

## Ecole G2 2003 - Forcalquier

### Apports de la Géodésie Spatiale à différentes échelles spatio-temporelles

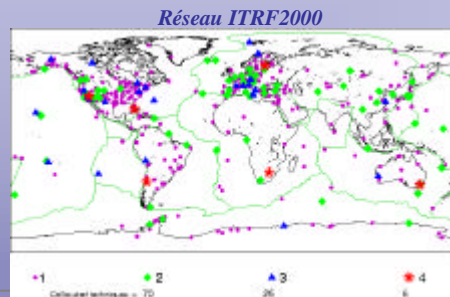
- Systèmes de référence d'espace et de temps
  - Structure interne de la planète via son champ de gravité et sa rotation
  - Transferts de masses (circulation des couches fluides)
  - Déformations de surface, horizontales et verticales
- 
- Méthodes (mécanique céleste, théories de la rotation, représentation des champs)
  - Mesures : techniques spatiales

### Géodésie spatiale et repères de référence

Etude de la planète Terre dans sa globalité, nécessite 3 aspects :

- Recherche fondamentale
- Instrumentation au sol et embarquée
- Service (observation et analyse)

(nécessité de combiner les différentes techniques) :



technique	type de mesure	référentiel	points forts
VLBI	différence de distances optiques	ICRF ITRF	pôle céleste, facteur d'échelle, rotation de la Terre, lien ICRF et ITRF
télémétrie laser Lune	distance	ICRF ITRF Sys. Solaire	lien systèmes dynamique & terrestre, géocentre...
télémétrie laser satellites	distance	ITRF	facteur d'échelle, champ de gravité, géocentre, mouvements du pôle
GPS	différence de distances	ITRF	densification régionale, facilité d'accès, mouvements du pôle
DORIS	différence de distances	ITRF	couverture homogène, mouvements du pôle

Matérialisation :

**ITRF** : stations au sol

→ SLR, GPS, DORIS, VLBI

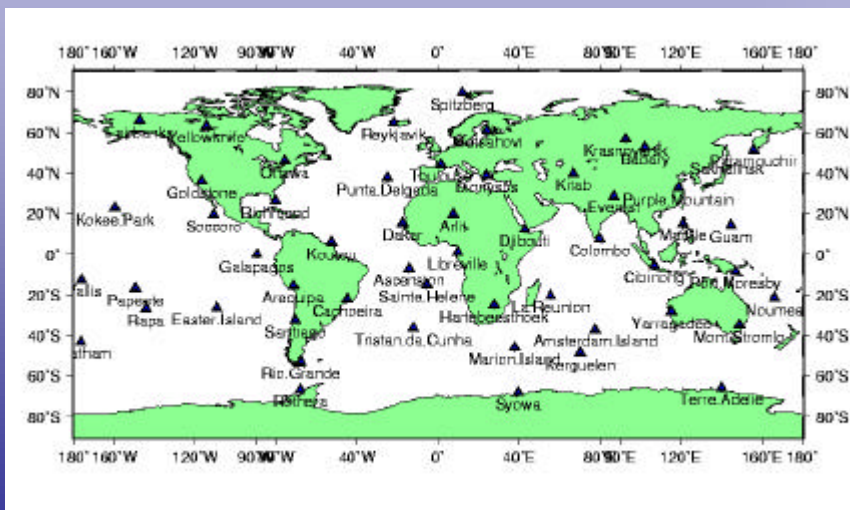
**ICRF** : radiosources extragalactiq.

