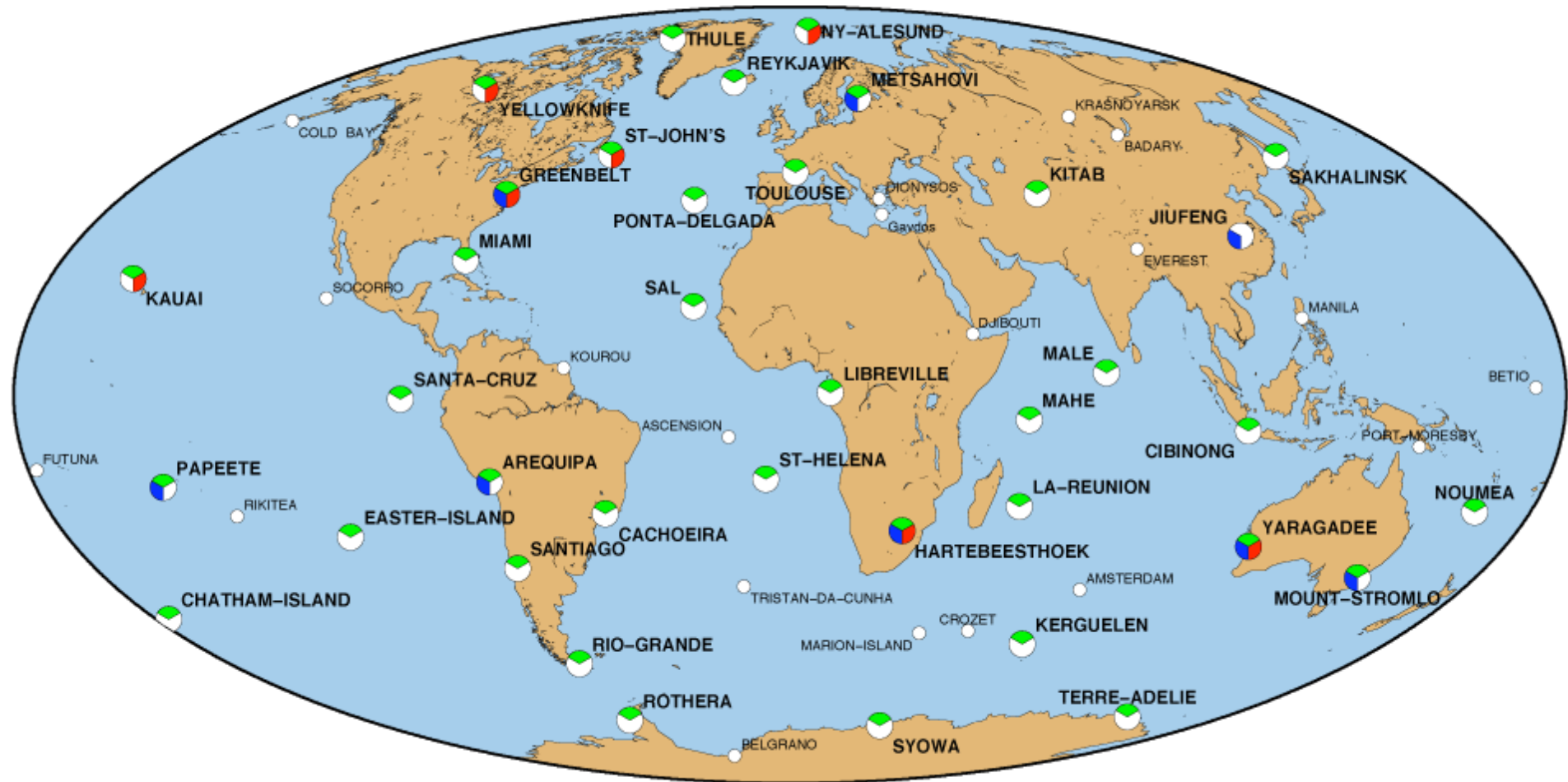


Interférométrie à très longue base (Very Long Baseline Interferometry-VLBI-)



Réseau de stations
VLBI en 2011

Stations DORIS co-localisées avec d'autres stations géodésiques



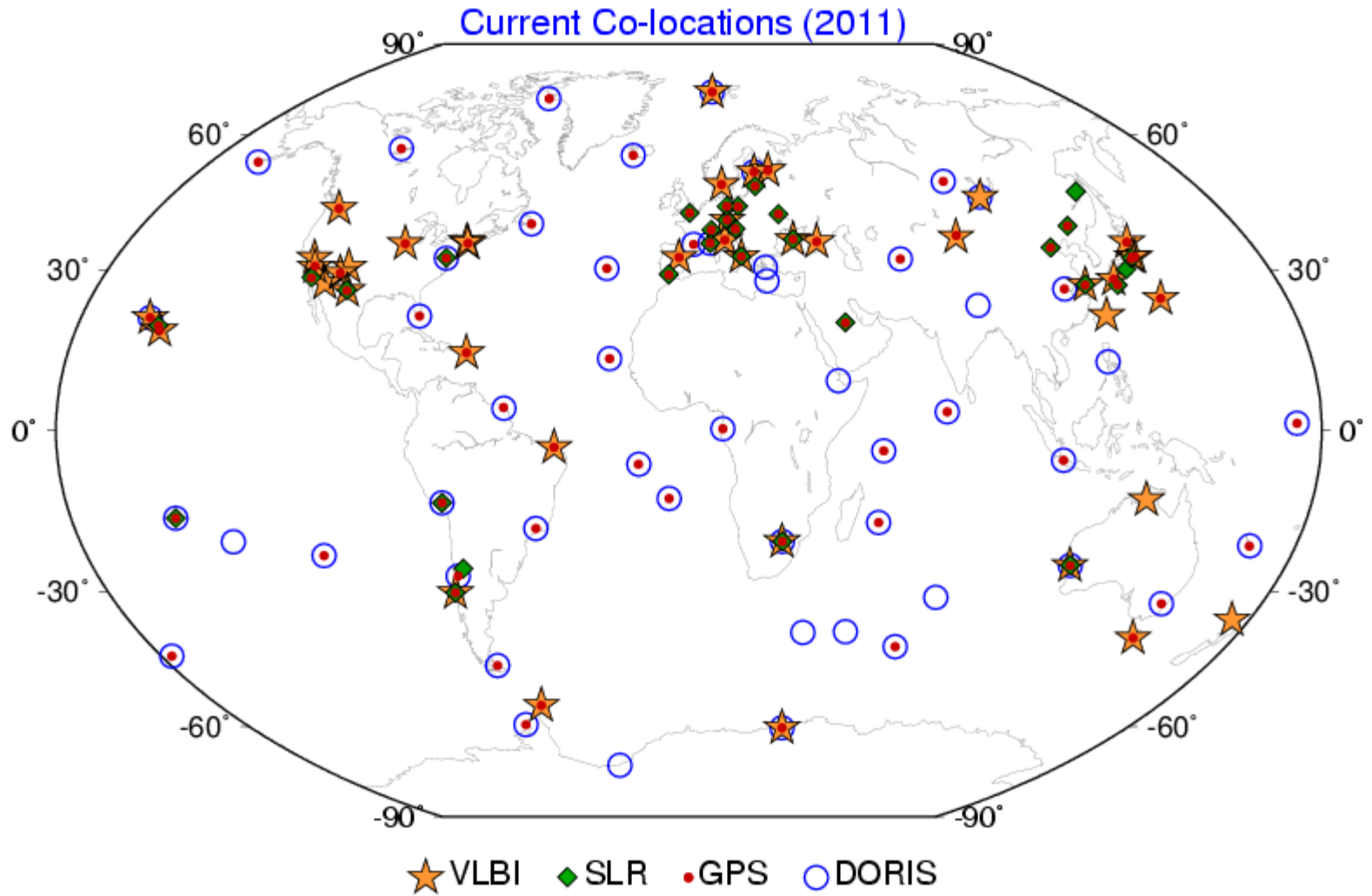
GNSS (IGS)

SLR

VLBI

No active co-location < 10 km

Stations co-localisées (2011)



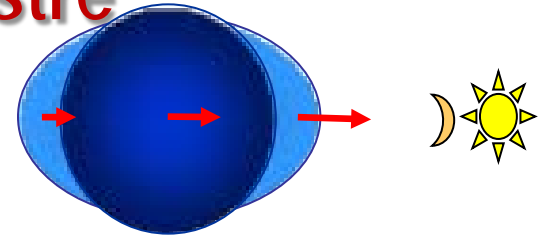
Précision du positionnement géodésique

Aujourd'hui:

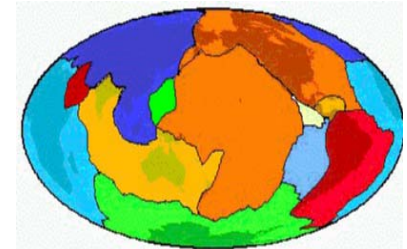
- Positions : quelques mm
- Vitesses : <1 mm/an

Il y a 40 ans \rightarrow 30 m.....

Les déformations du globe terrestre



- Marées terrestres (périodiques, 30 cm)
- Variations de l'aplatissement de la Terre (séculaire, saisonnier, interannuel)
- Mouvements horizontaux → (*Tectonique des plaques*: séculaire, mm/an → cm/an; *déformations zones sismiques actives*: mm/an)
- Mouvements verticaux



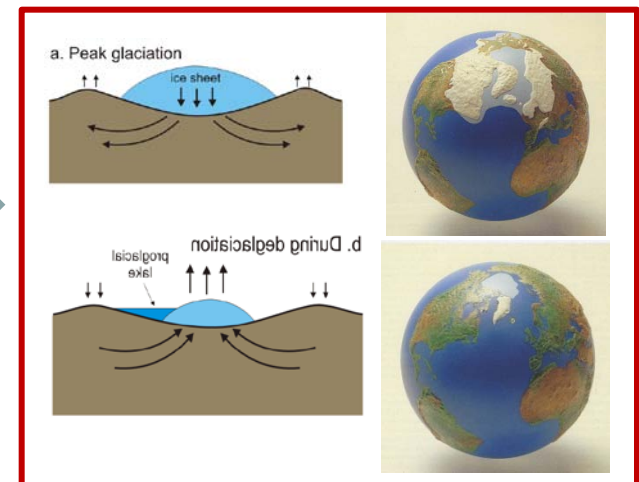
• **Effets de charge** (atmosphère, hydrologie, etc.) (saisonniers; interannuels → cm)

• Séismes, volcanisme, ... (mm à m)

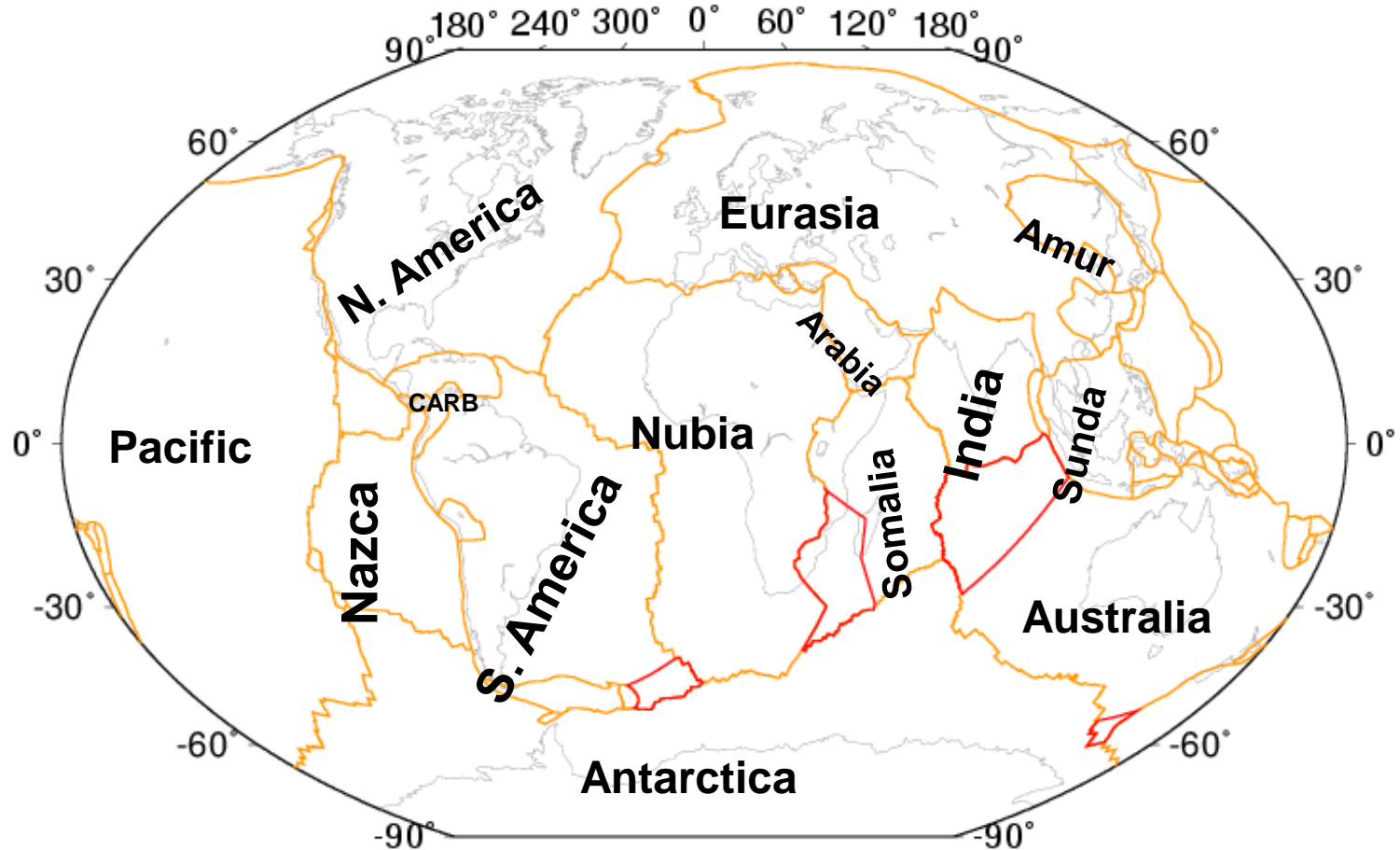
• **Rebond post glaciaire** (mm/an)



• Subsidences dues au pompage eau, pétrole



Les principales plaques tectoniques

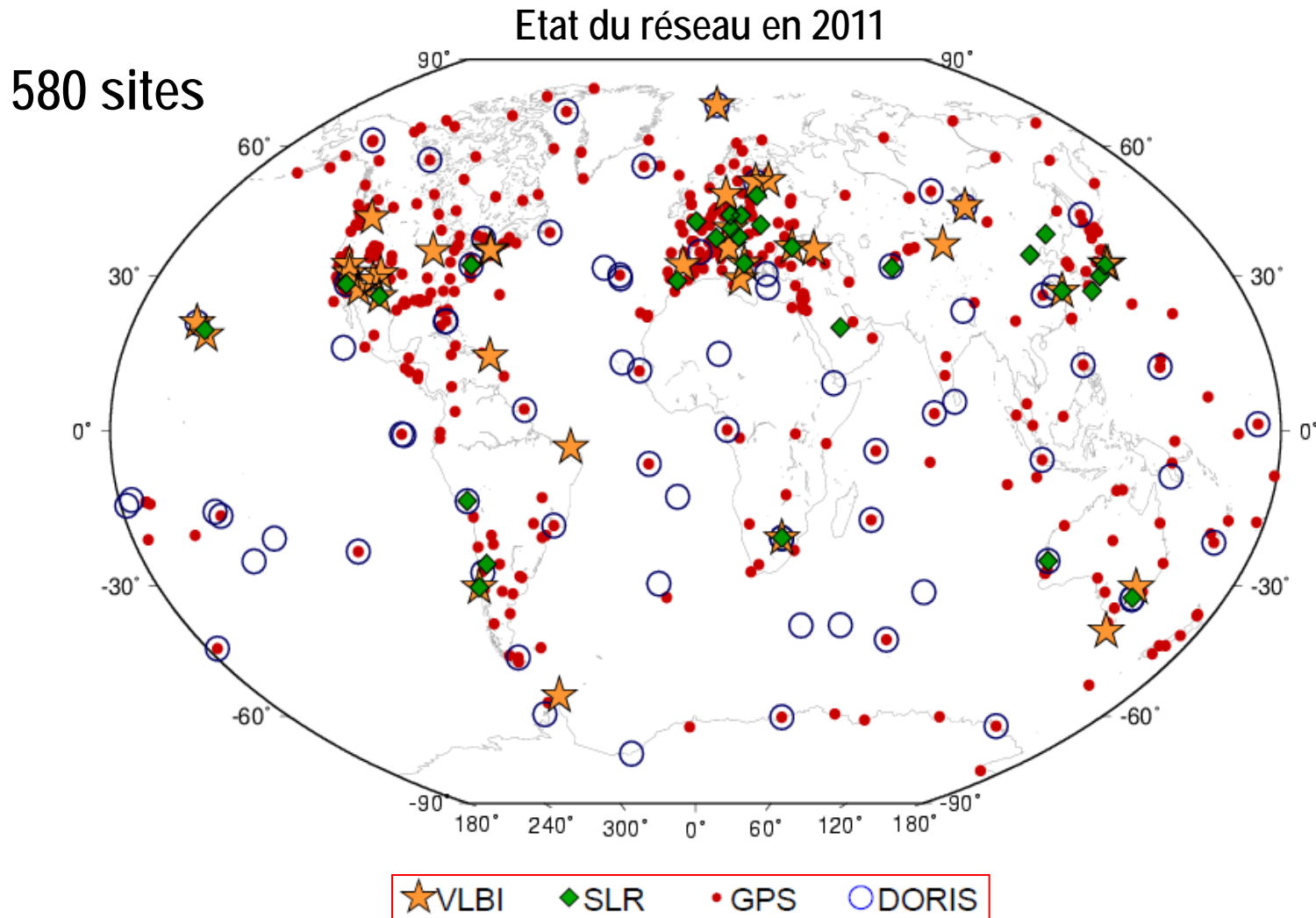


Modèles géologiques → mouvements moyens des plaques des 2-3 derniers millions d'années

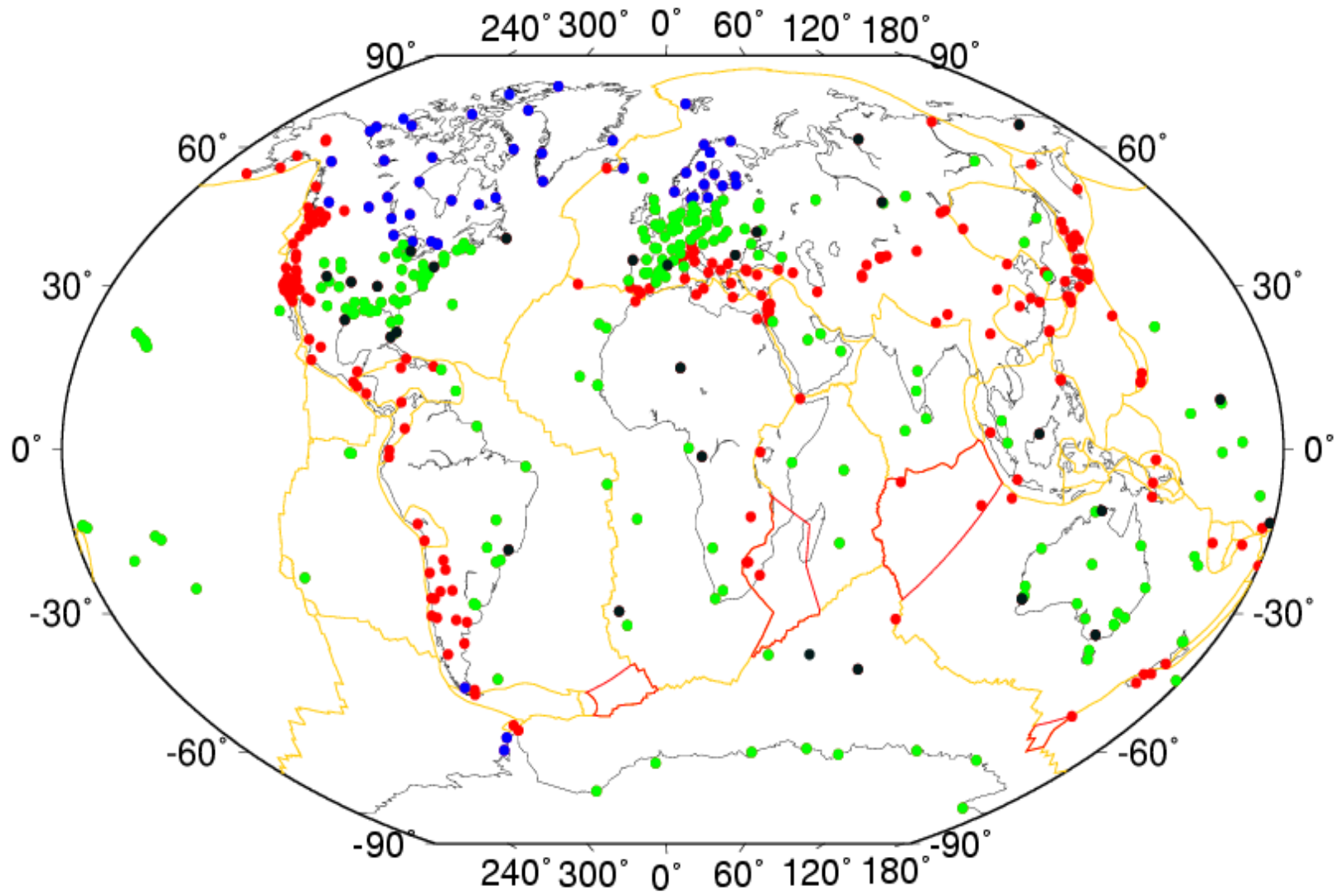
« NUVEL-1 » (De Mets et al., 1990; Argus & Gordon, 1991)

« MORVEL » (De Mets et al., 2010)

Réseau des stations géodésiques (*Laser, DORIS, GPS, VLBI*) → permet de mesurer le mouvement ACTUEL des plaques

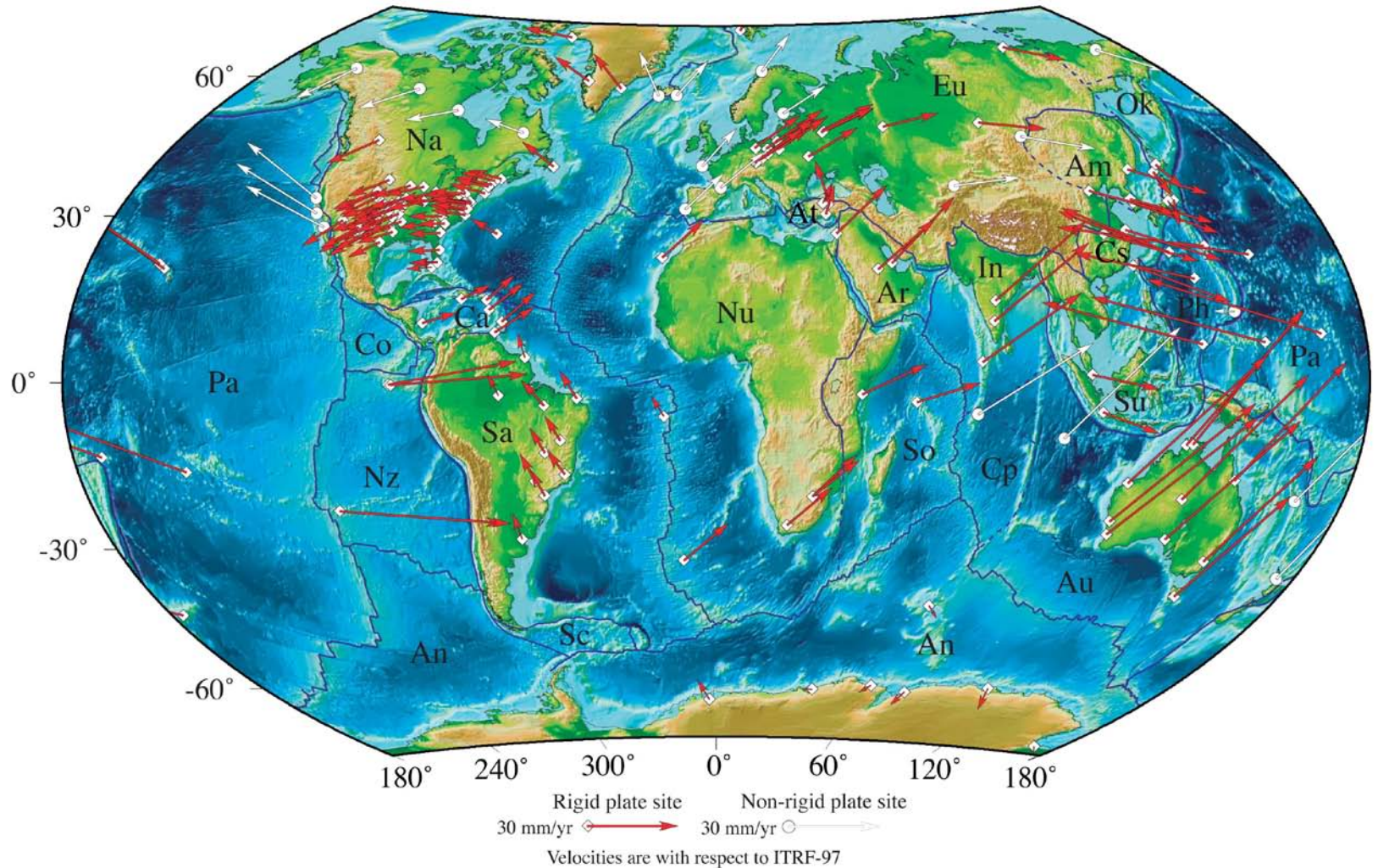


Réseau des stations géodésiques (en vert : stations situées à l'intérieur des plaques)

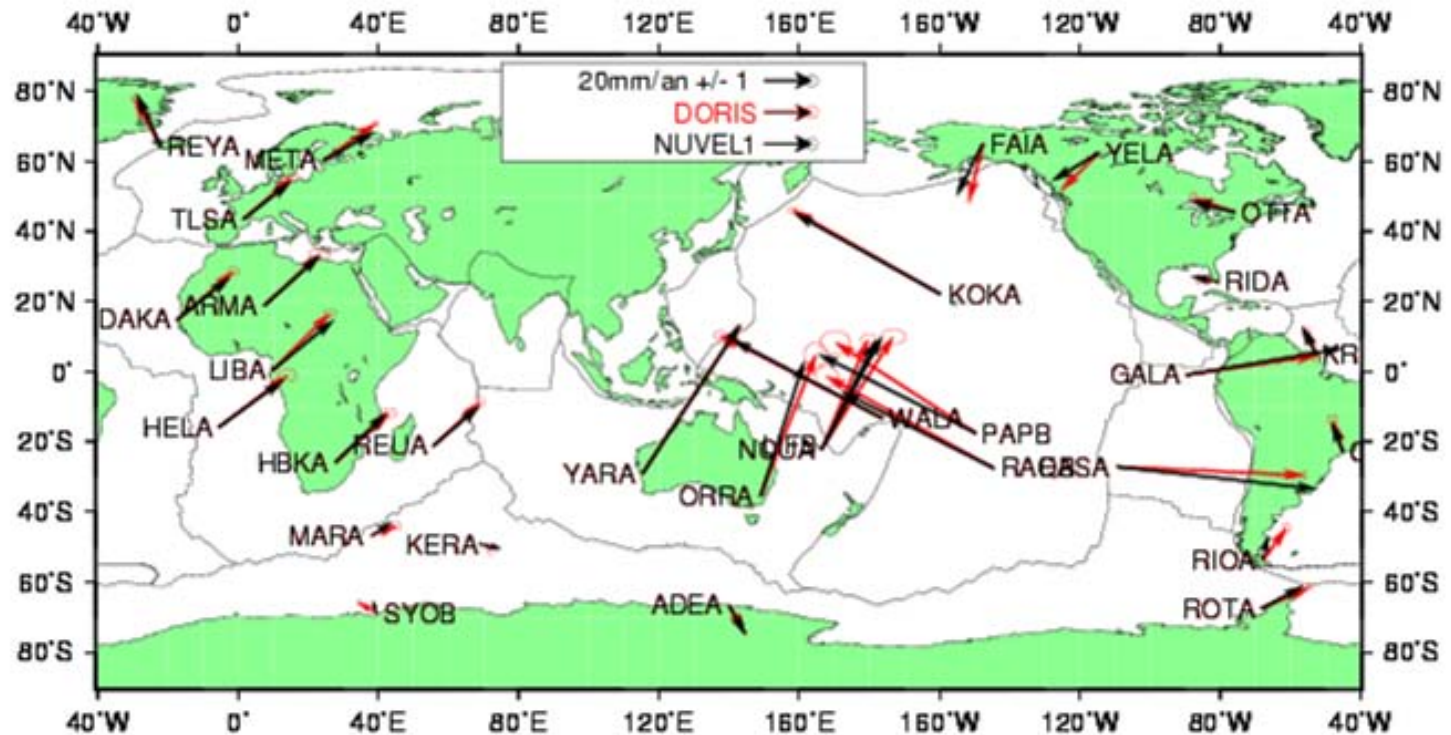


Plusieurs générations de modèles de vitesses ACTUELLES des plaques élaborés depuis 15 ans à partir des mesures de 'géodésie spatiale'.....

REVEL-2000



Une des toutes premières estimations du mouvement actuel des plaques avec le système DORIS



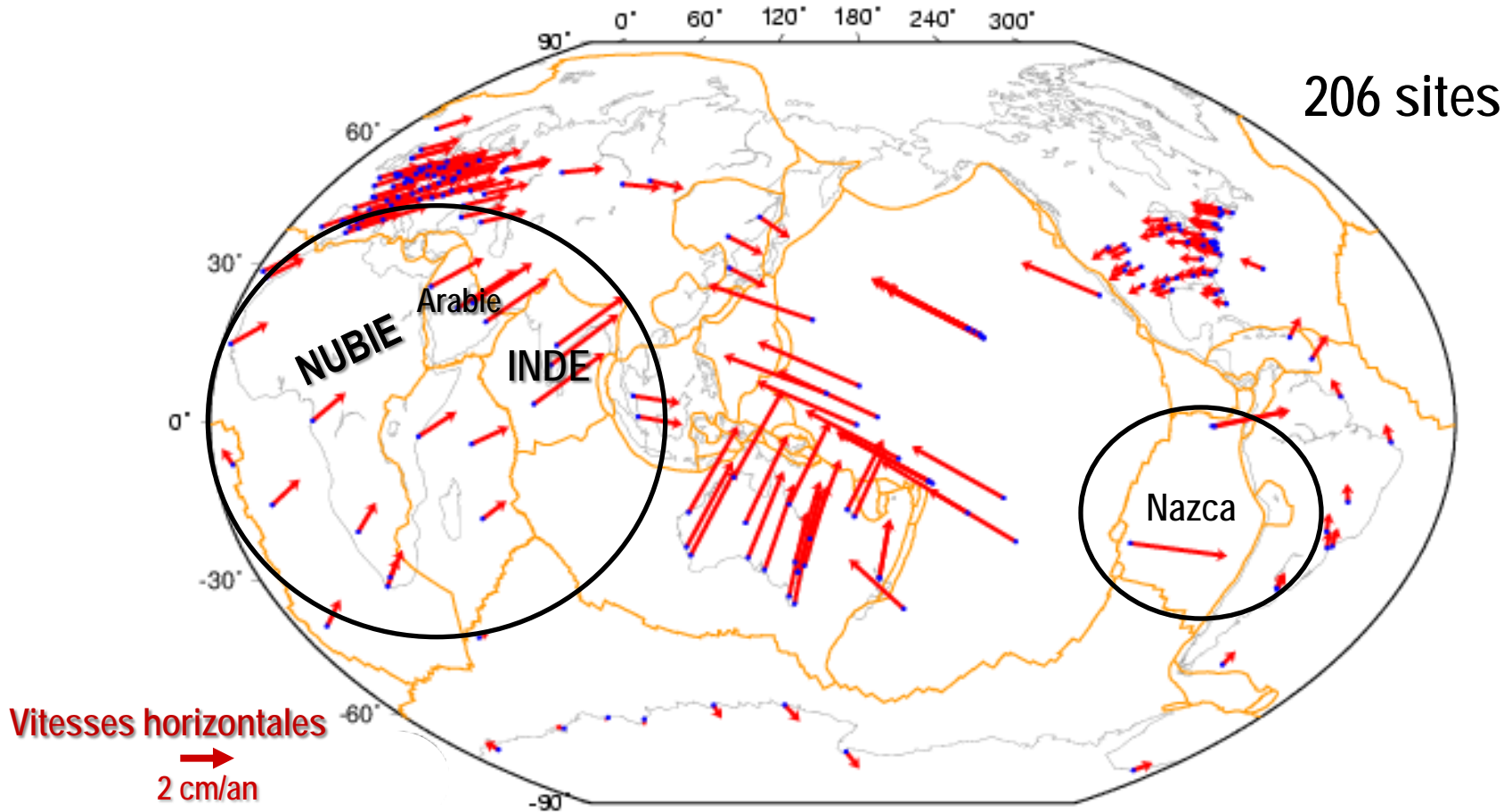
Vitesses horizontales mesurées par **DORIS** et estimées par le modèle géologique NUVEL-1

Les premières conclusions....

- Le mouvement actuel des plaques est **identique** à celui des 3 derniers millions d'années
- Confirmation des hypothèses de la théorie de la tectonique des plaques → les plaques sont **rigides** et se déplacent à **vitesse constante**
- On peut utiliser le modèle de vitesses interplaques comme référence pour étudier les **déformations aux frontières des plaques**
-

Mouvements actuels des plaques par mesure des vitesses horizontales des stations géodésiques

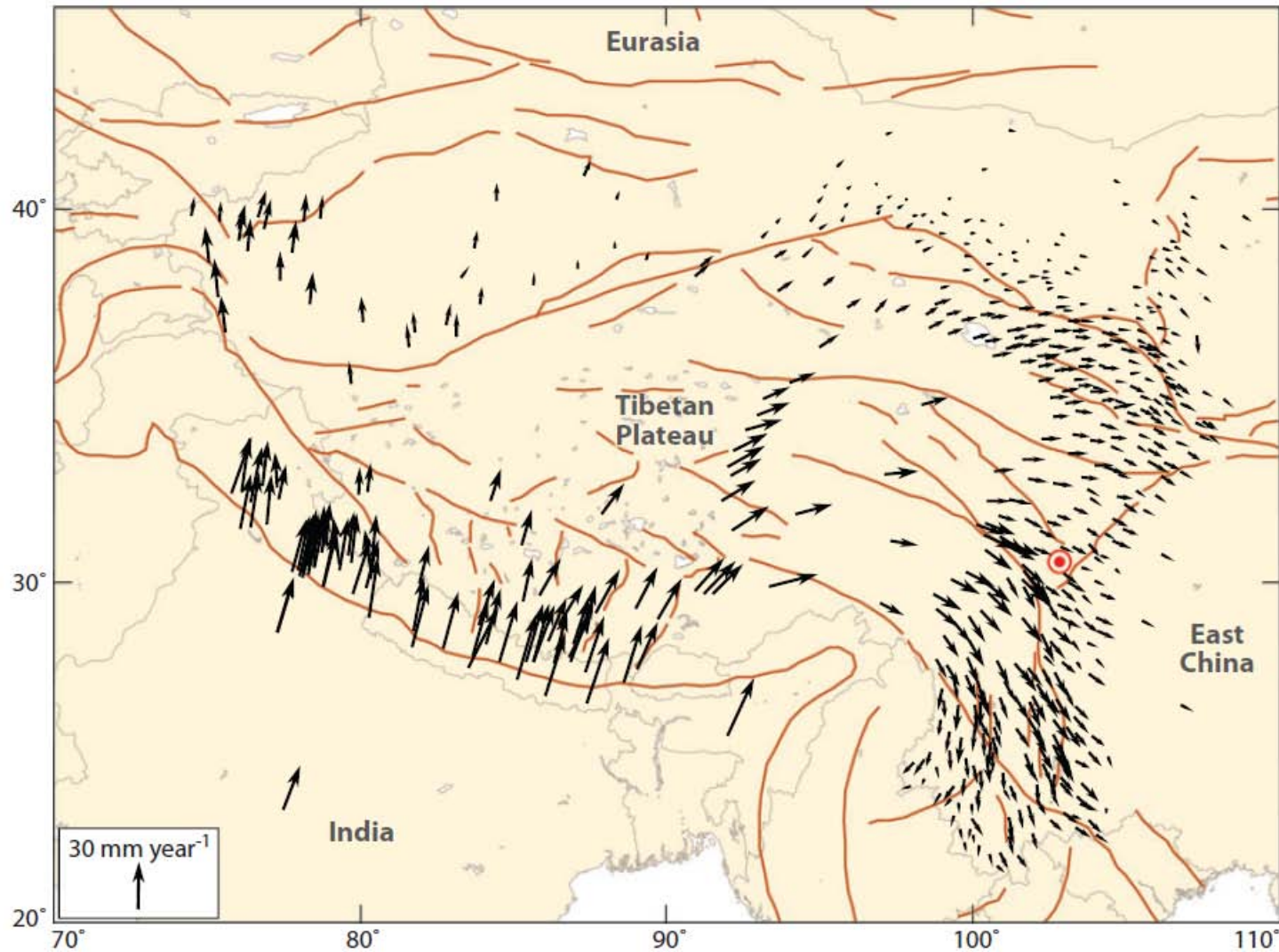
Stations situées à l'intérieur des plaques



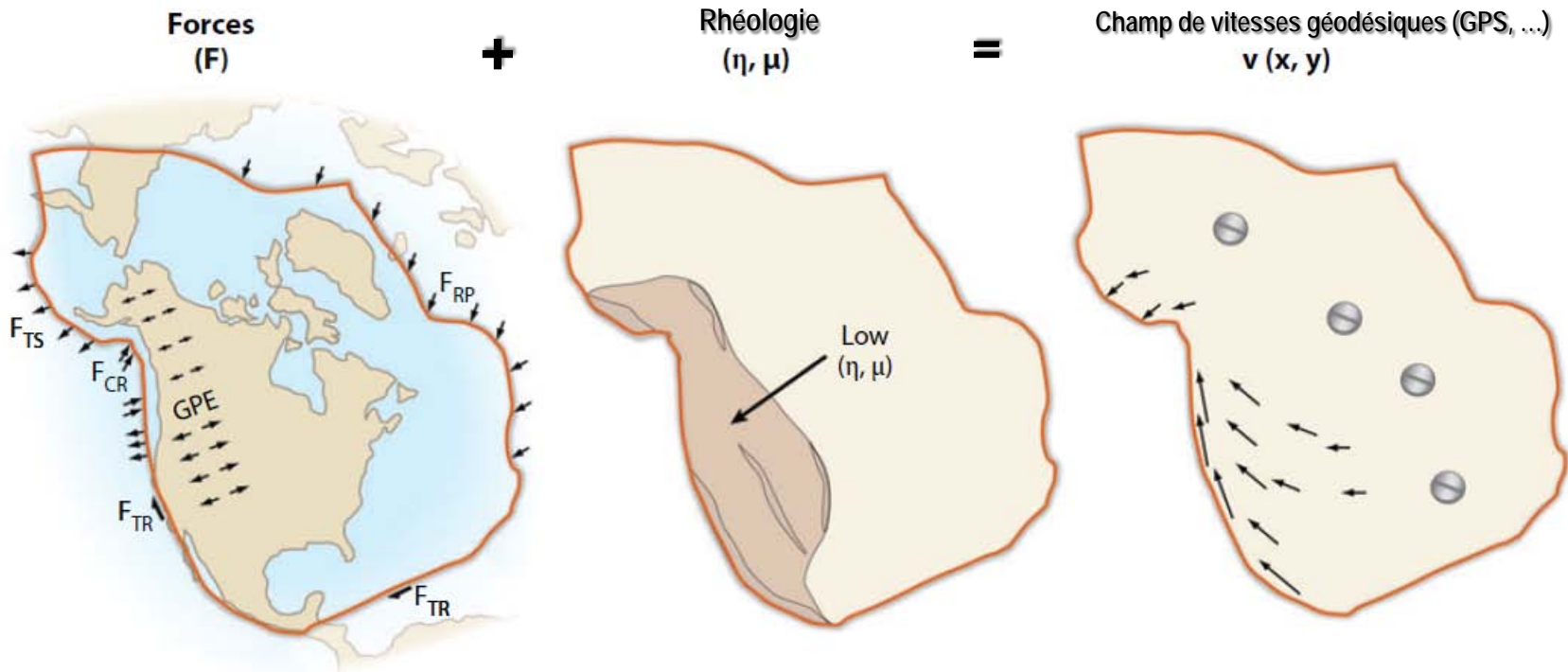
Les plaques 'Nubie', 'Arabe', indienne et 'Nazca' ralentissent...
??????????????

Argus et al., 2011
Altamimi et al., 2012

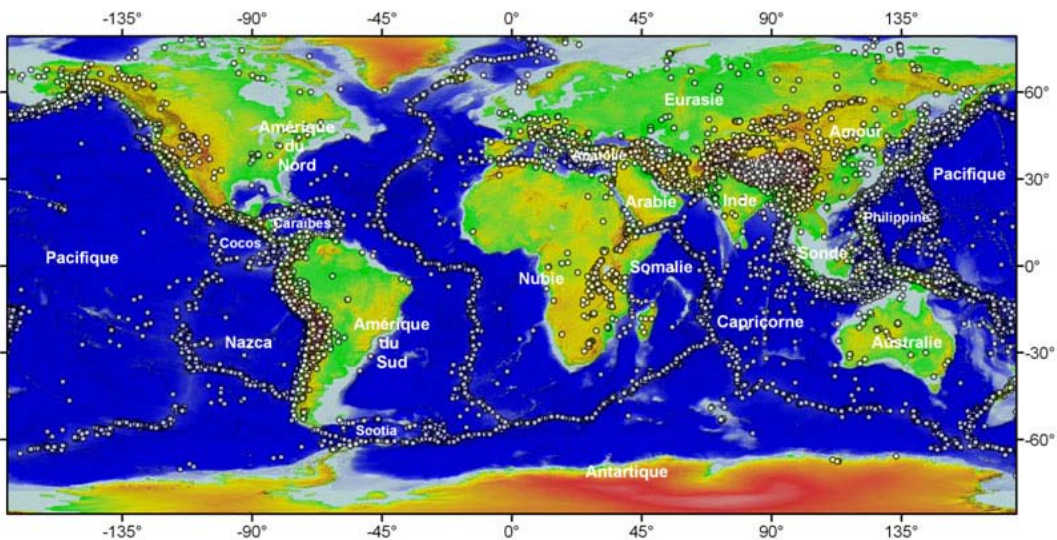
Déformations du plateau tibétain et de l'est de la Chine (plaque Eurasie) par GPS



Déformations à l'intérieur des continents



Rhéologie : Comportement mécanique (élasticité/viscosité/viscoélasticité) des matériaux sous l'action de contraintes

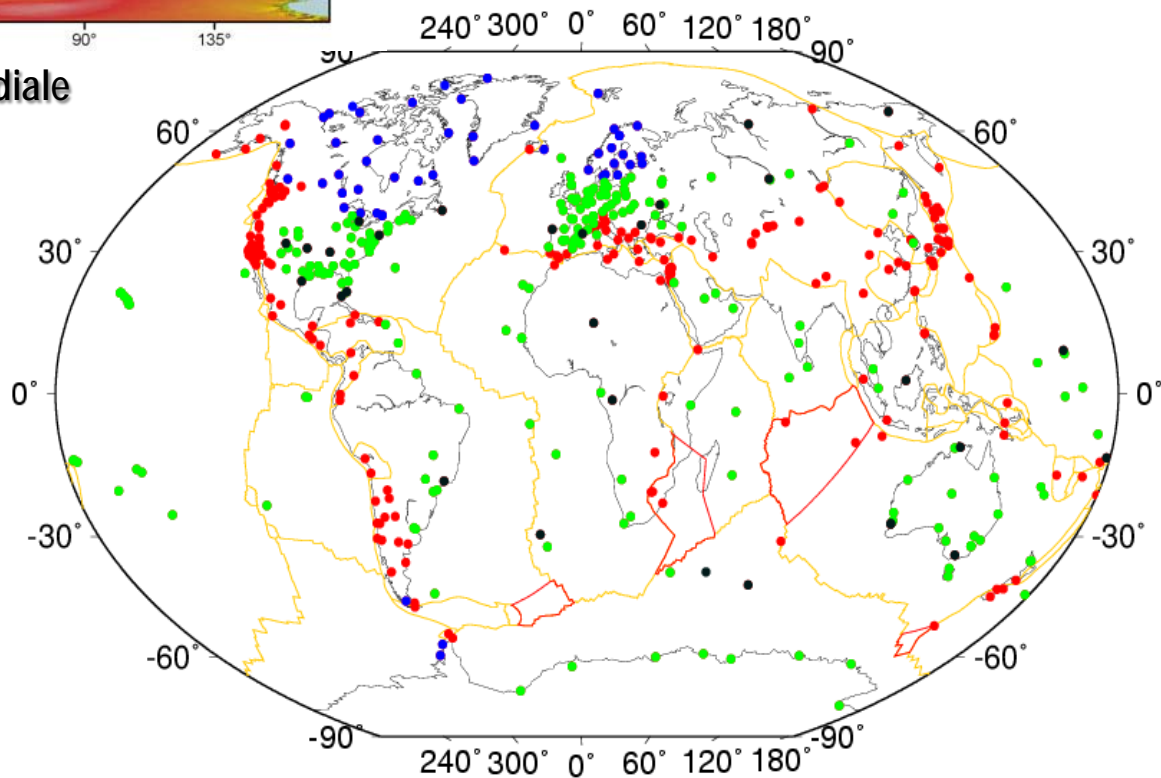


Carte de la sismicité mondiale

Déformations aux frontières des plaques

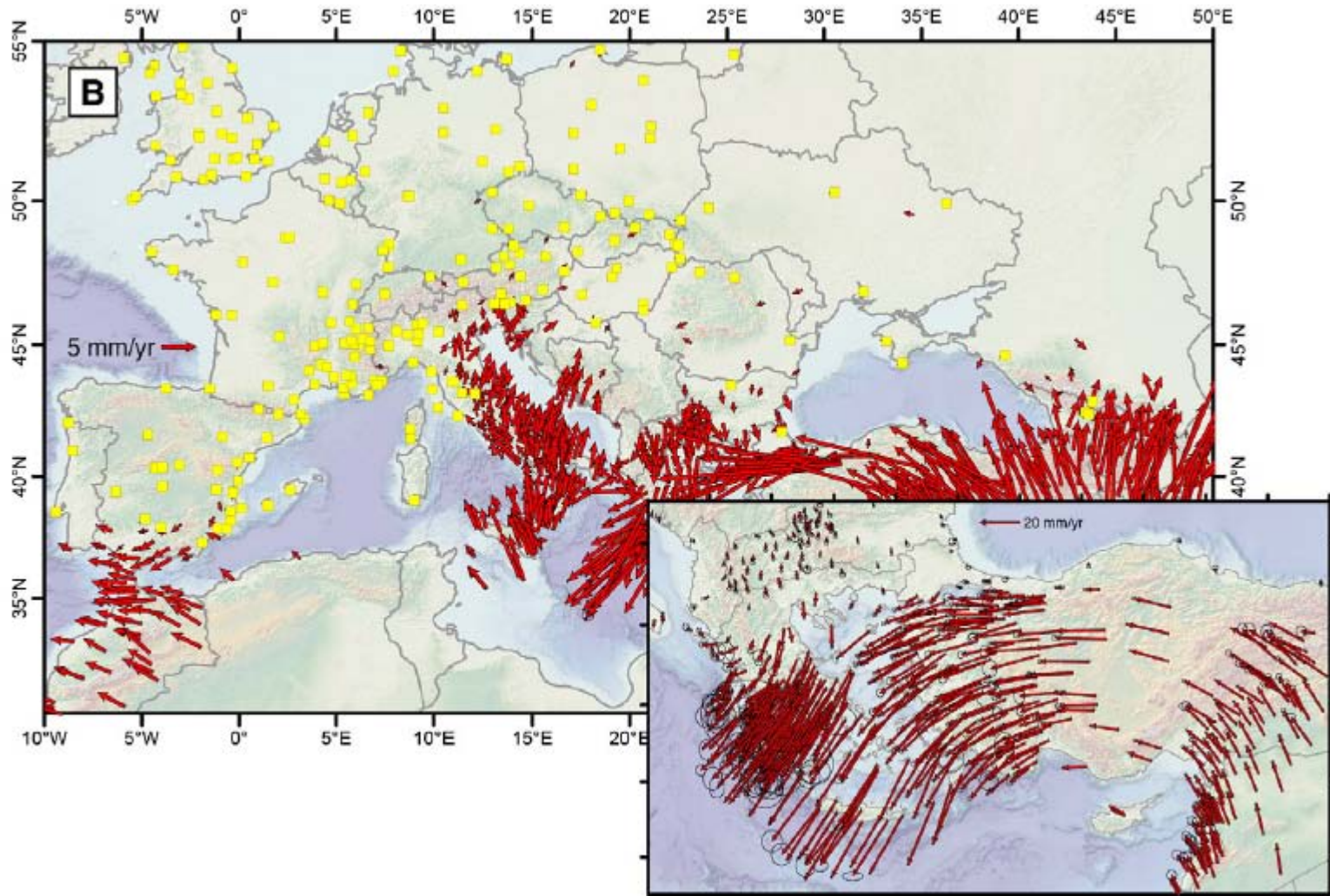
(15% de la surface des continents)