→ VLBI

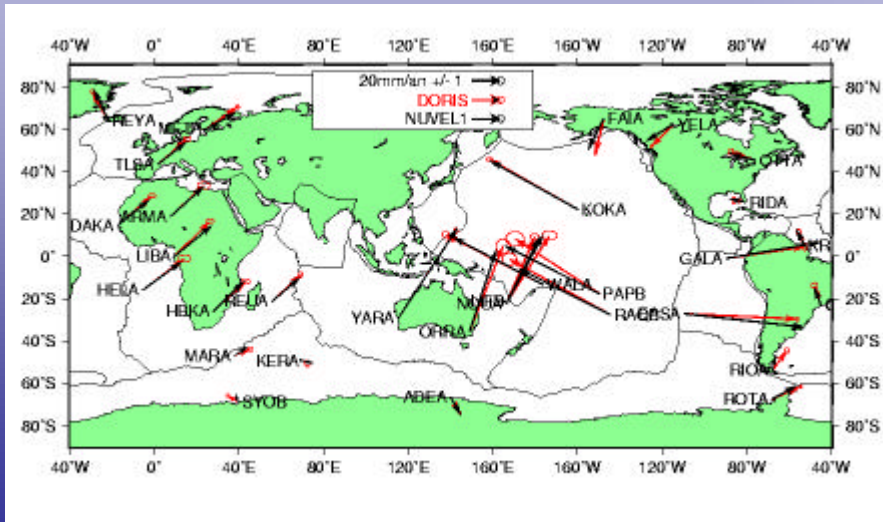
## Les dispositifs observationnels

- Réseaux internationaux
  - DORIS (54 sites): CNES, IGN
  - Participation à ILRS (laser), IGS (GPS), IVS (VLBI)
  - Participation à GGP (gravimètres supraconducteurs)
- Réseaux régionaux
  - RGP (GPS): IGN & associés
  - REGAL (GPS): CNRS & associés
  - SONEL (marégraphes): SHOM, IGN
- Campagnes
  - GPS => déformations
  - Etalonnage d'altimètres spatiaux en Méditerranée
  - Gravimétrie absolue
  - Multi-techniques => co-localisation