*En rouge: stations situées
aux frontières des plaques*



Distribution des stations géodésiques sur les plaques

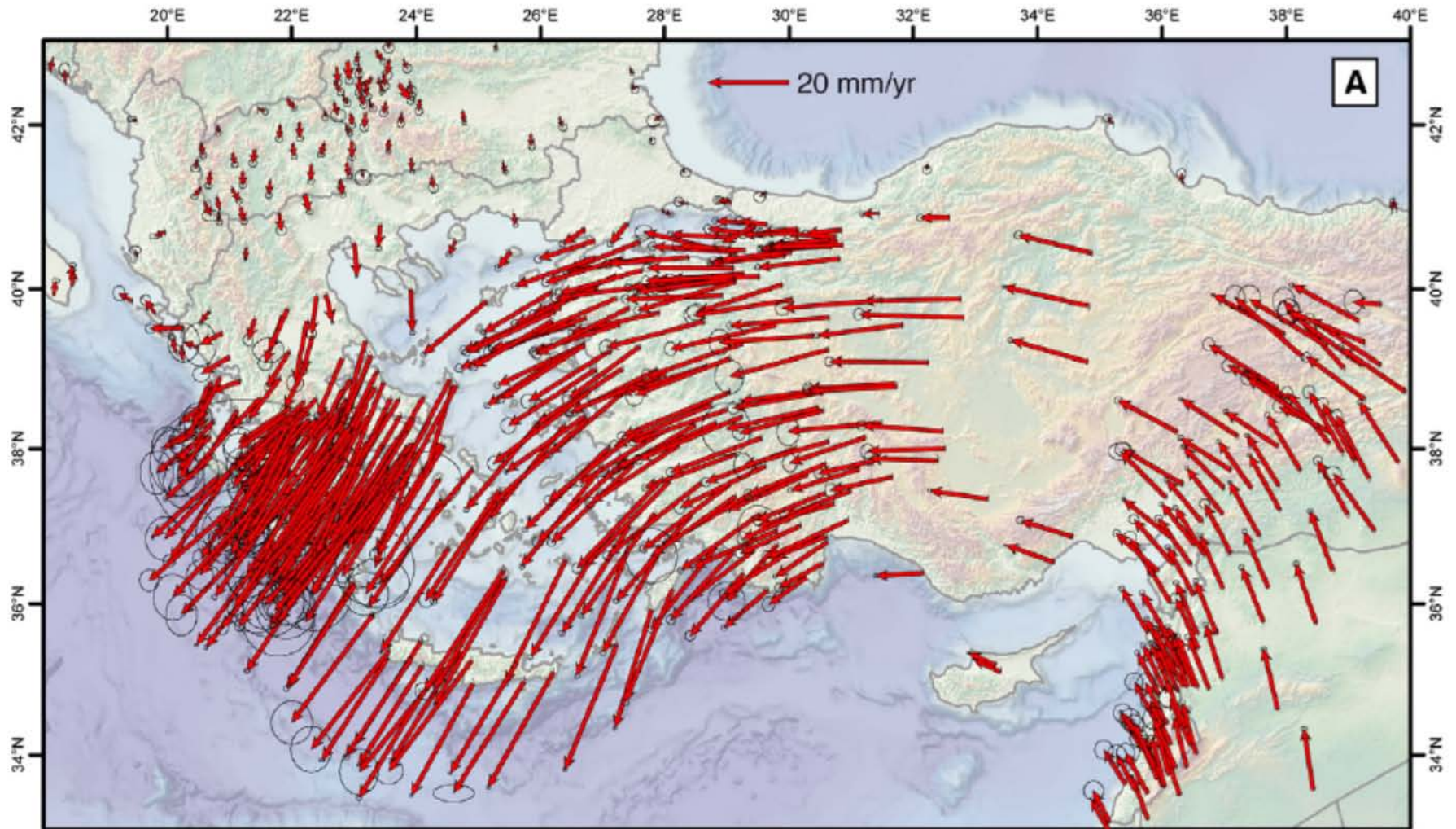
Déformations de la région Méditerranée mesurées par GPS



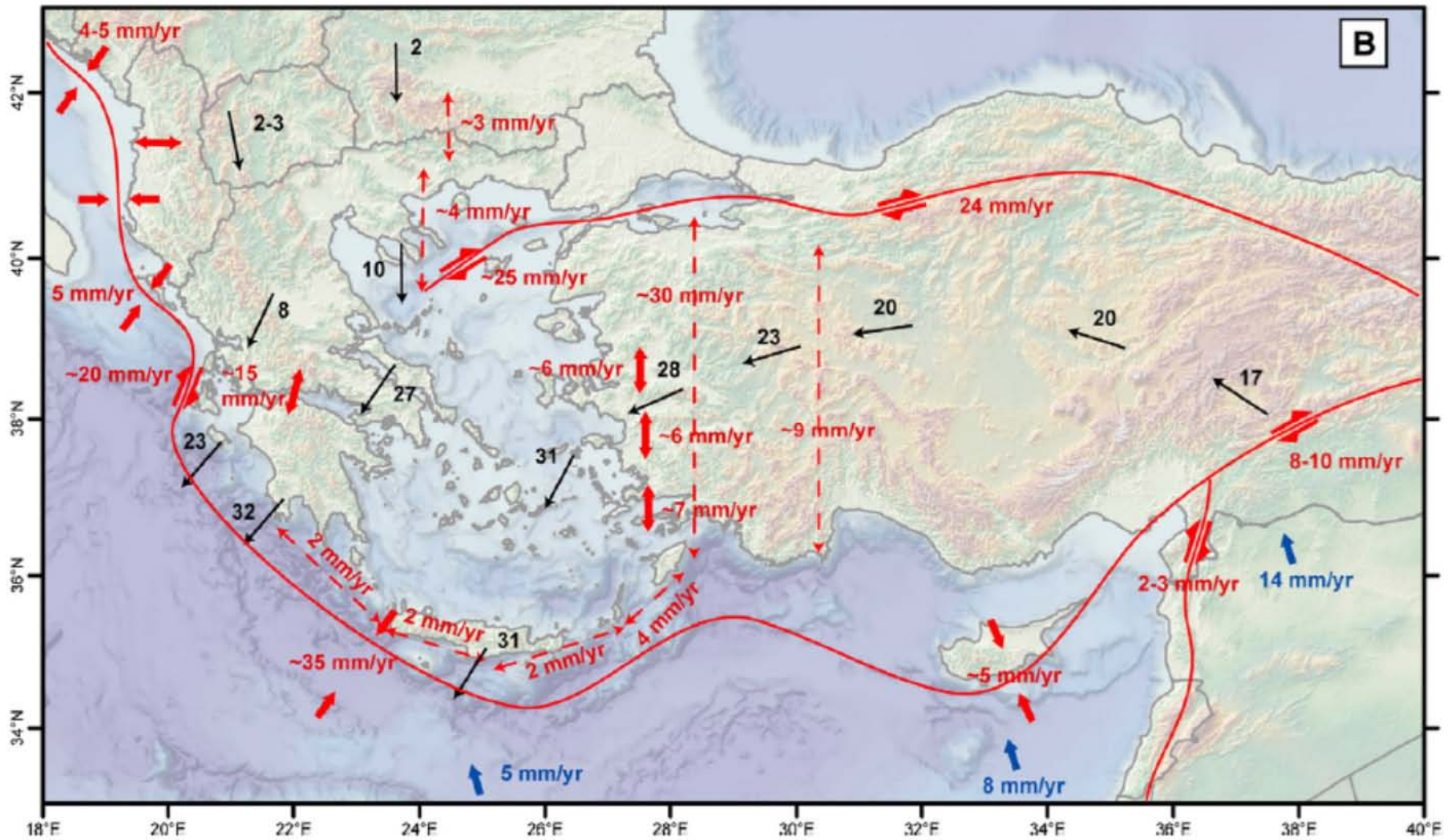
Vitesses GPS en Méditerranée orientale et Anatolie

J.-M. Nocquet / *Tectonophysics* 579 (2012) 220–242

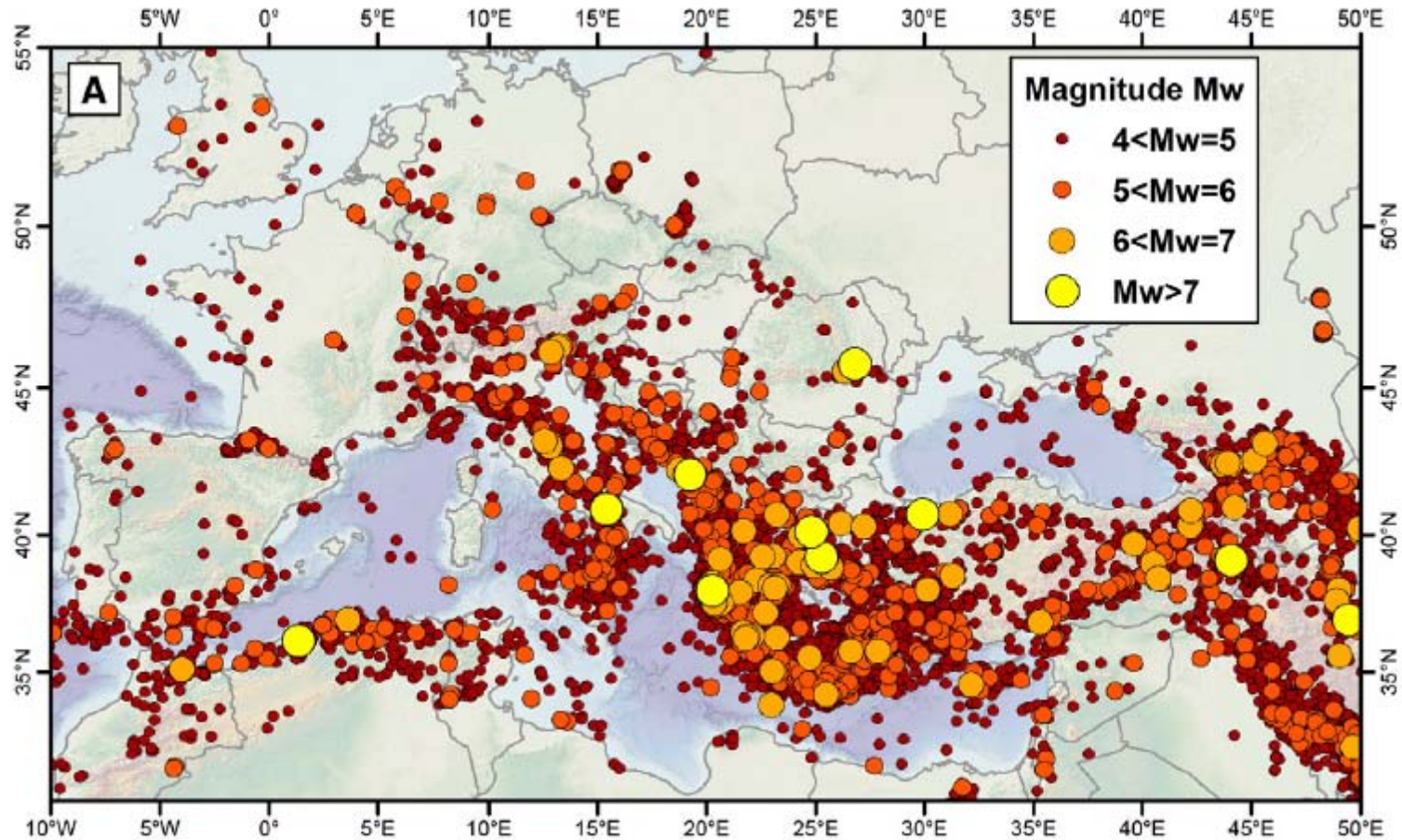
233



Carte cinématique de la région



Carte de la sismicité de la région méditerranéenne



Mesure des mouvements verticaux de la croûte terrestre par géodésie spatiale

-Tectonique, volcanisme

-Rebond Post Glaciaire

-Subsidence du sol

-Effets de charge de l'atmosphère, des océans et des eaux continentales

Mesure des mouvements co-sismiques

→ le séisme du Maule (27 fév. 2010)

Exemples de changements brusques de coordonnées suite au séisme du Maule (Chili) de magnitude 8.8 le 27 février 2010:

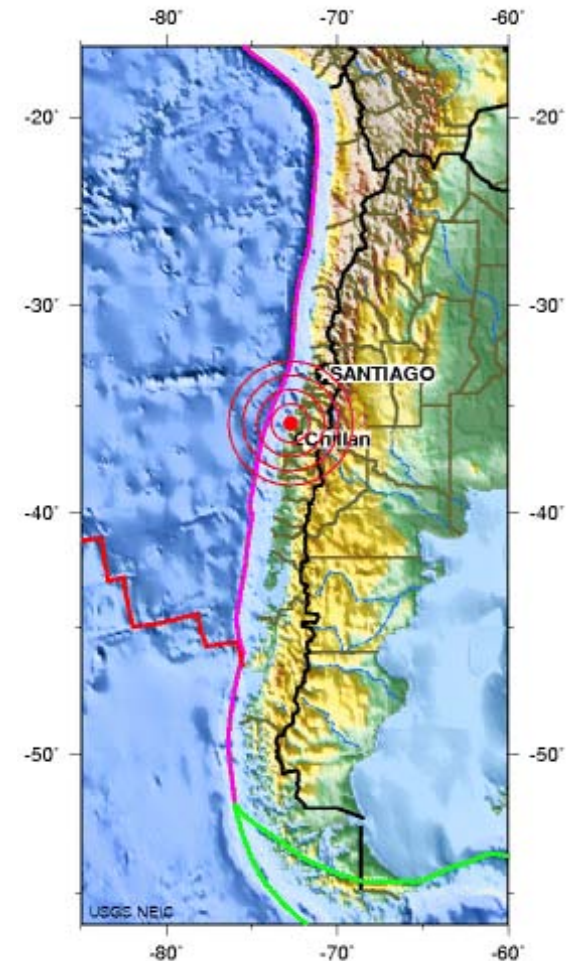
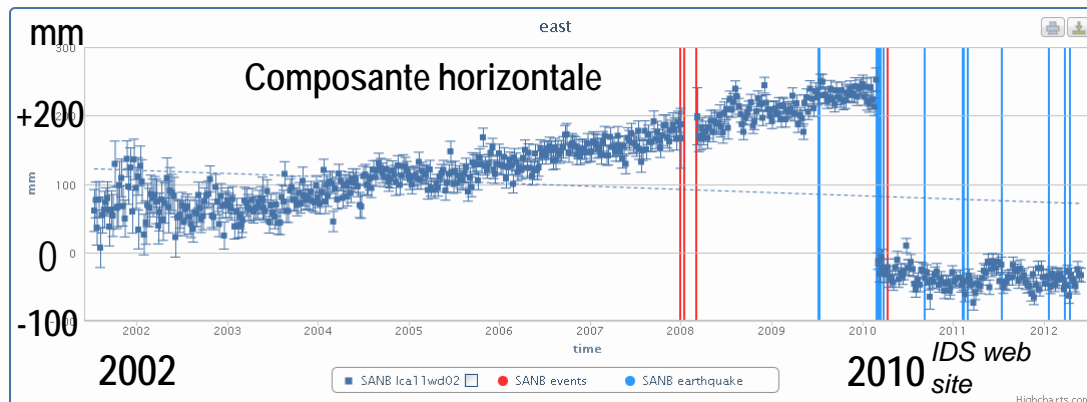
➤ Ville de Concepcion (**station laser**)

→ déplacement: 65 cm S, 250 cm W, -10 cm vertical

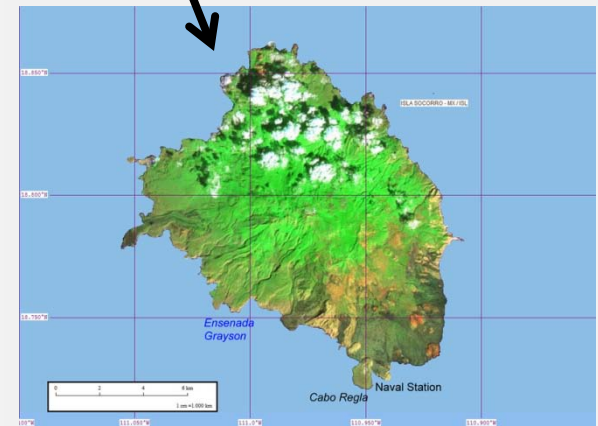
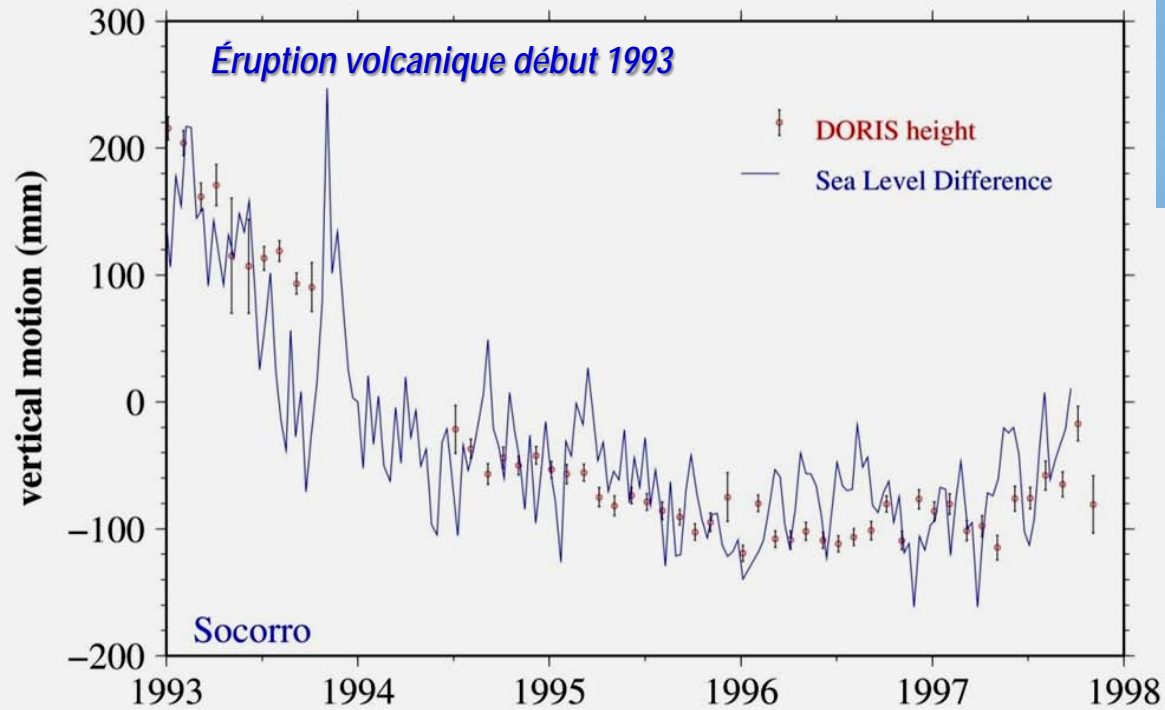
➤ Ville de Santiago du Chili (**station DORIS**)

→ déplacement: 15 cm S, 26 cm W, -2 cm vertical

Santiago

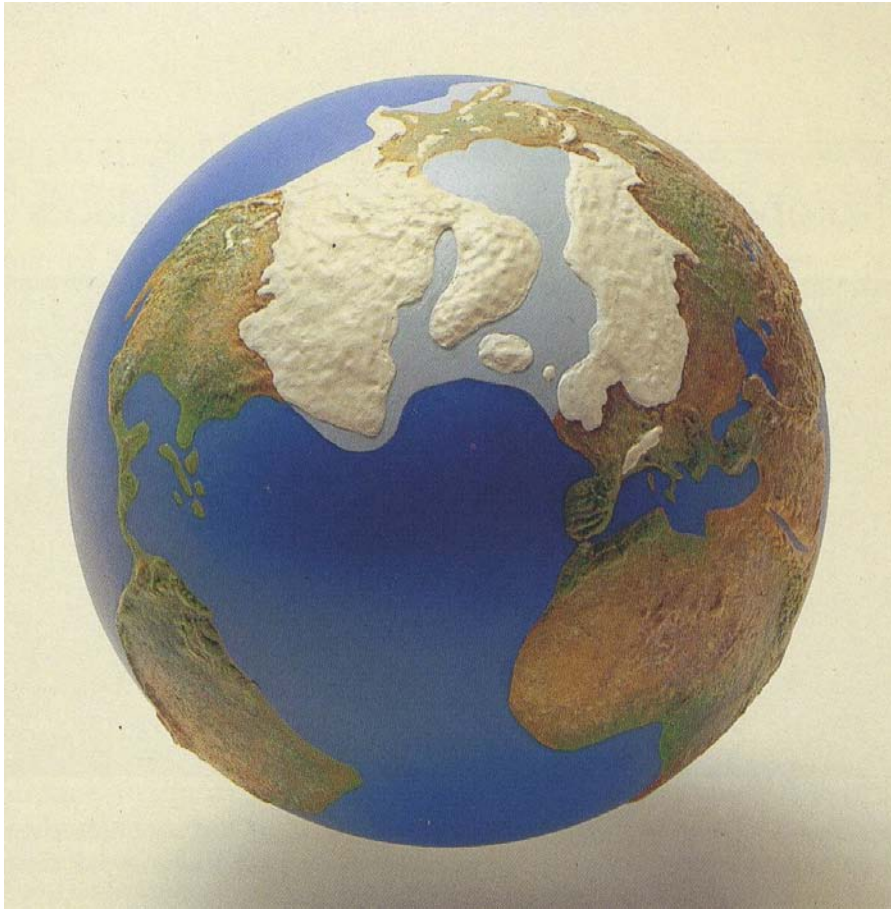


Ile volcanique Socorro (Mexique)

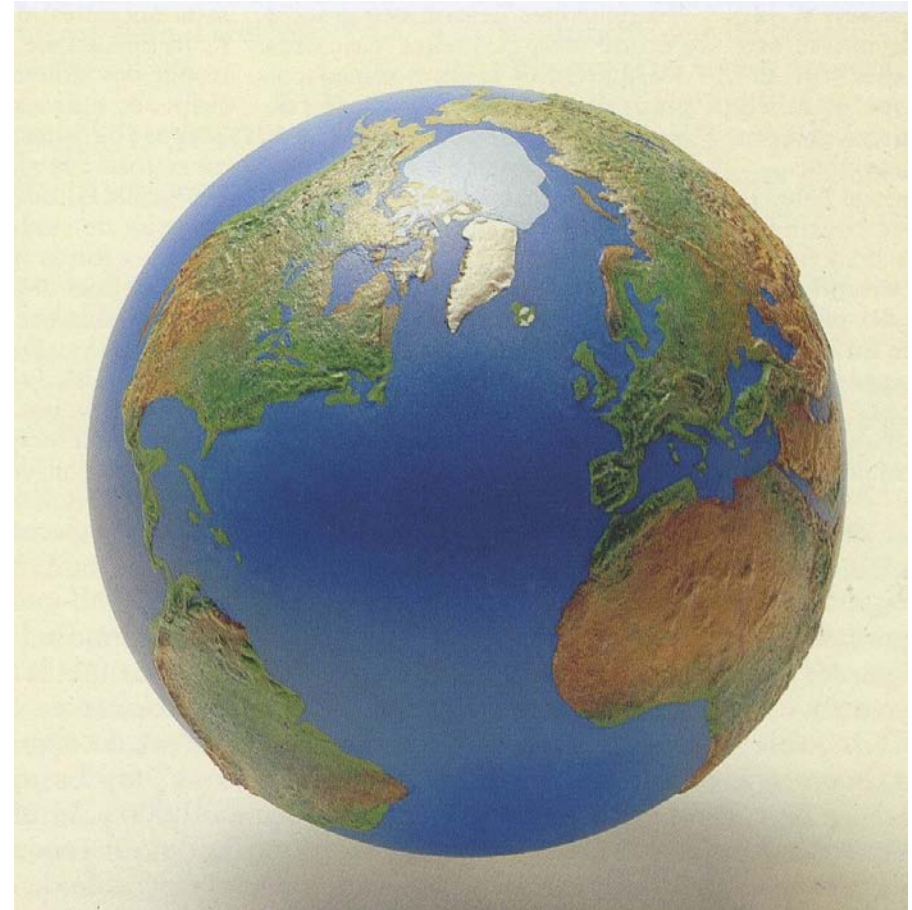


Mesure par le système DORIS de la relaxation de la croûte terrestre après une éruption volcanique

Glaciation/Déglaciation et « rebond post-glaciaire »



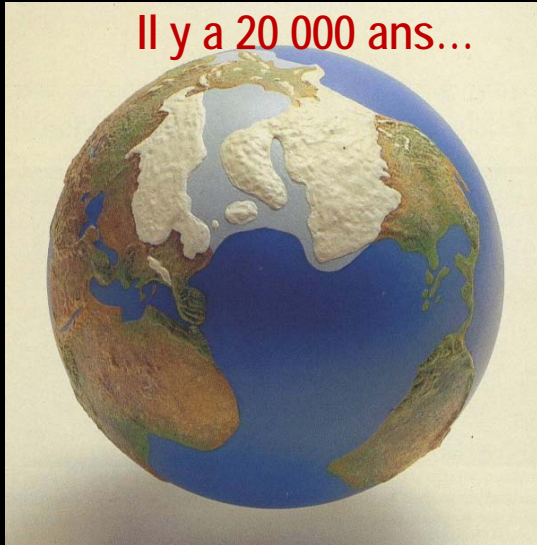
Il y a 20 000 ans →
dernier maximum glaciaire



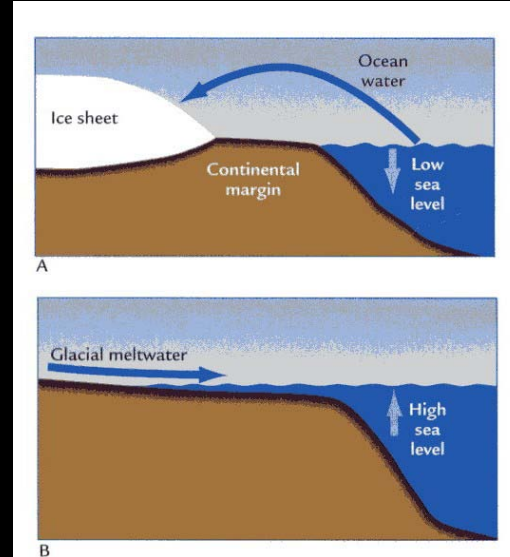
Aujourd'hui

Depuis environ 3 millions d'années.....

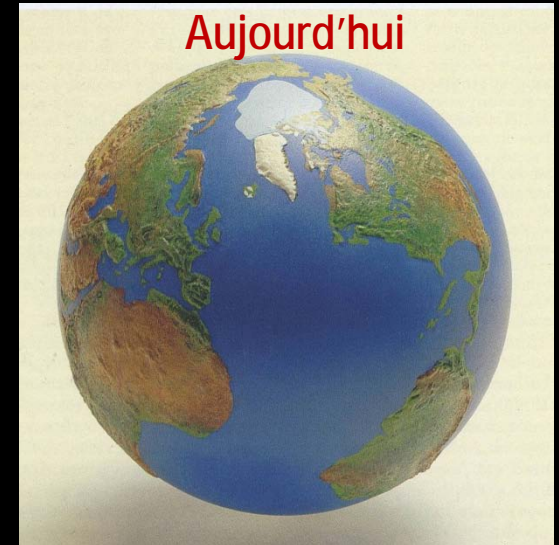
Il y a 20 000 ans...



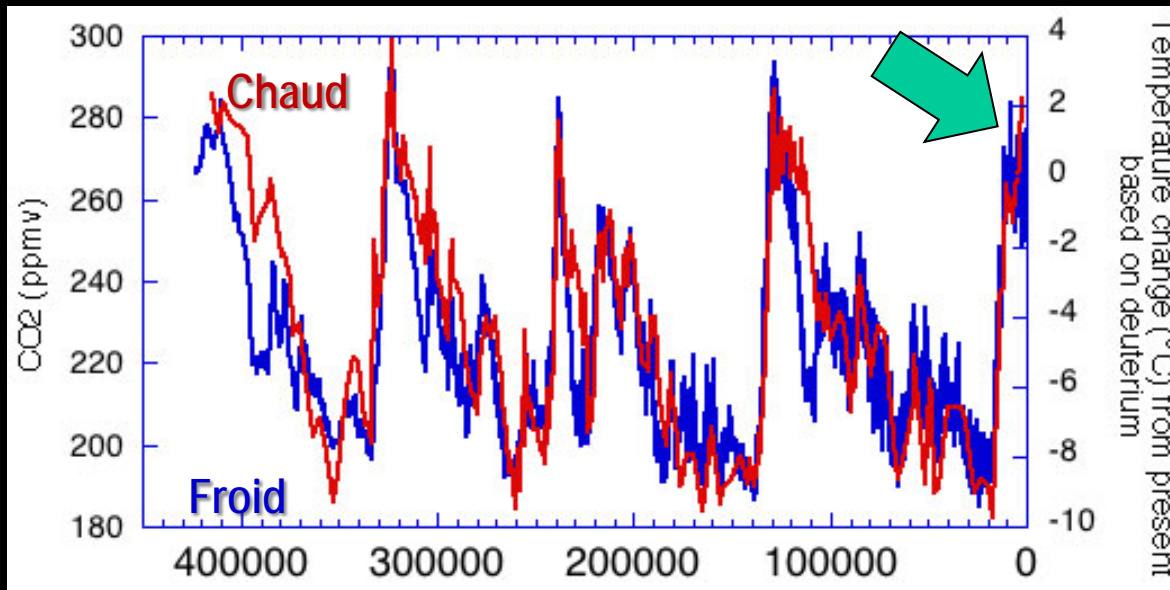
Climat glaciaire



Aujourd'hui

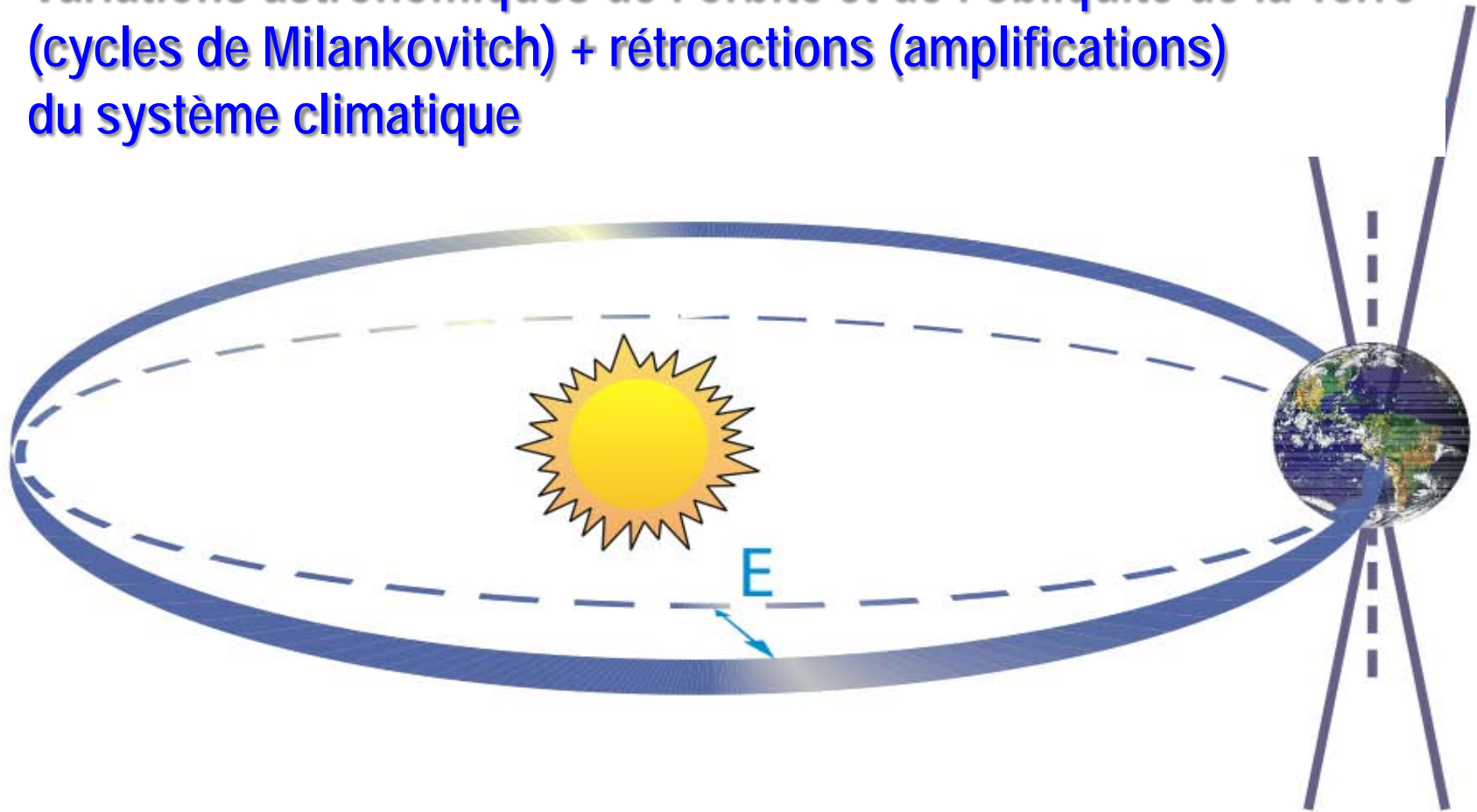


Climat interglaciaire



Passé ← Temps (années) → Présent

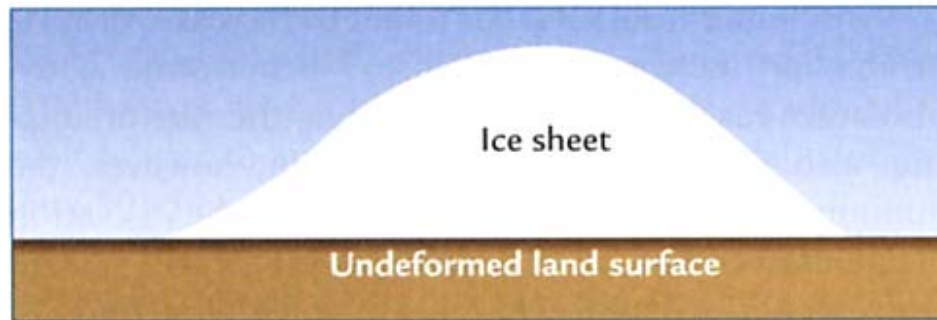
Cause des glaciations du Quaternaire:
Variations astronomiques de l'orbite et de l'obliquité de la Terre
(cycles de Milankovitch) + rétroactions (amplifications)
du système climatique



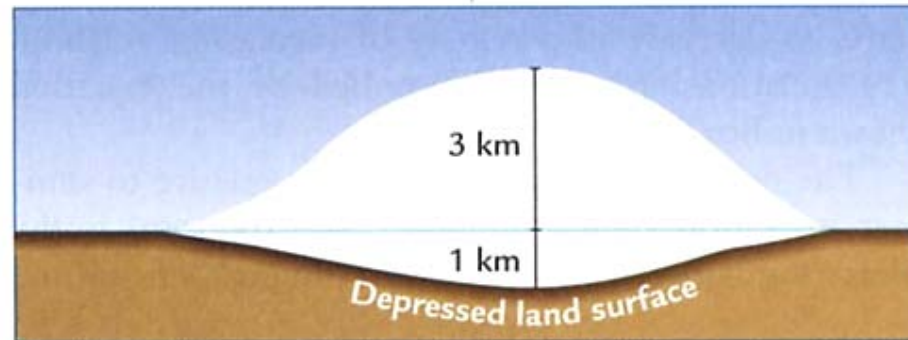
©IPCC 2007: WG1-AR4

Insolation : quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface

La Terre se déforme sous l'effet des charges en surface car la lithosphère est 'élastique', le manteau est visqueux



Terre rigide

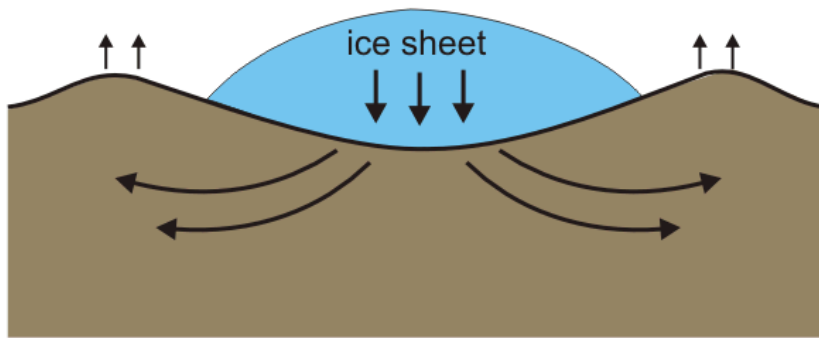


Terre déformable

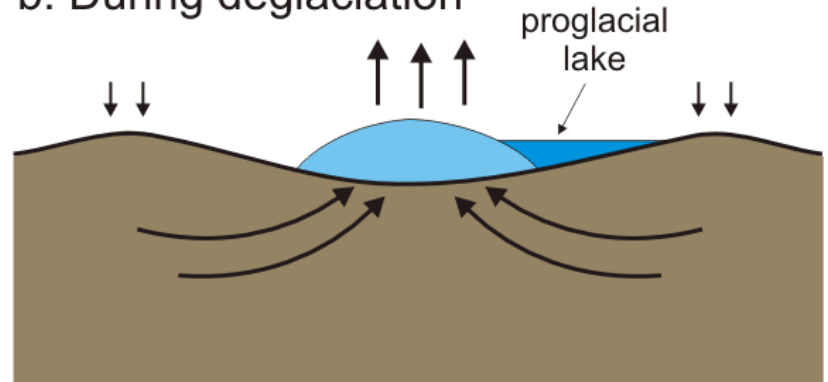
A

Rebond post-glaciaire et viscosité du manteau

a. Peak glaciation



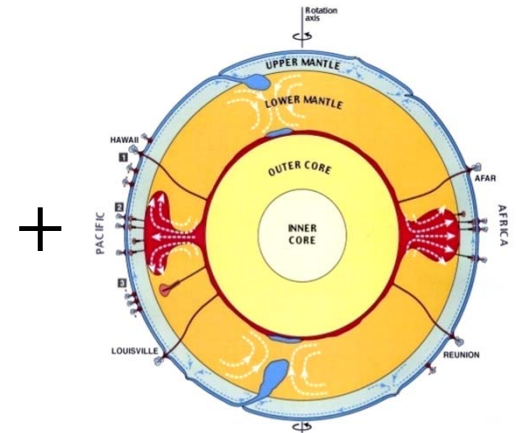
b. During deglaciation



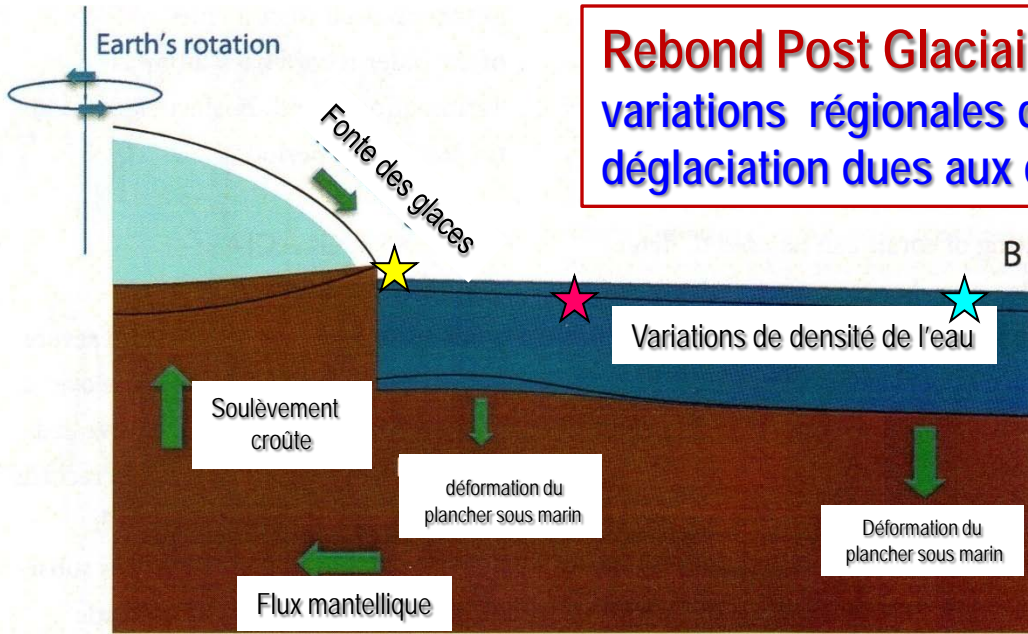
Modélisation
du
Rebond
post-glaciaire



Histoire de la déglaciation

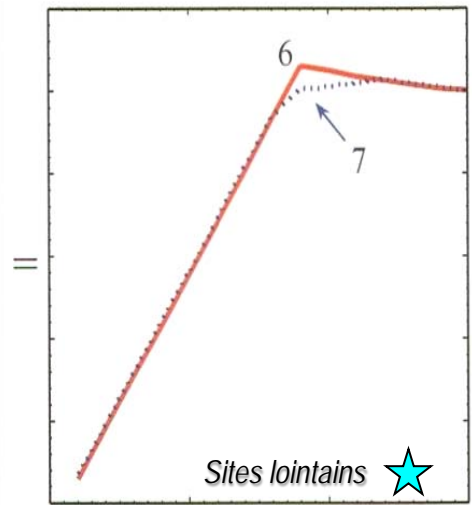
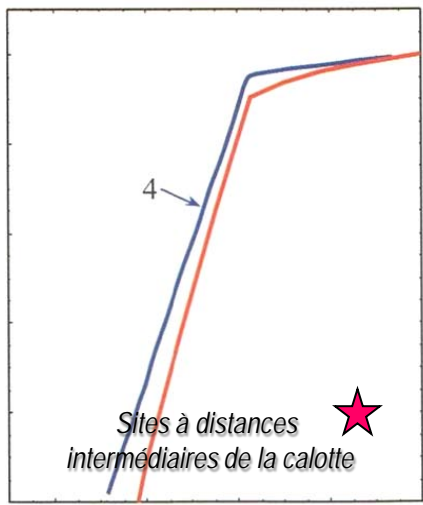
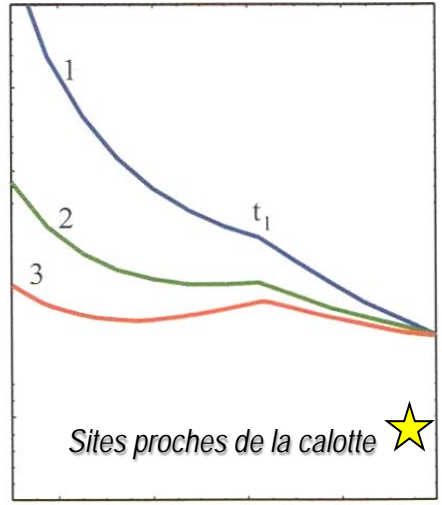


Modèles de la viscosité du manteau

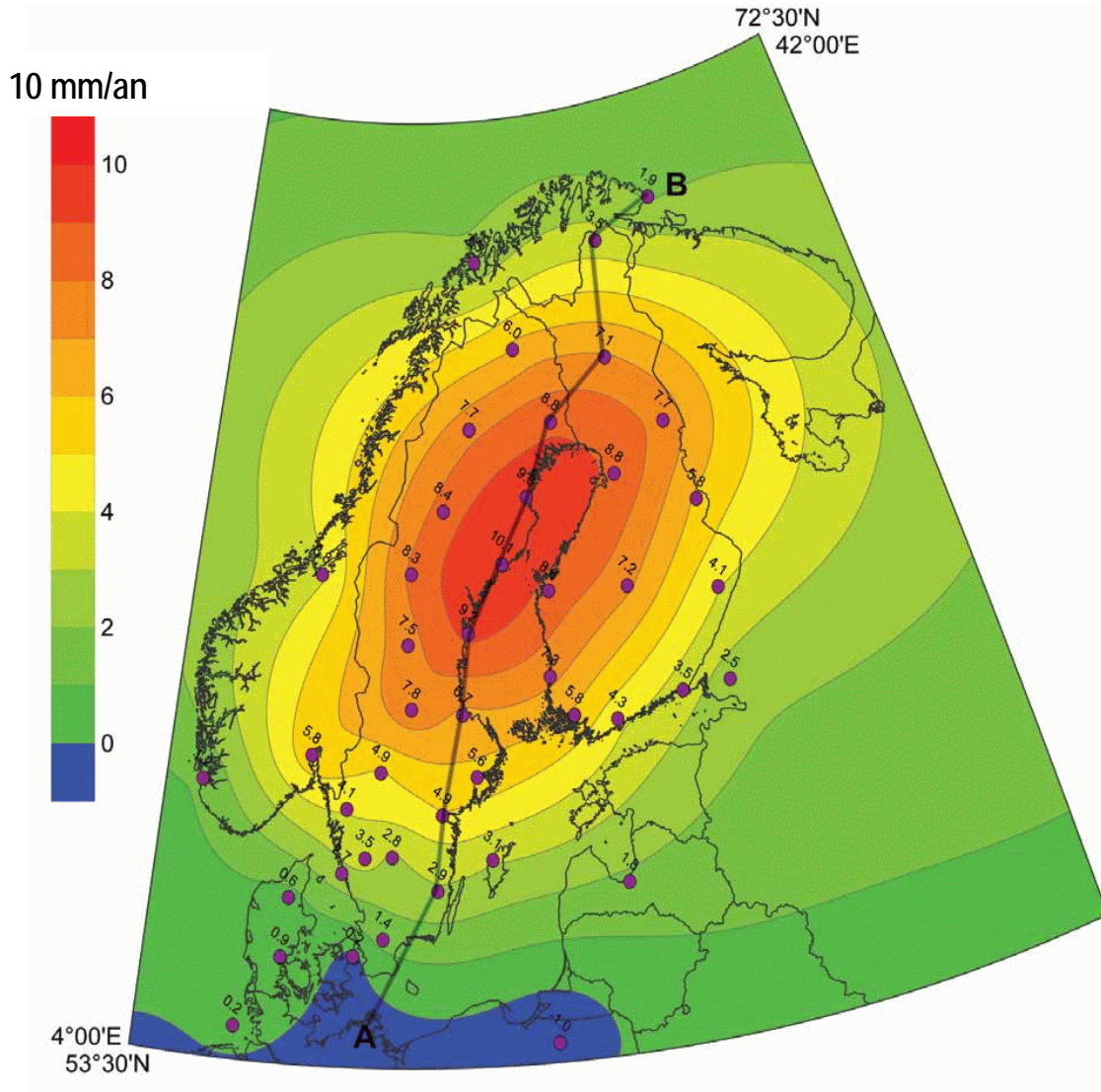


Rebond Post Glaciaire →
 variations régionales du 'paleo' niveau de la mer 'relatif' durant la déglaciation dues aux déformations viscoélastiques de la Terre

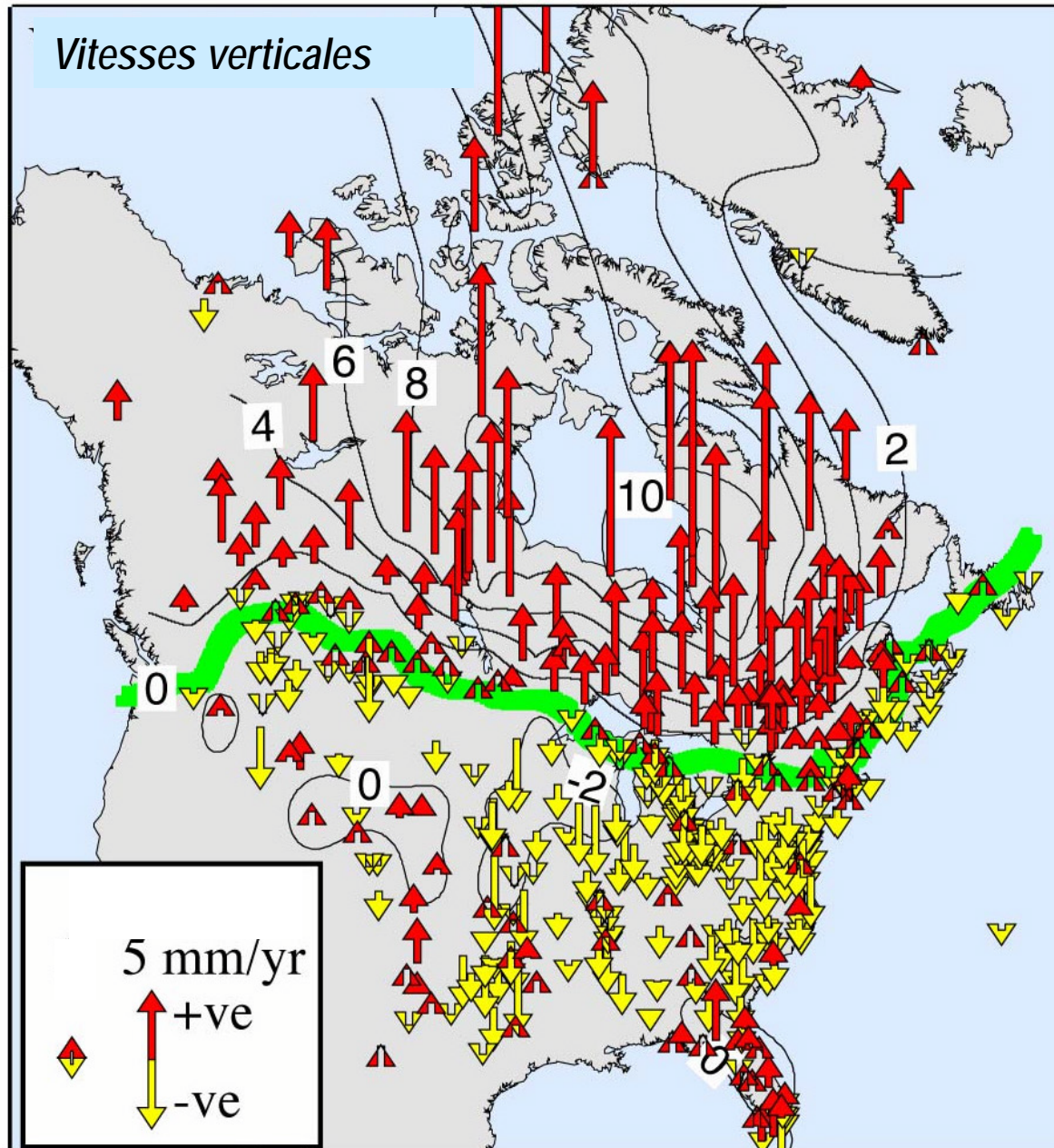
Evolution temporelle du niveau de la mer durant la déglaciation (-20 000 ans à - 6000 ans)



Soulèvement de la croûte terrestre en Scandinavie causé par le rebond post-glaciaire (mm/an)



Mesure par GPS du soulèvement de la croûte terrestre en Amérique du nord



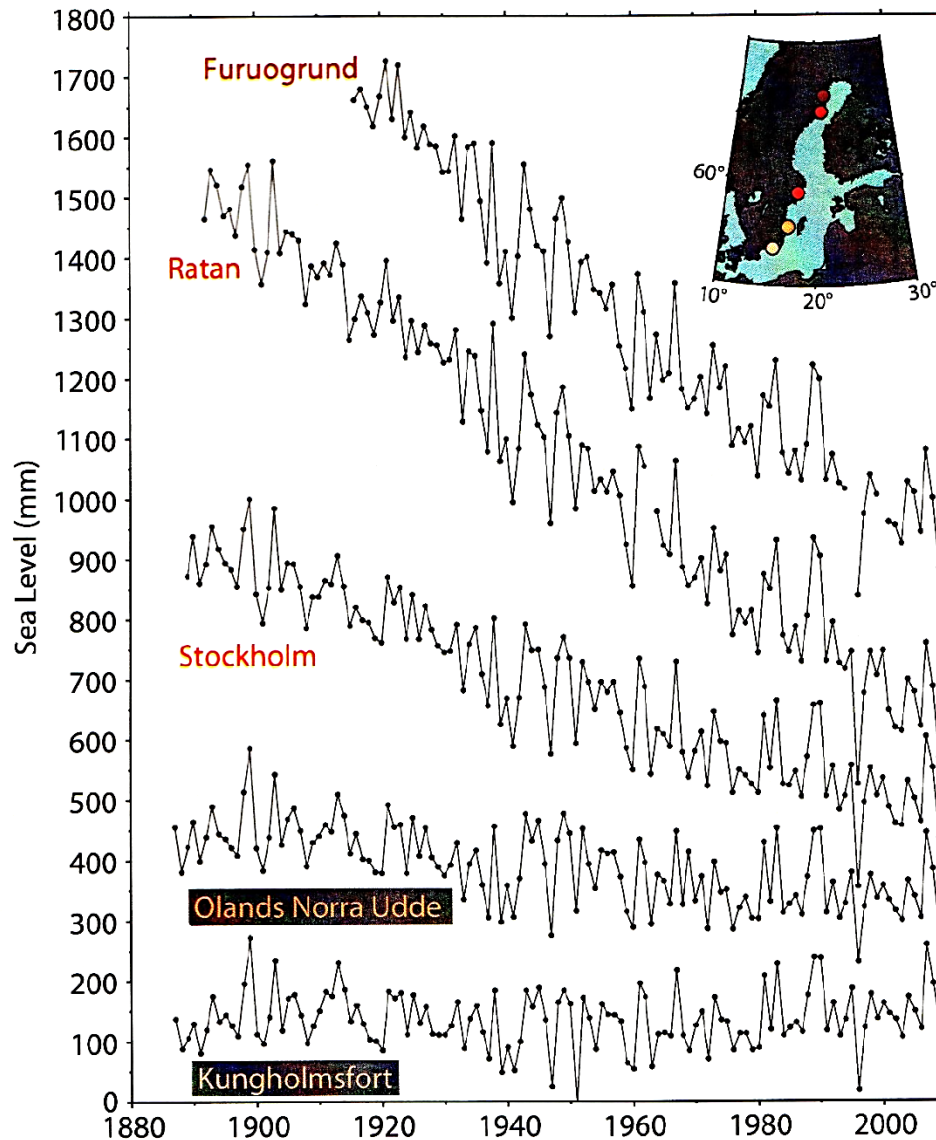
Réseau mondial de marégraphes



Marégraphe du Conquet

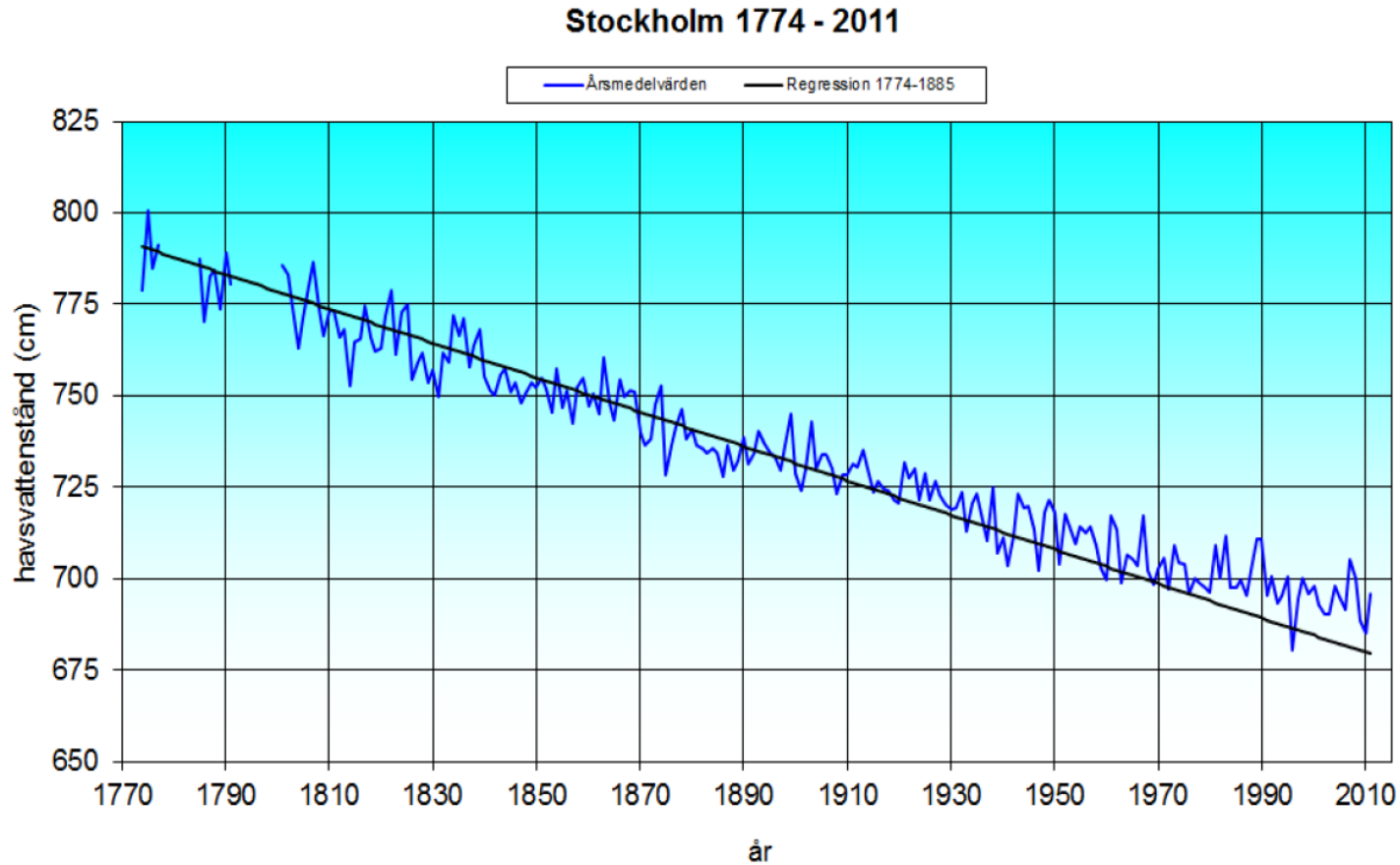


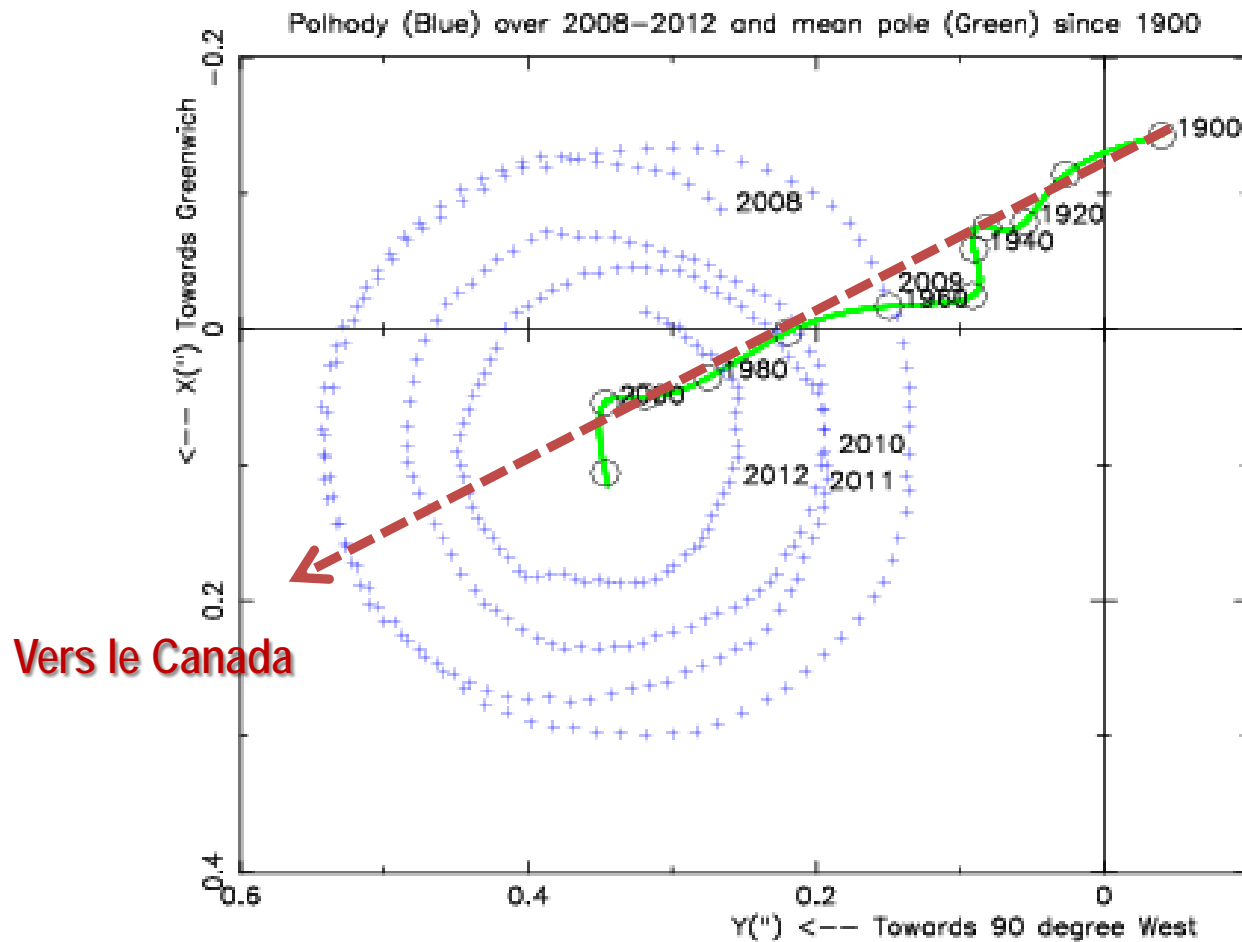
Niveau de la mer relatif mesuré par les marégraphes en Suède



**Le niveau de la mer
'relatif' baisse!**

Série marégraphique à Stockholm (Suède) (1774-2011)





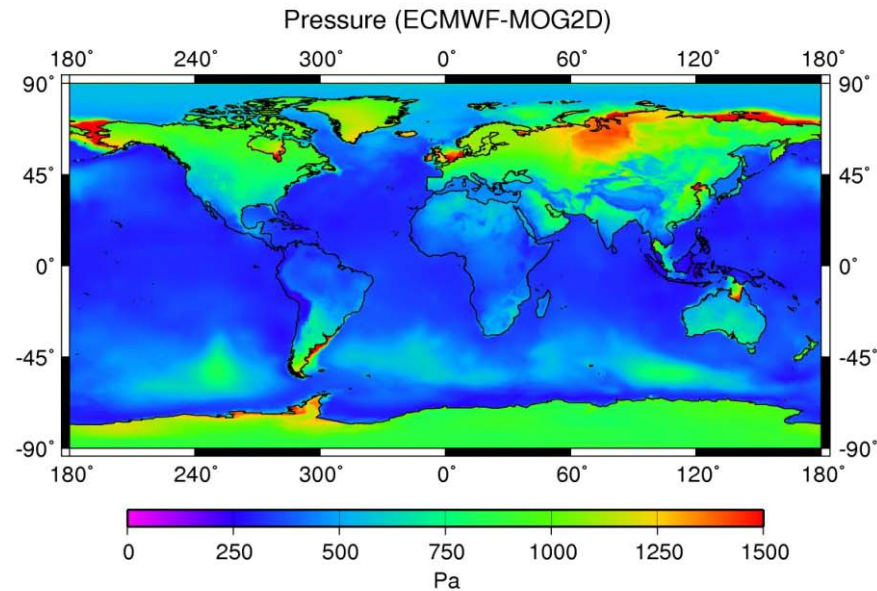
Dérive séculaire du pôle vers 71 ° Ouest, à la vitesse de 13 cm / an.
 On attribue ce mouvement du pôle moyen de rotation au **Rebond Post Glaciaire**
 via la variation du moment d'inertie de la Terre

***Déformations de la croûte terrestre
sous le poids de l'air et de l'eau***

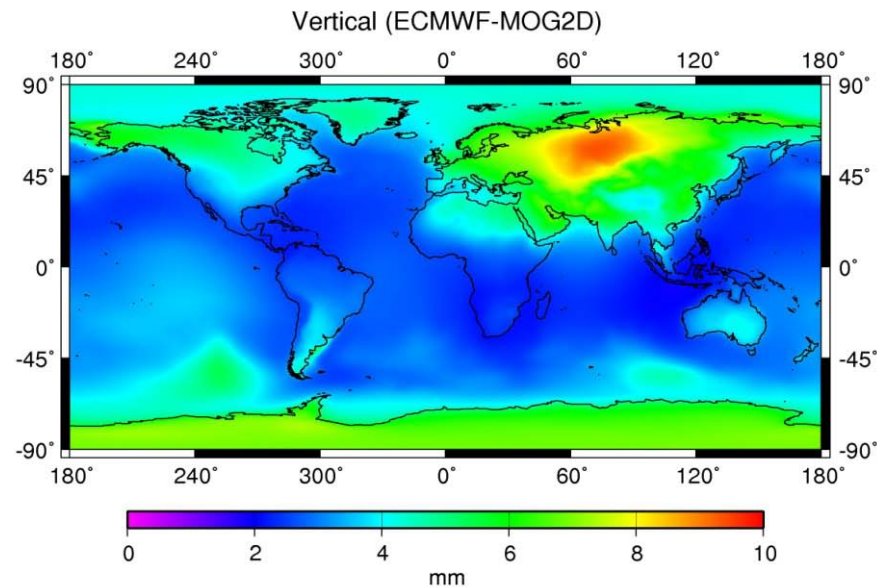


La charge de pression atmosphérique déforme la croûte terrestre

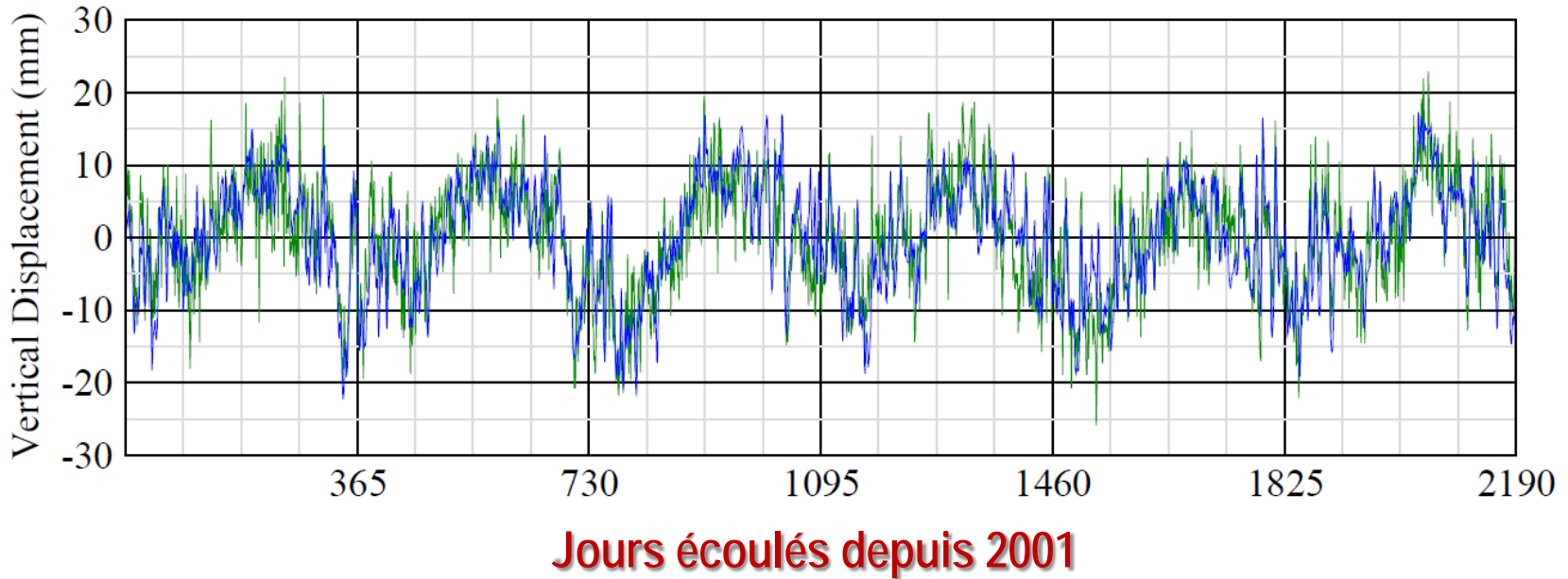
Pression atmosphérique



Déformation verticale de la croûte

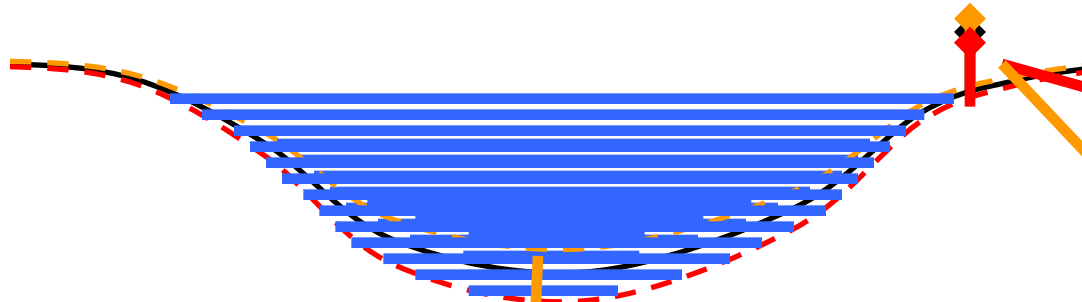


Mouvement vertical saisonnier de la croûte terrestre mesuré par GPS (en bleu) à Potsdam (Allemagne)



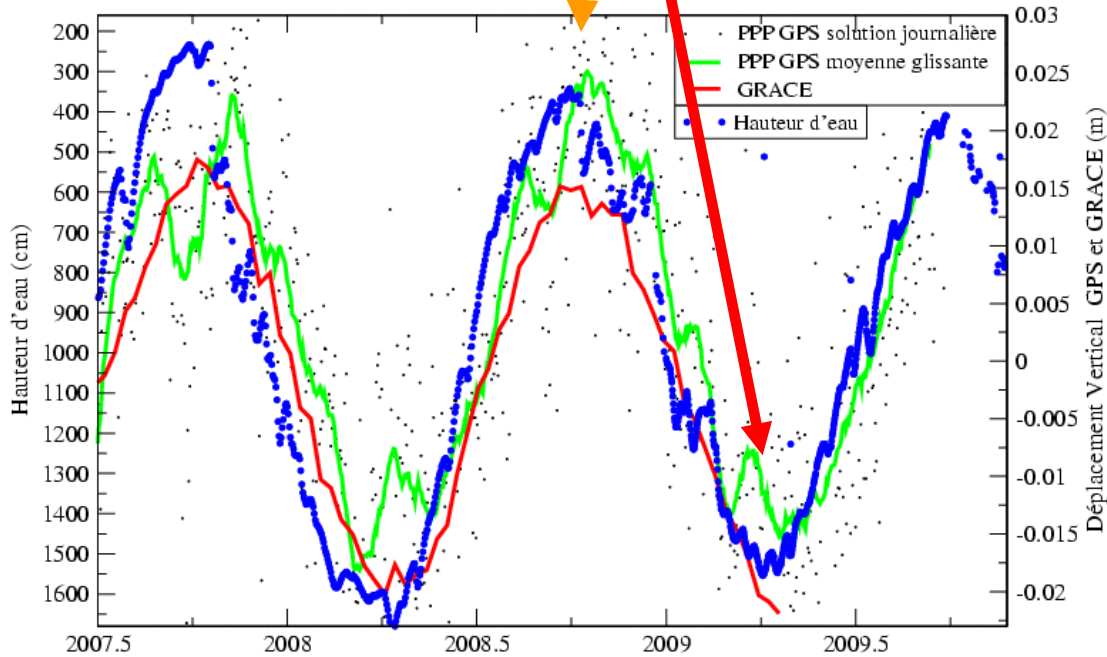
En vert: déformation de charge de la pression atmosphérique

Déformation de la croûte terrestre due à la charge hydrologique du fleuve Amazone



Déformation Crustale du Bassin Amazonien

Comparaison des observations GPS, limnographique et GRACE (Fleuve Madeira)



Déformation de la croûte terrestre due à l'hydrologie continentale calculée pour un modèle hydrologique (exemple pour avril 2003)

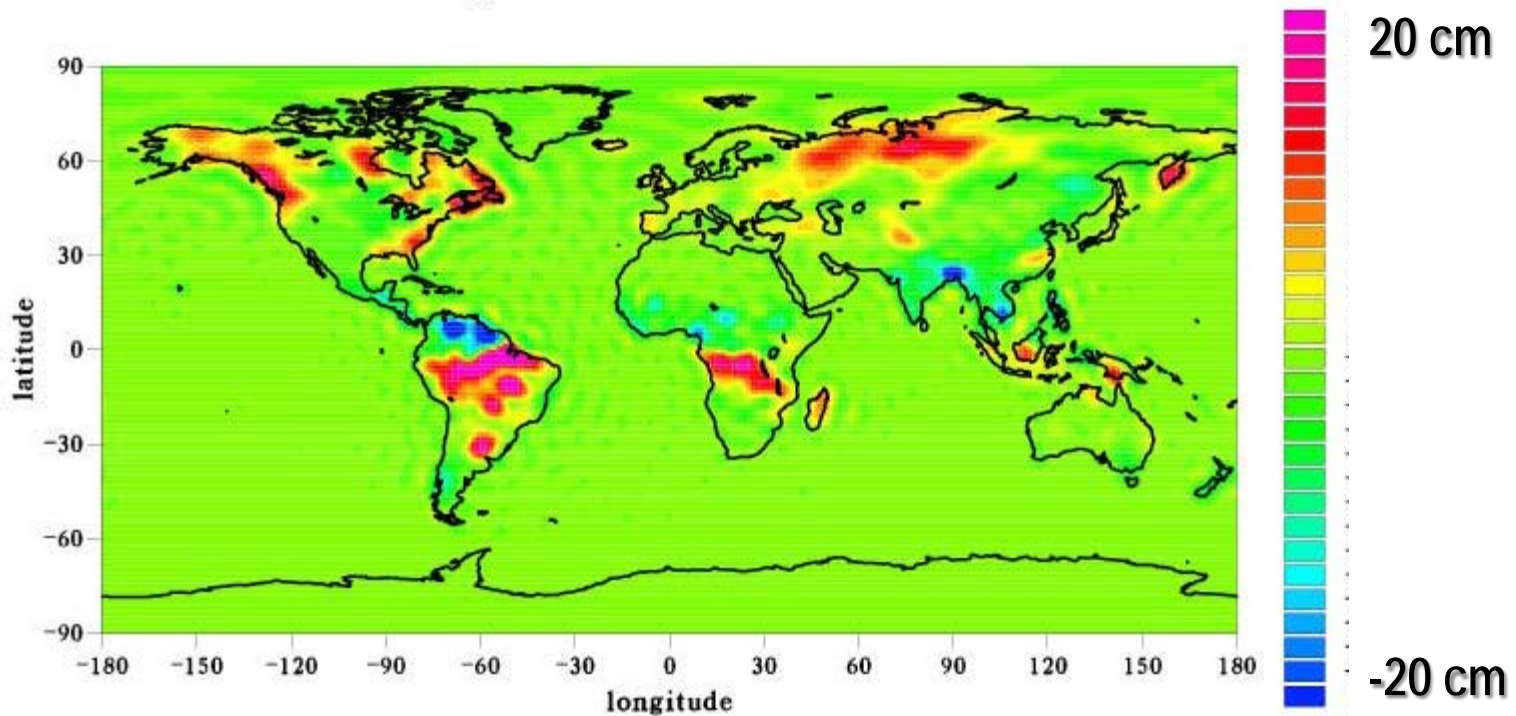
Water WGHM without loading

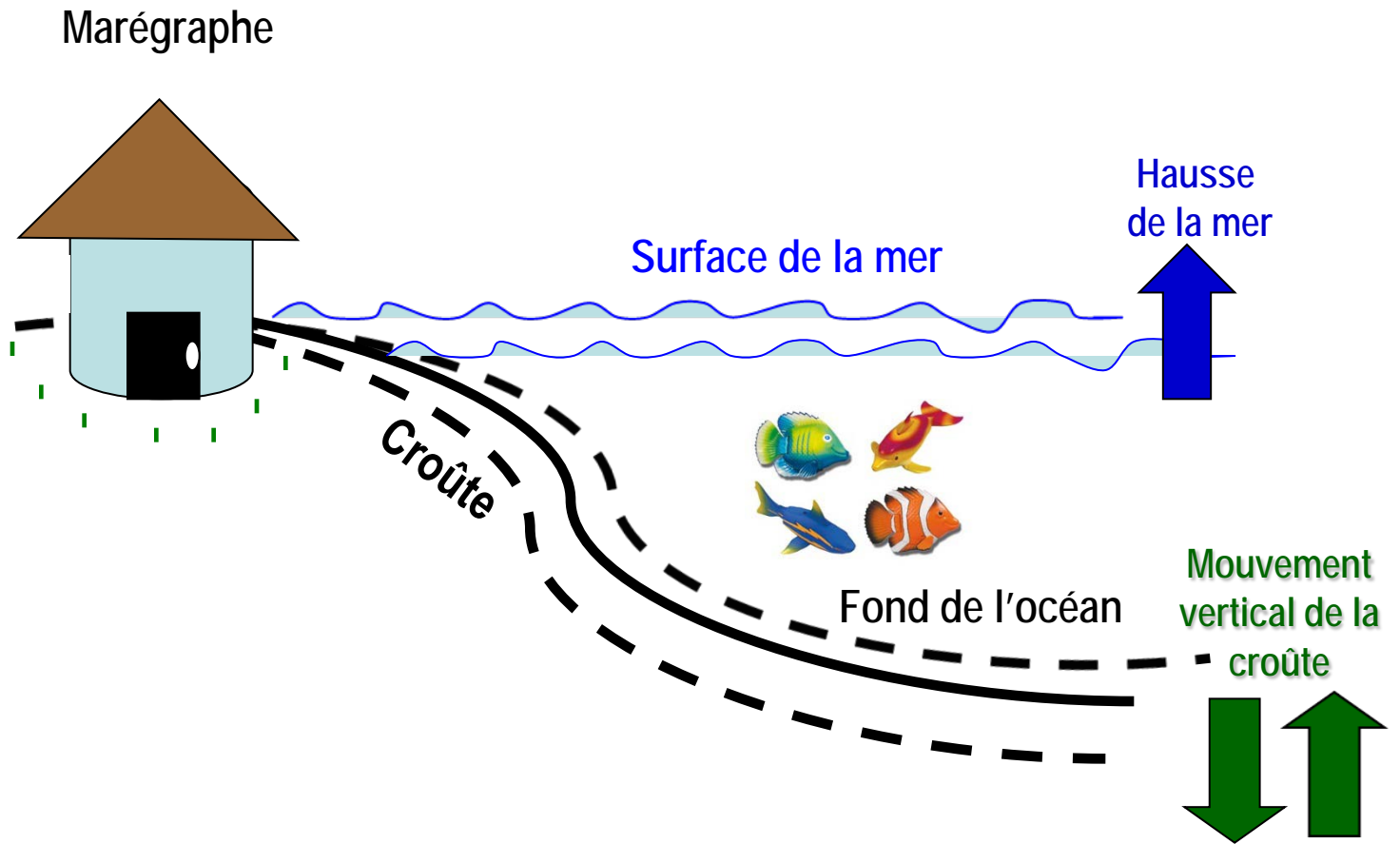
April 2003

degree 0 to 50

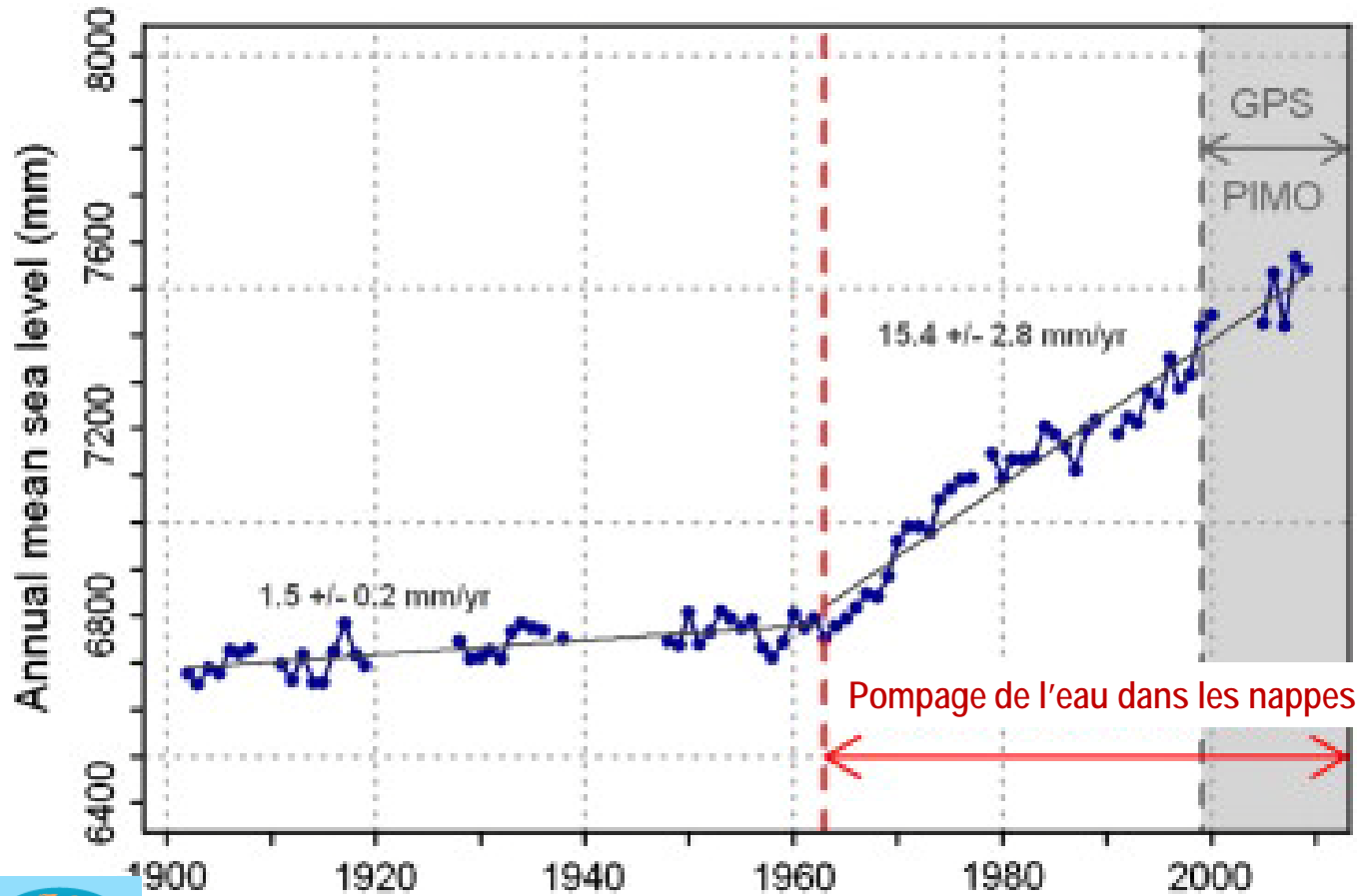
(unit : m)

(rms : 0.0348 / moy : 0.0000 / min : -0.3551 / max : 0.4199)





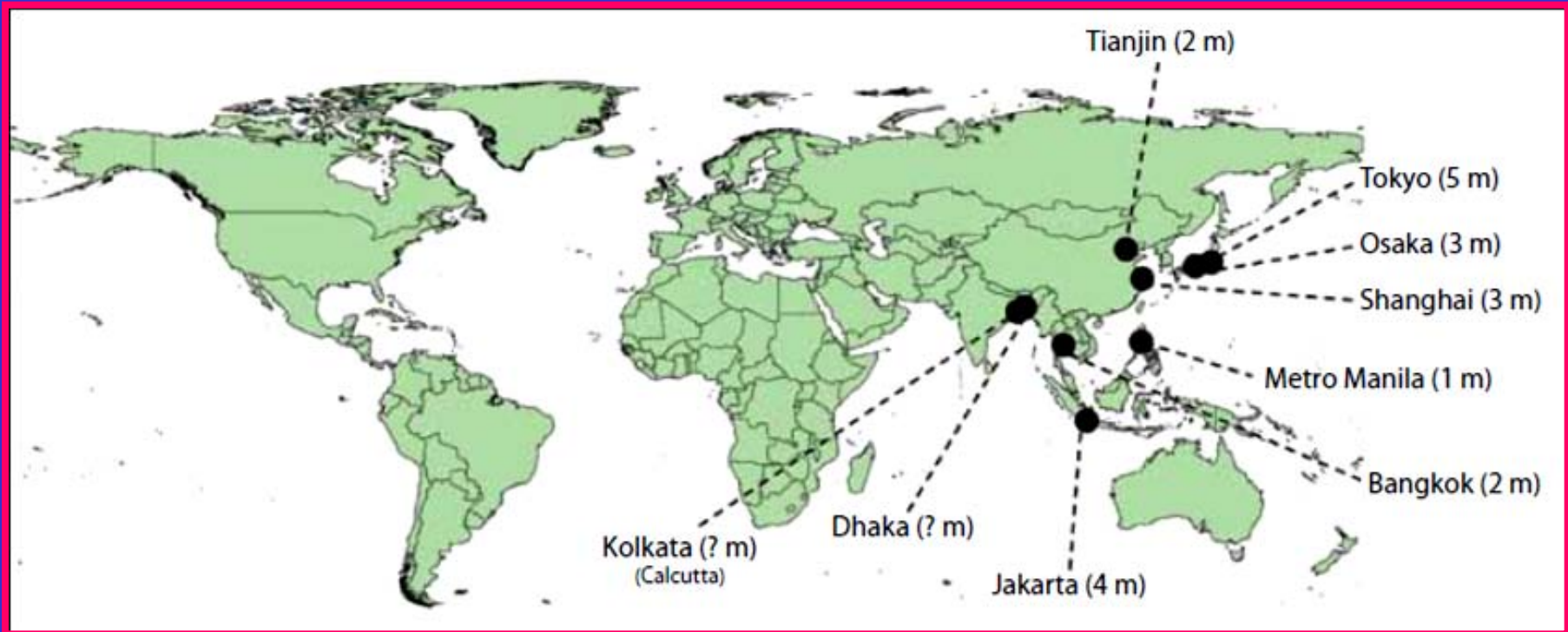
Subsidence du sol et pompage de l'eau dans les nappes; exemple: Manille



Série marégraphique de Manille



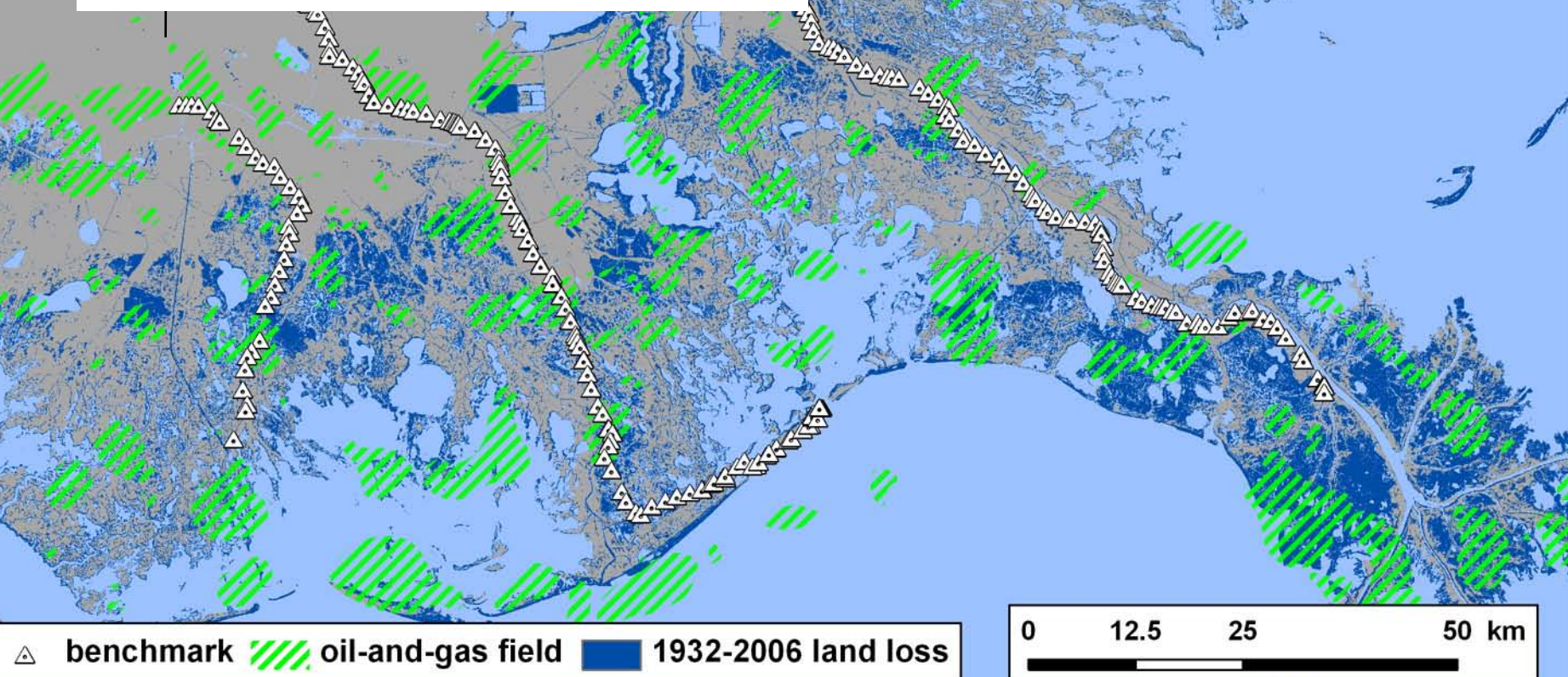
Subsidence de quelques mégapoles au cours des dernières décennies



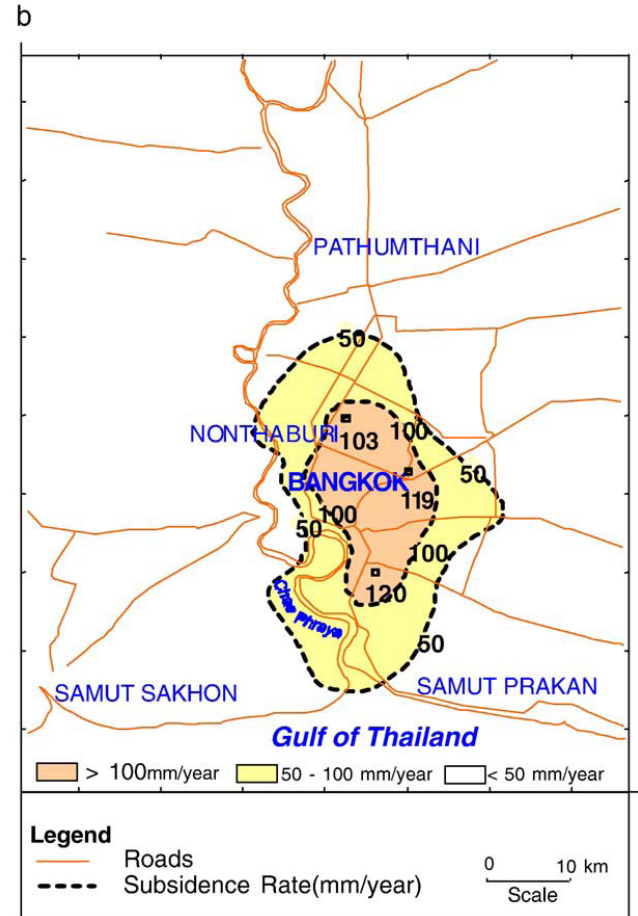
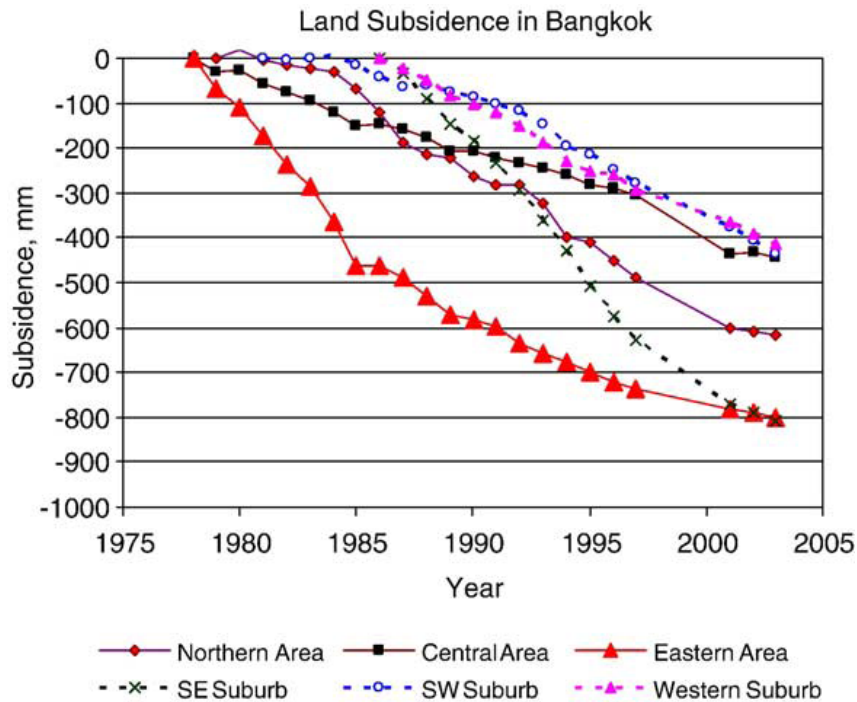
Source: Bernier & Morton (2008)

Delta du Mississippi → subsidence du sol causée par l'exploration pétrolière

En bleu foncé : terres submergées entre 1932 et 2006



Enfoncement du sol autour de Bangkok dû au pompage des eaux souterraines



Les marées terrestres

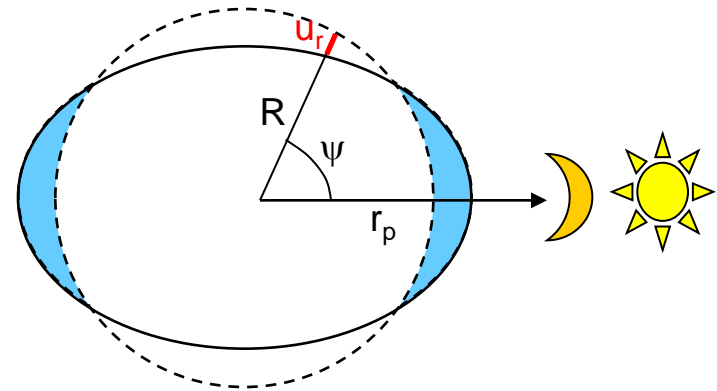


La marée terrestre : théorie de Love (1909)

Déformation « u » de la croûte due à la marée terrestre:

$$u_r = \sum_{l=2}^3 h_l \frac{U_{P_l}}{g}$$

U_p : potentiel 'astronomique'
 g : gravité moyenne de la Terre

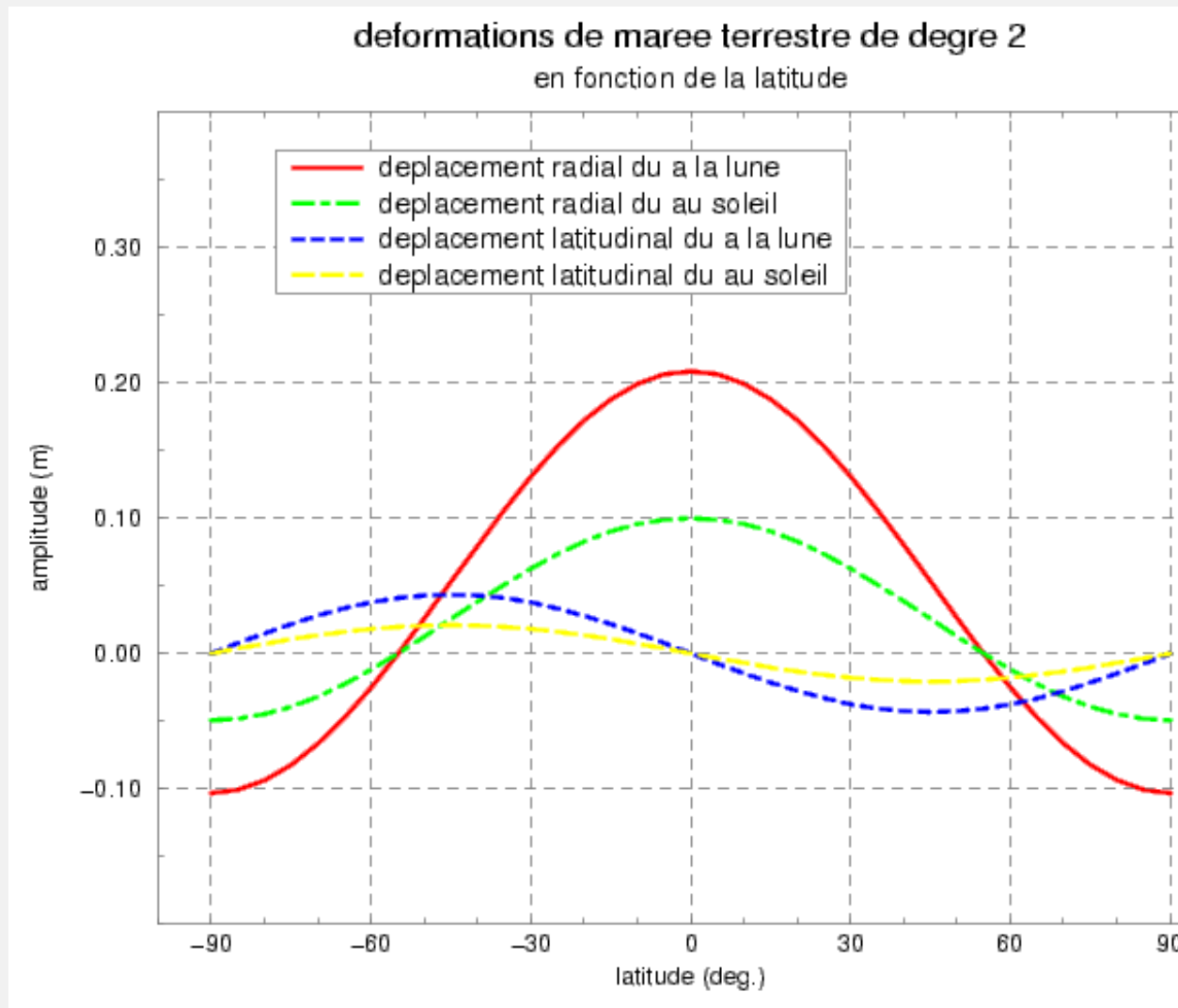


Potentiel de marée terrestre →

$$\Delta U = \sum_{l=2}^3 k_l \left(\frac{R}{r} \right)^{l+1} U_{P_l}(r)$$

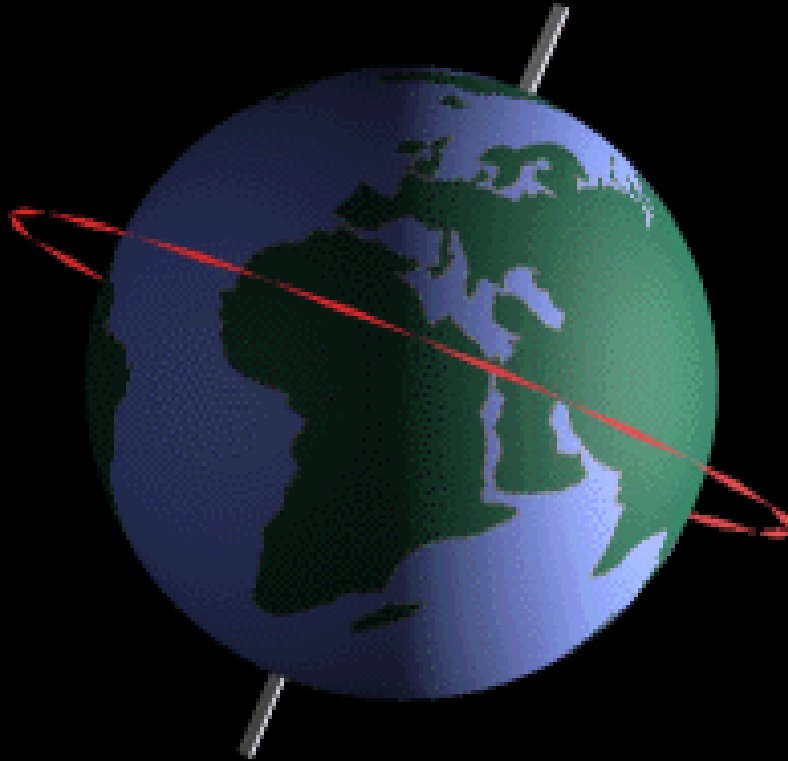
h_l, k_l : nombres de Love (sans dimension) traduisant les propriétés élastiques de la Terre
 ($h_2=0.6, k_2=0.3$)

Les déformations de la croûte dues à la marée terrestre

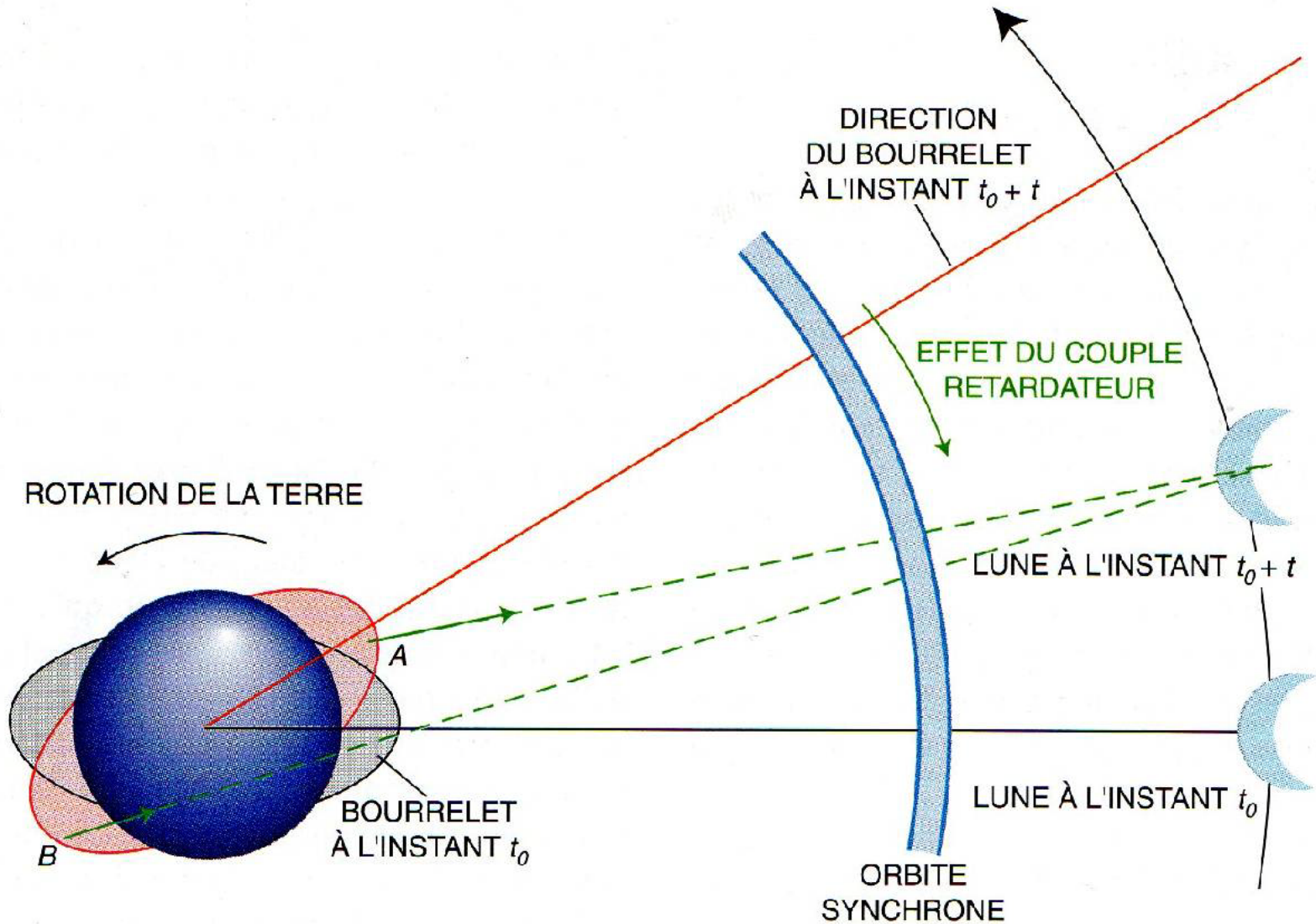


Deux conséquences majeures du phénomène de marées sur le système Terre-Lune:

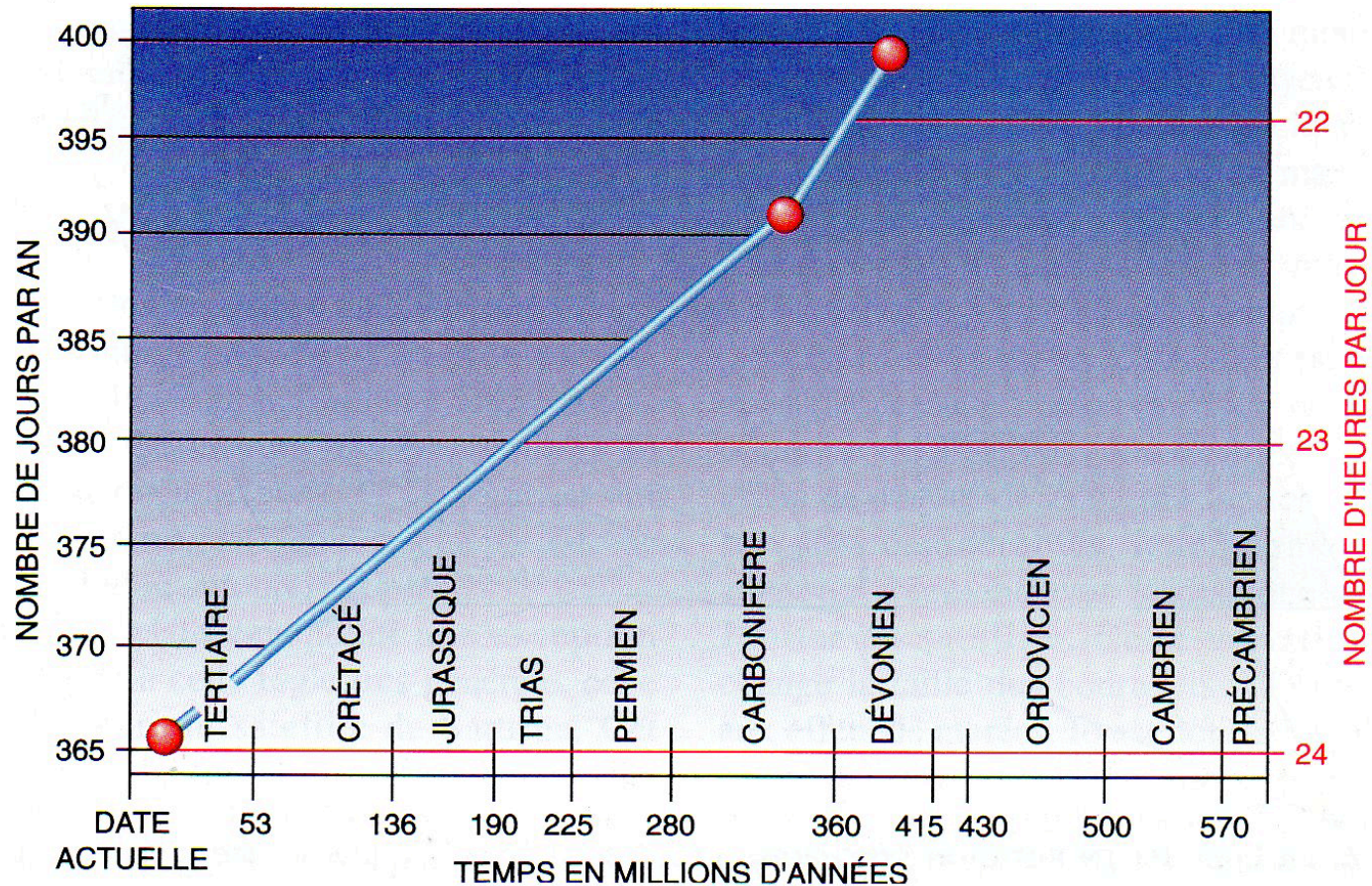
- Freinage de la rotation de la Terre sur elle-même (→ la durée du jour augmente)
- La lune s'éloigne de la Terre de 3.8 cm par an



Influence des marées sur le couple Terre-Lune

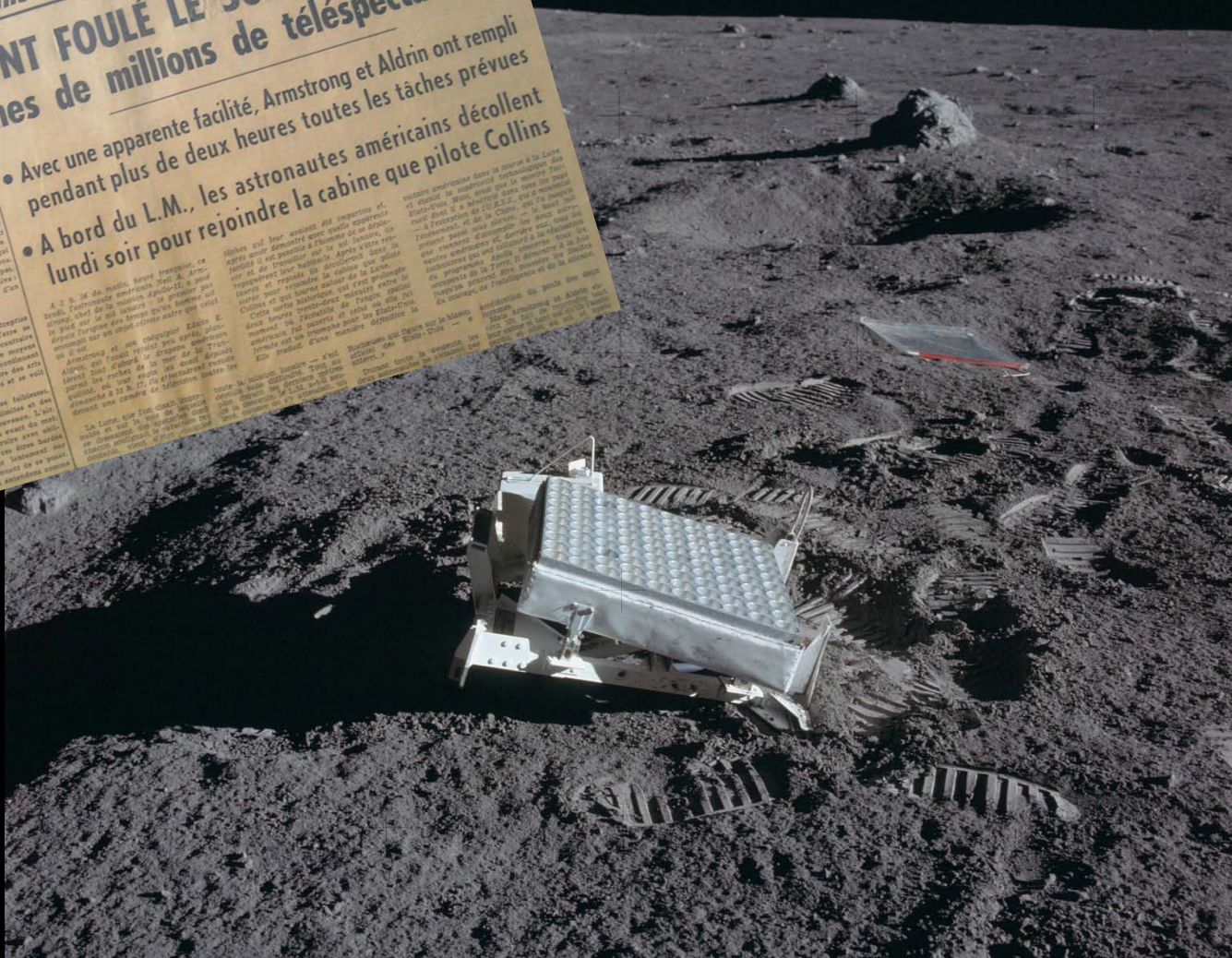


Il y a 350 millions d'années, la durée du jour était de 22 heures



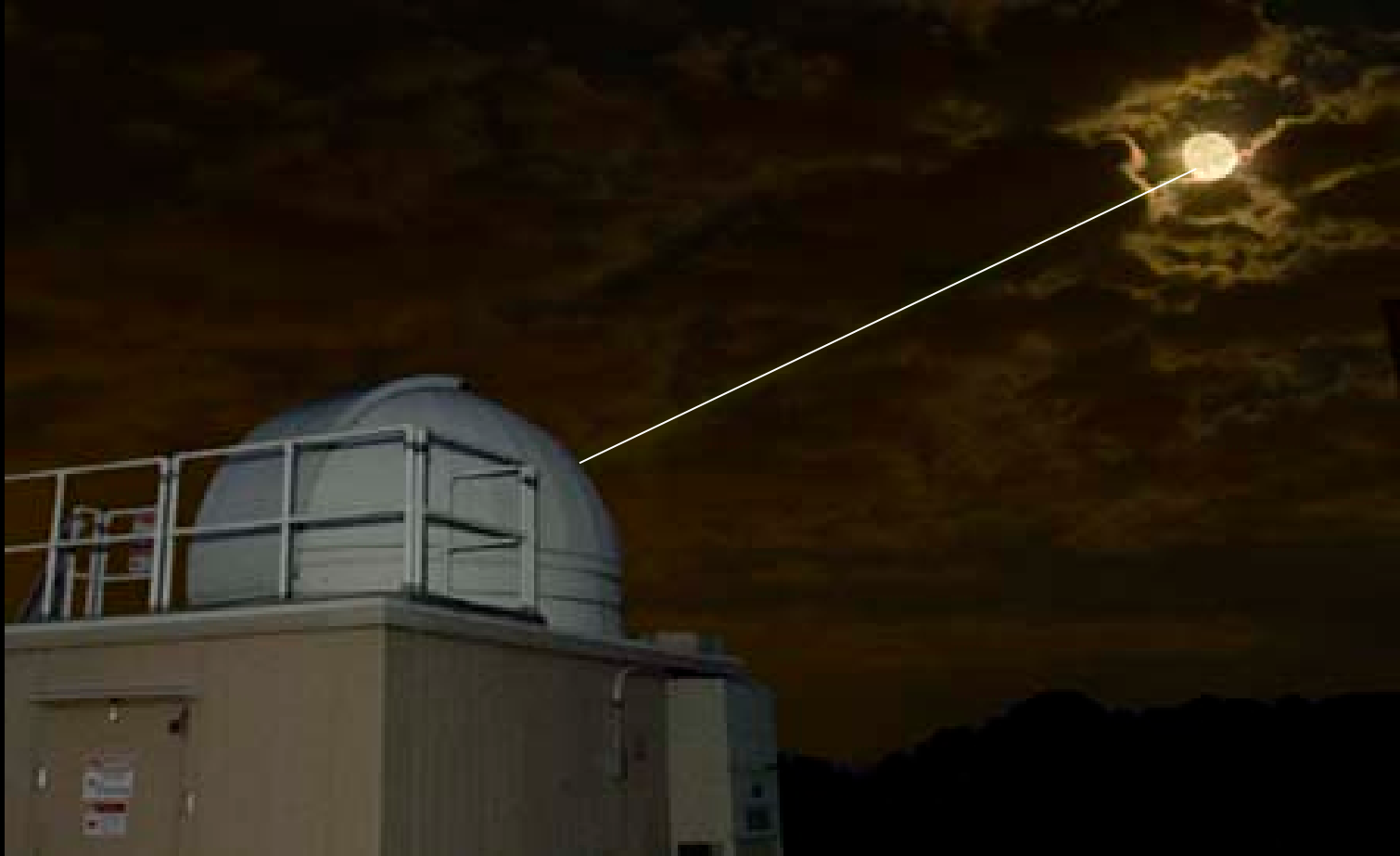


Missions Apollo sur la Lune

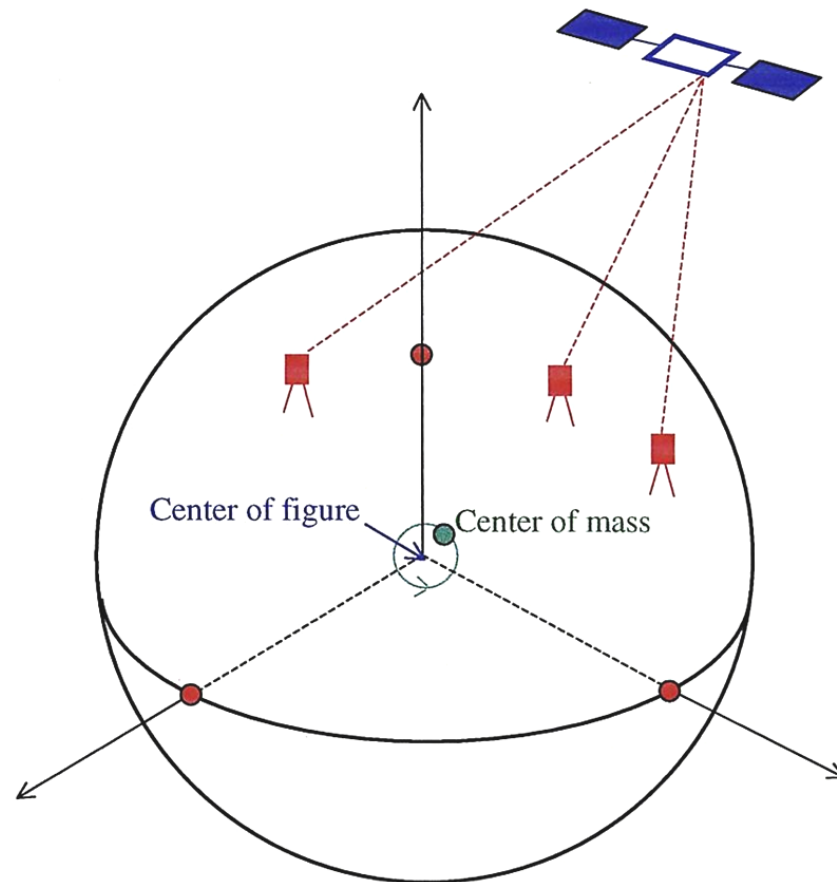


Tirs au Laser sur la Lune

→ La lune s'éloigne de la terre de 3.8 cm par an



Les mouvements du centre de masse de la Terre



Mouvement du centre de masse de la Terre

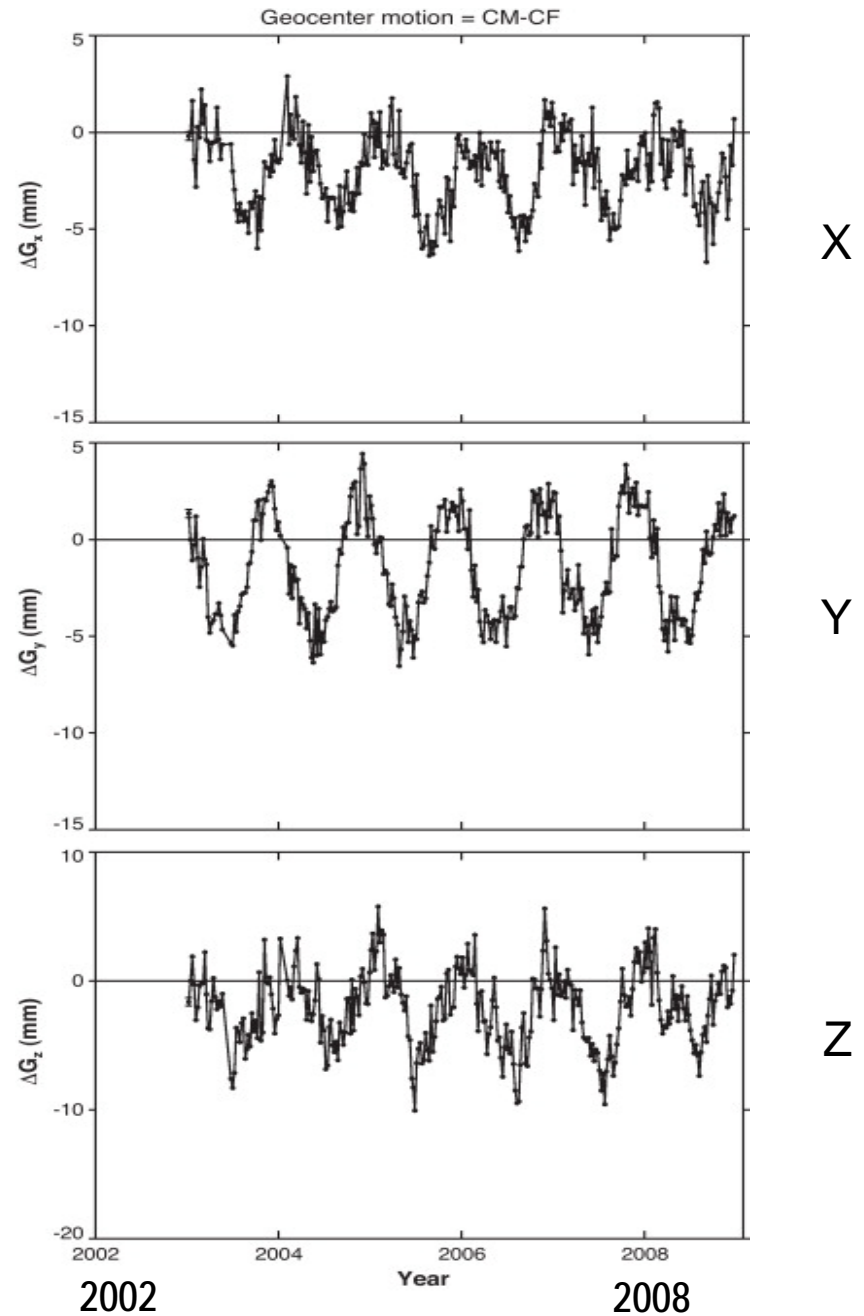
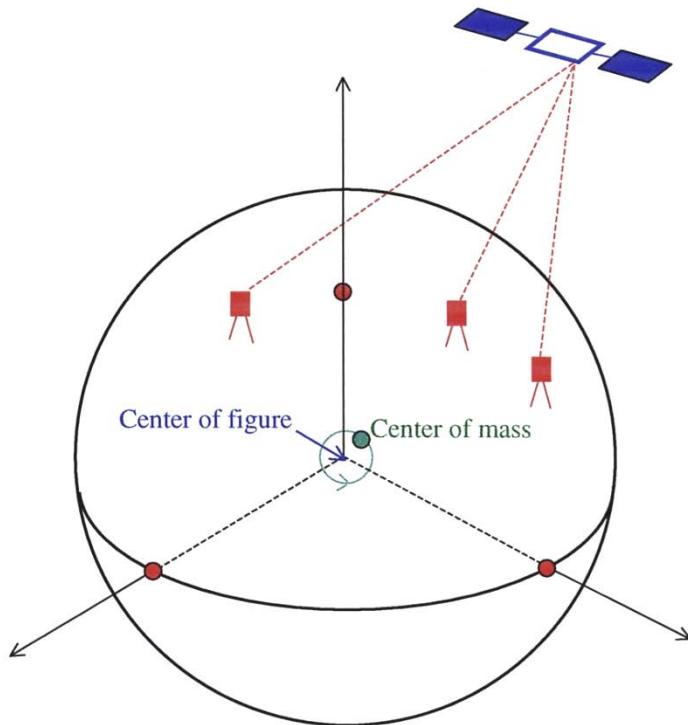


Dans un repère lié
à la Terre solide

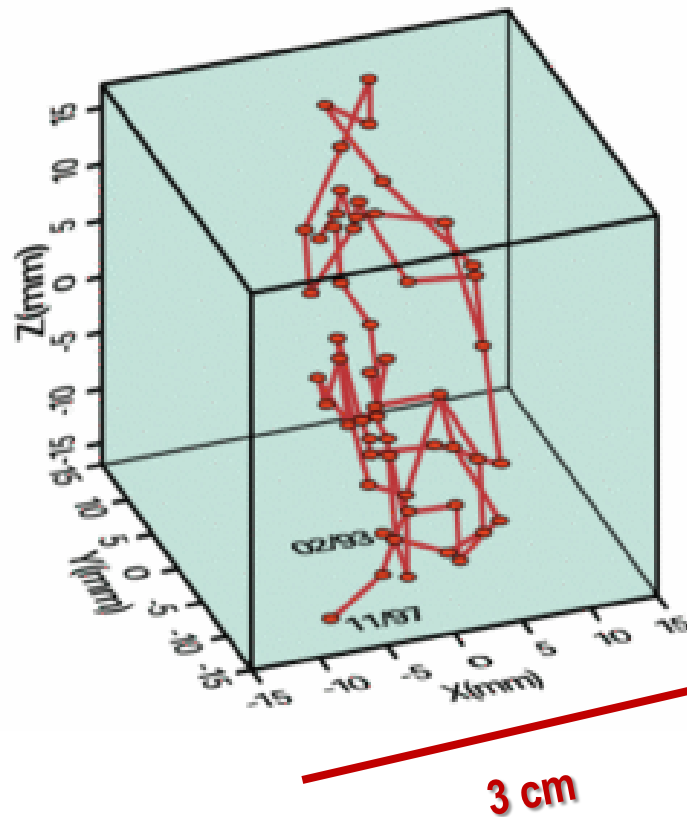


Vu du satellite

Mouvement saisonnier du centre de masse de la Terre

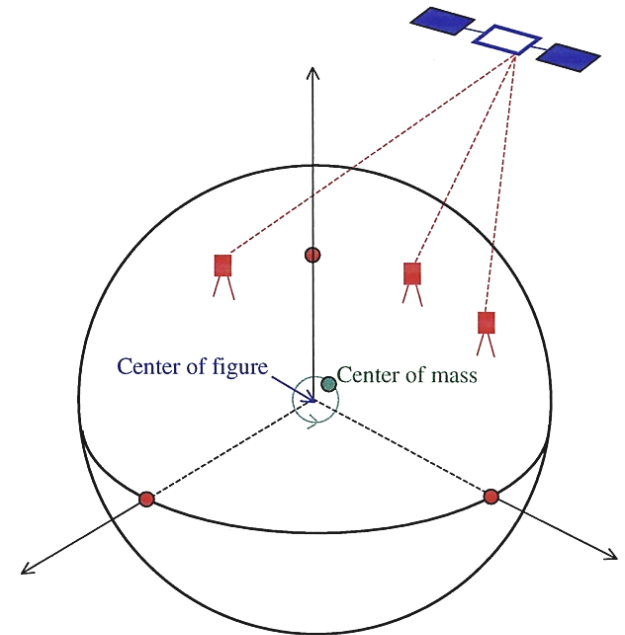


Les déplacements non saisonniers du centre de masse de la Terre entre février 1993 et novembre 1997



Le système international de référence terrestre (International Reference Frame –ITRF–)

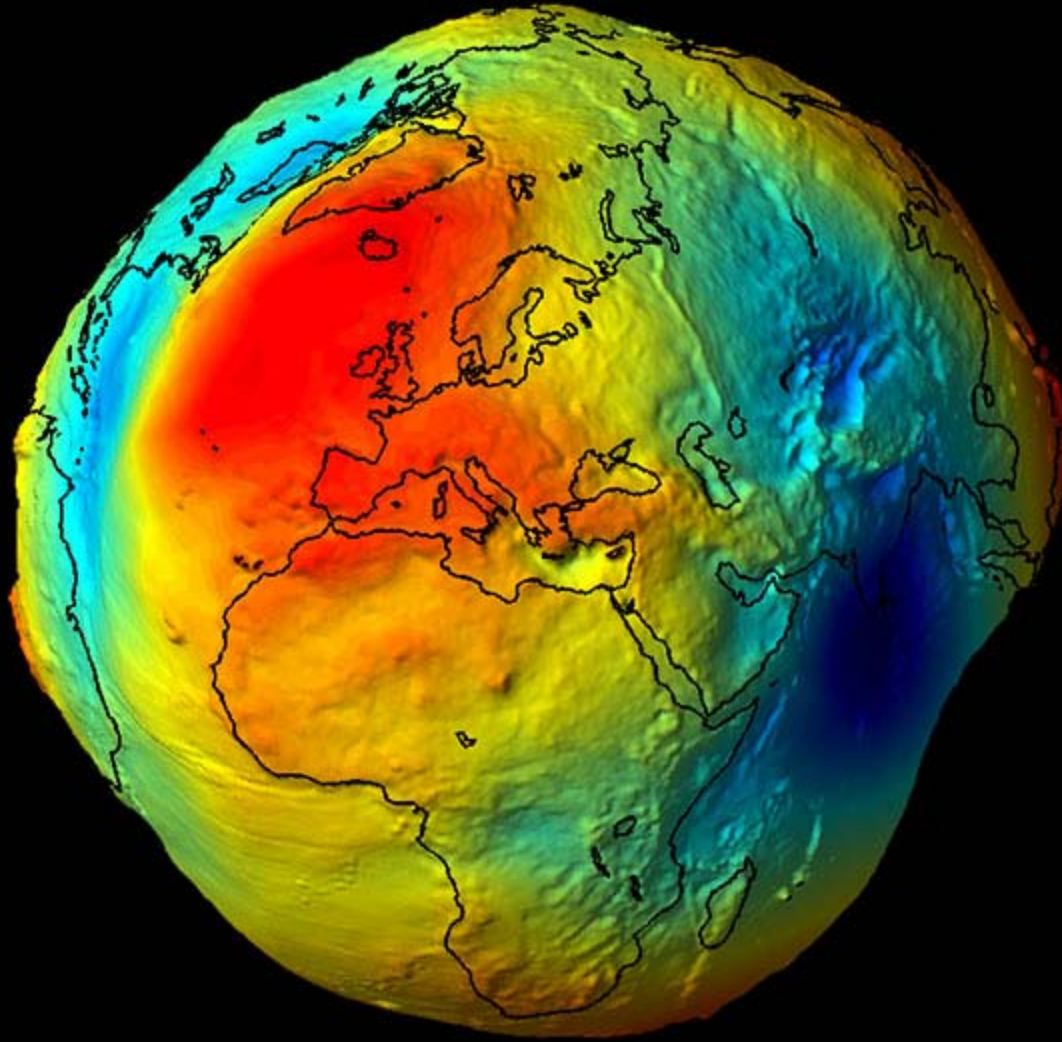
- Fixe par rapport à la Terre et tourne avec la Terre
- Origine : centre de figure de la Terre
- Axe z : dirigé vers le pôle moyen en 1900
- Axe x: intersection entre l'équateur et le méridien de Greenwich
- Il relie la Terre et le mouvement du satellite (calculé dans un repère inertiel centré au centre de masse de la Terre) via les mesures de poursuite
- Permet la détermination des **positions** et des **vitesses des stations géodésiques** ainsi que des paramètres de la **rotation terrestre** et du mouvement du **centre de masse de la Terre**



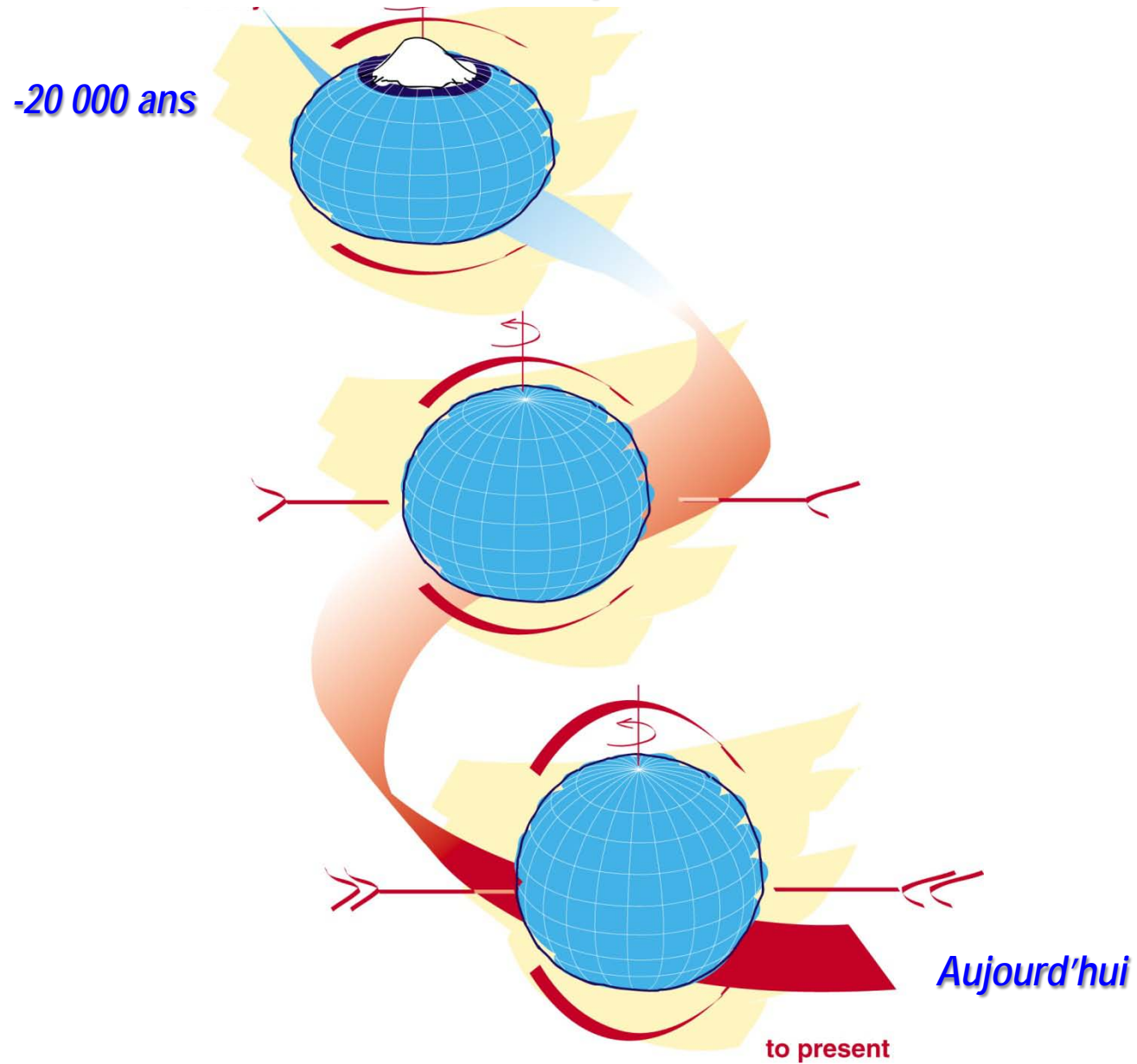
Pourquoi a-t-on besoin d'un système de référence?

- Détermination précise des orbites des satellites:
 - GPS/GNSS (Global Navigation Satellite Systems)
 - Autres missions spatiales pour l'océanographie, la gravimétrie, etc.
- Applications en sciences de la Terre
 - Rotation de la Terre
 - Déformations du globe terrestre, tectonique, etc.
 - Etude du niveau de la mer
 - ...
- Autres applications
 - Navigation: Aviation, navigation terrestre et marine
 - Positionnement

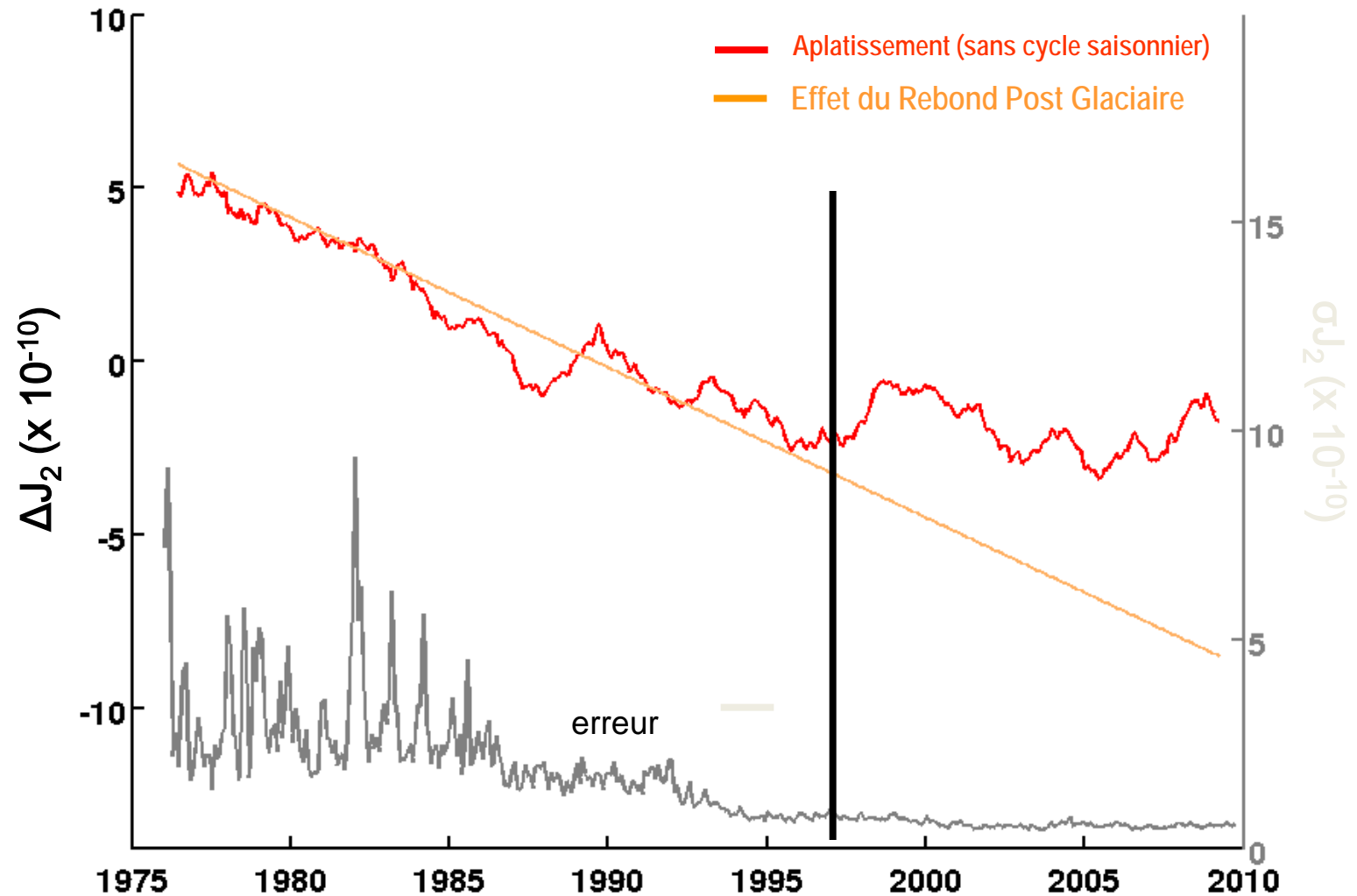
Les variations temporelles du géoïde

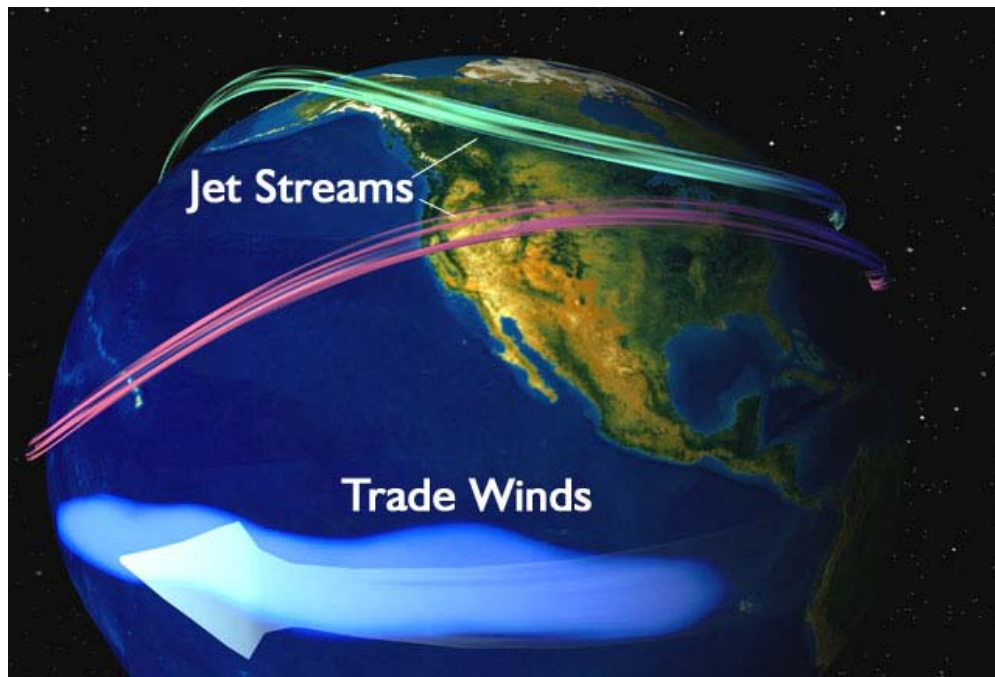


Diminution séculaire de l'aplatissement de la Terre



Variations de l'aplatissement de la Terre (coefficient C_{20} du champ de gravité) par analyse des orbites des satellites 'Laser'



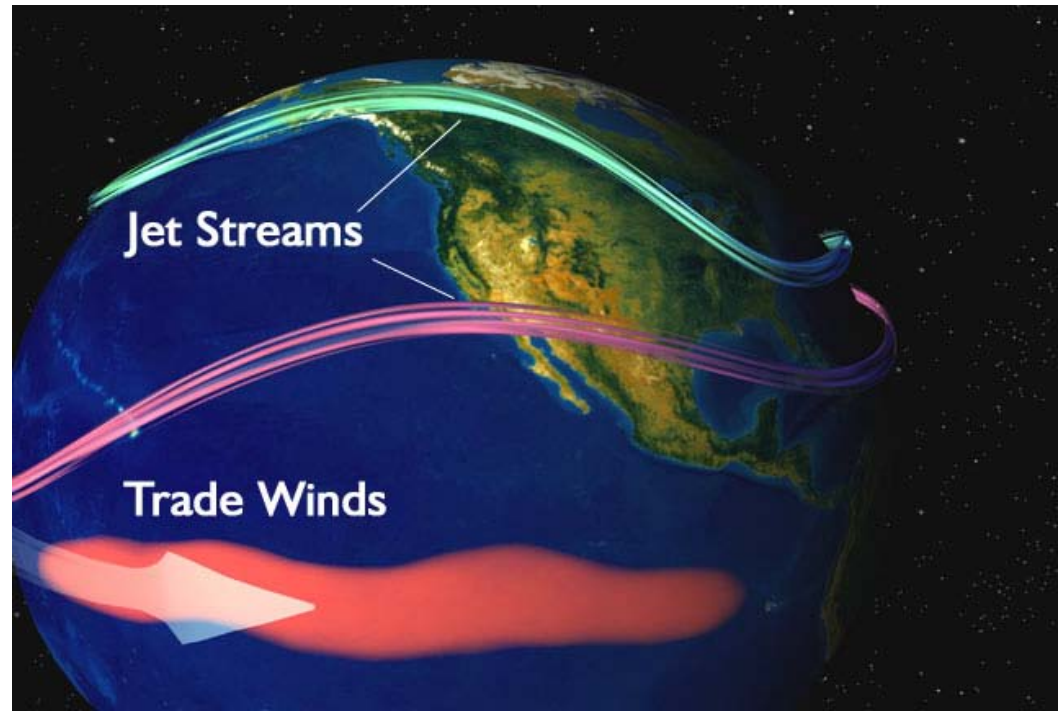


Situation normale

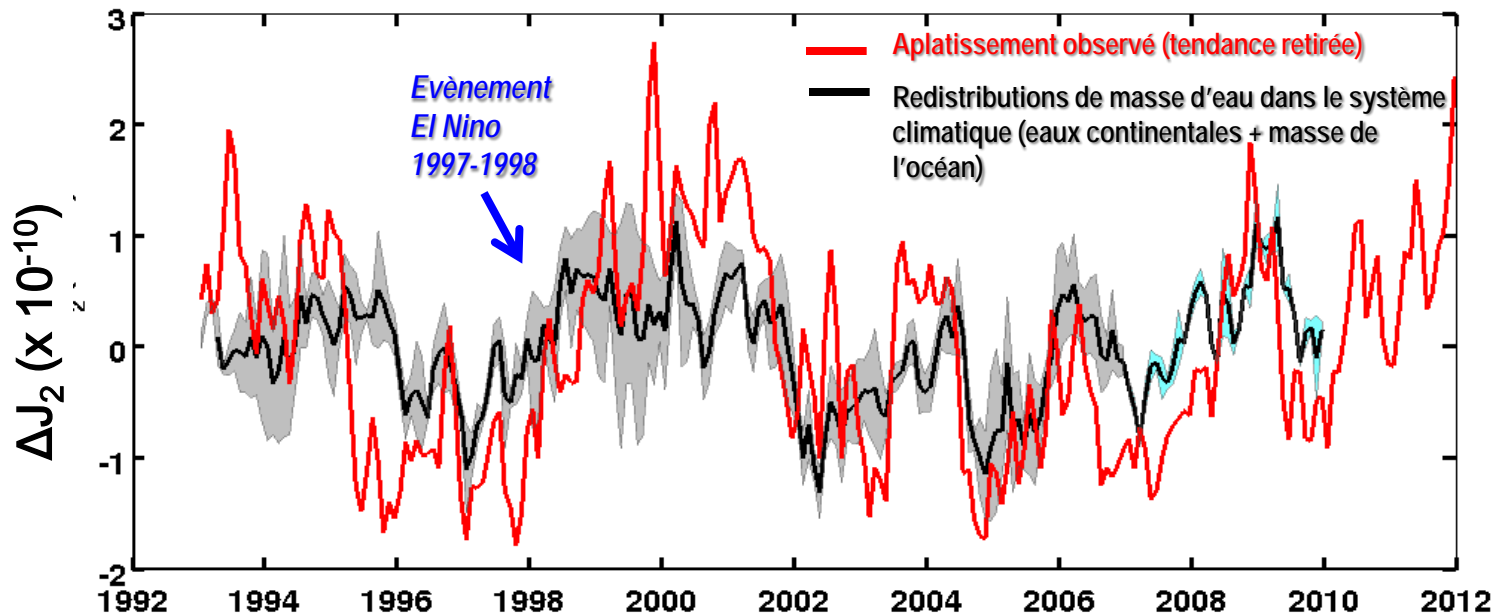
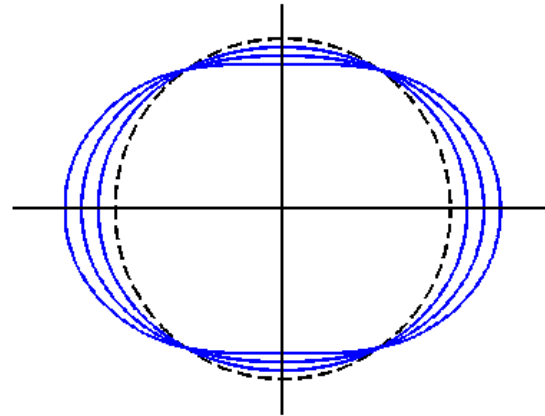
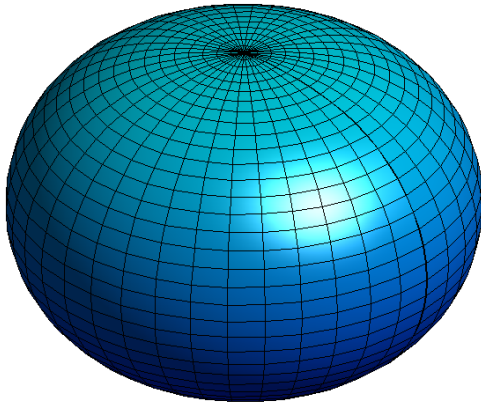
El Nino →

- Plus de précipitations sur le Pacifique tropical
- Moins d'eau dans le bassin amazonien

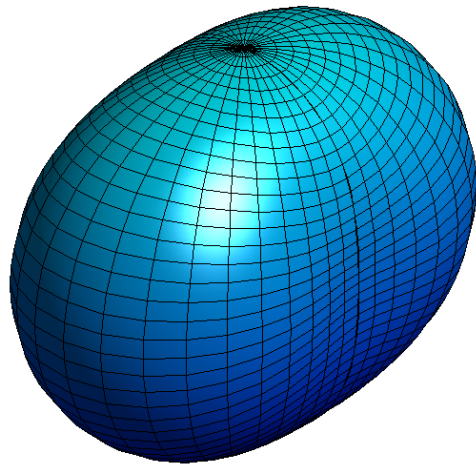
Développement d'un El Nino



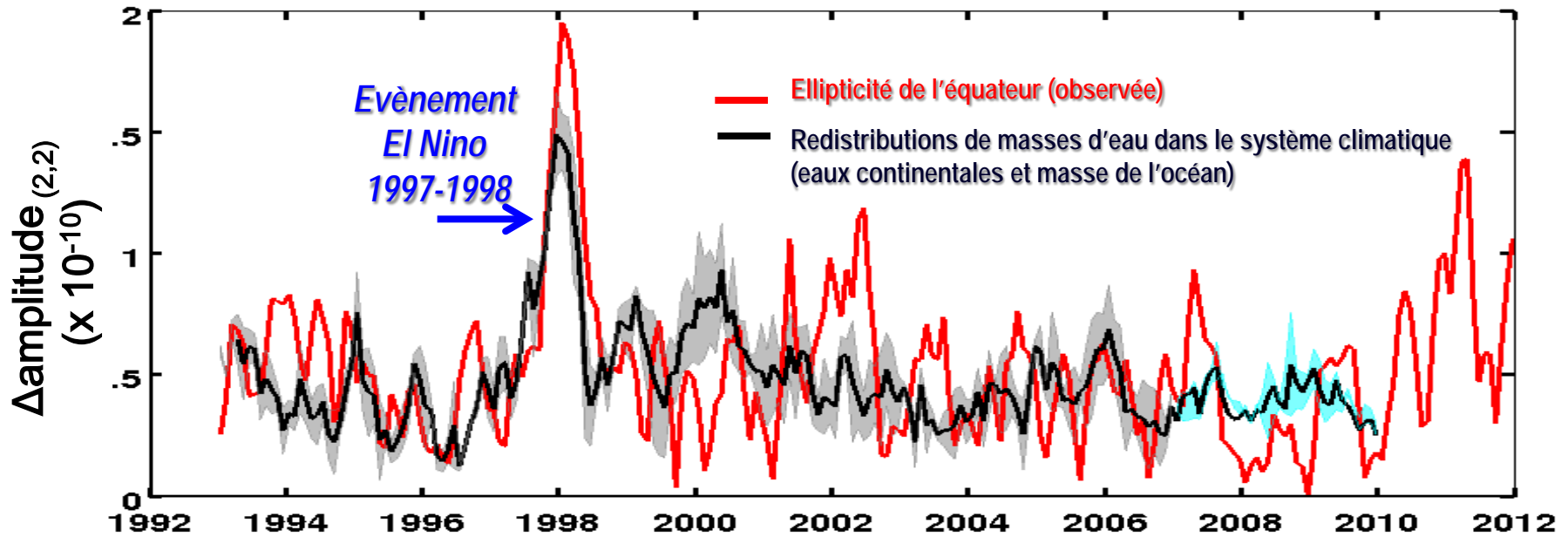
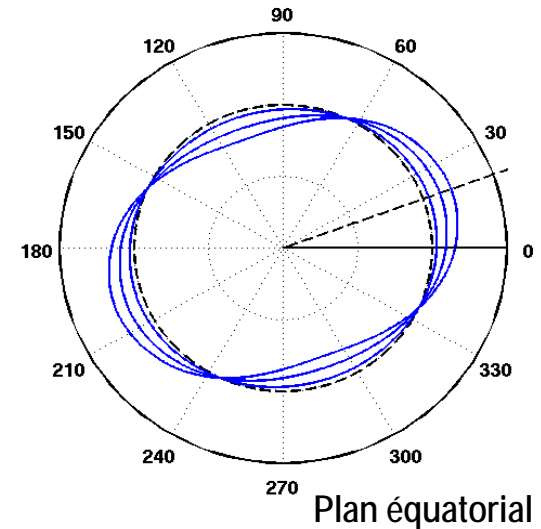
Variabilité interannuelle de l'aplatissement (1993-2012)



Variabilité interannuelle de l'ellipticité de l'équateur



Ellipticité de l'équateur

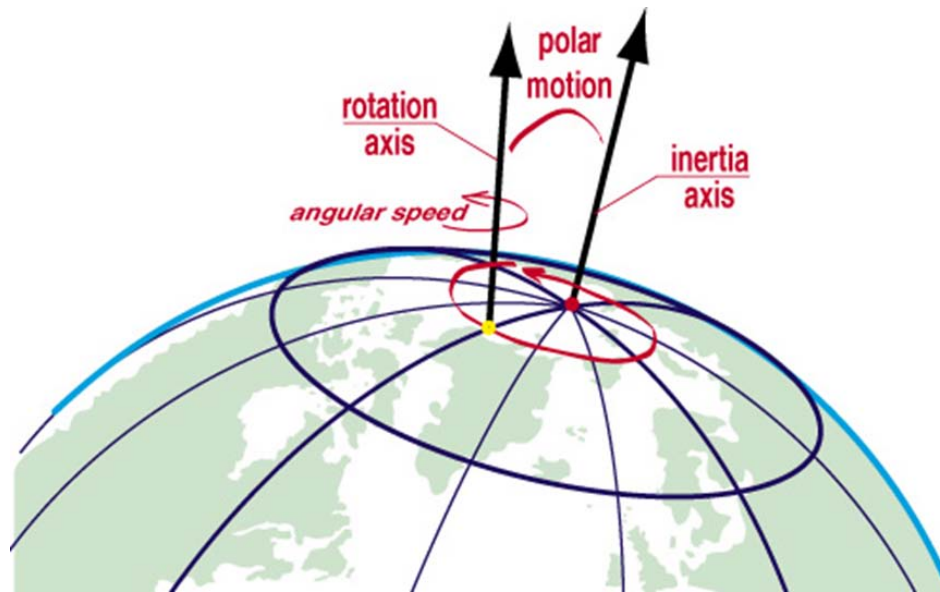


Variations temporelles de la gravité à haute résolution et redistributions des masses dans le système climatique

→ *Mission de gravimétrie spatiale GRACE (2002-)*



Et pour en savoir plus sur la rotation de la Terre...
dans un instant, conférence de Véronique Dehant





Merci de votre attention