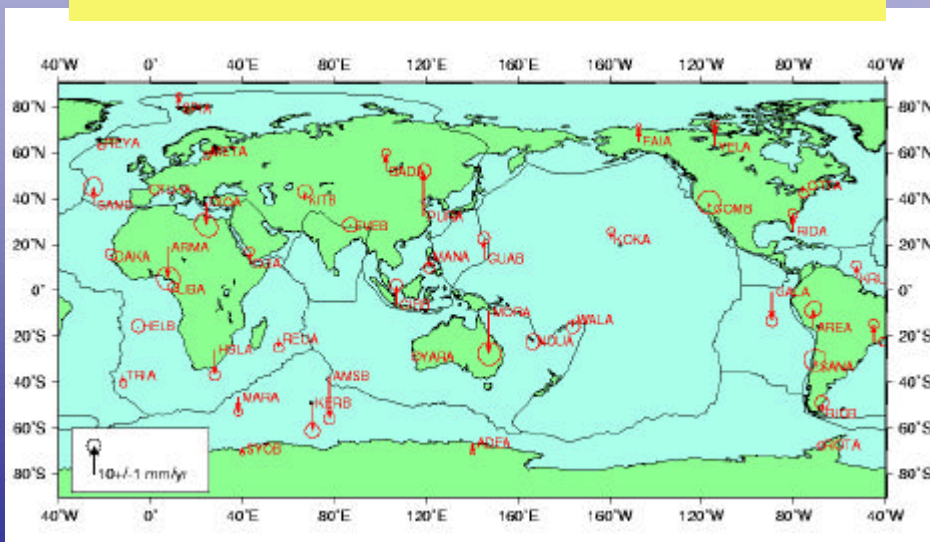
## Réseau International DORIS

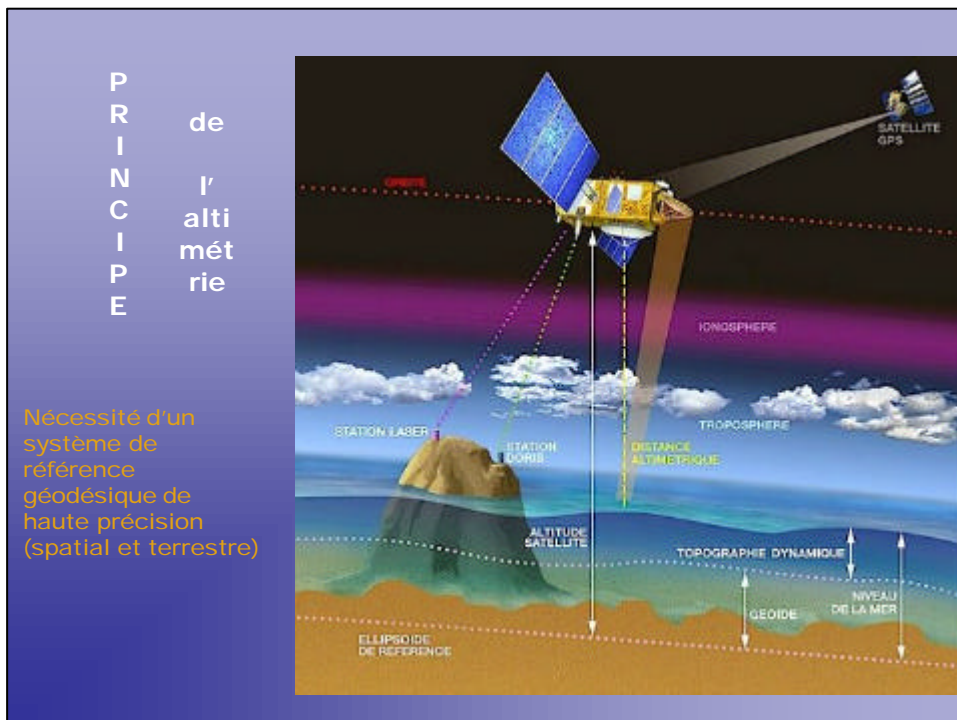
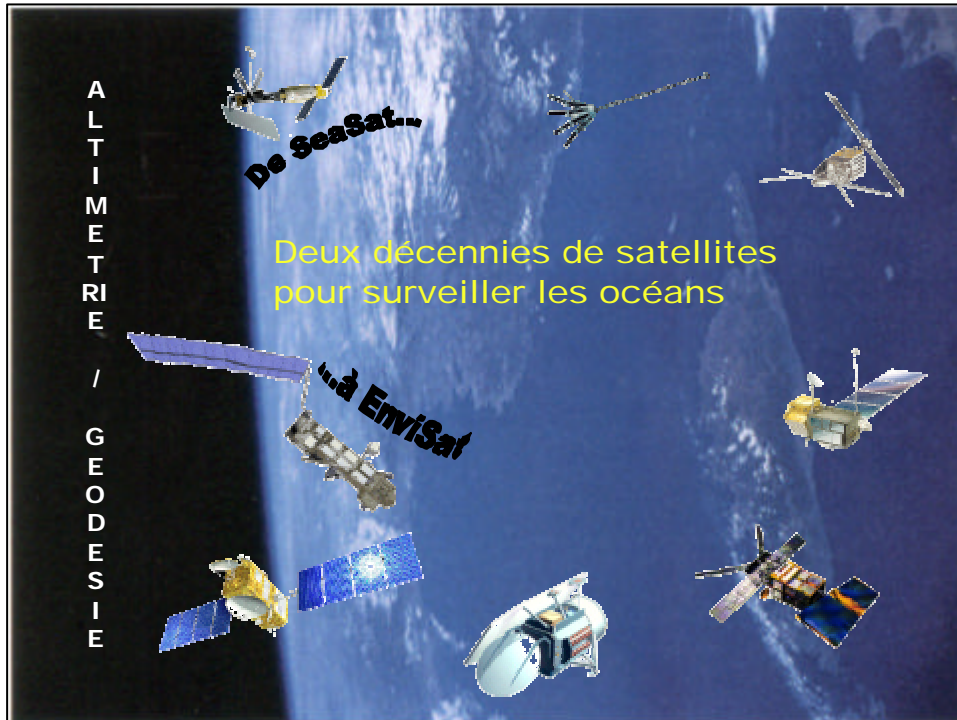


## Vitesses DORIS par rapport au modèle NUVEL1



## Mouvements verticaux DORIS



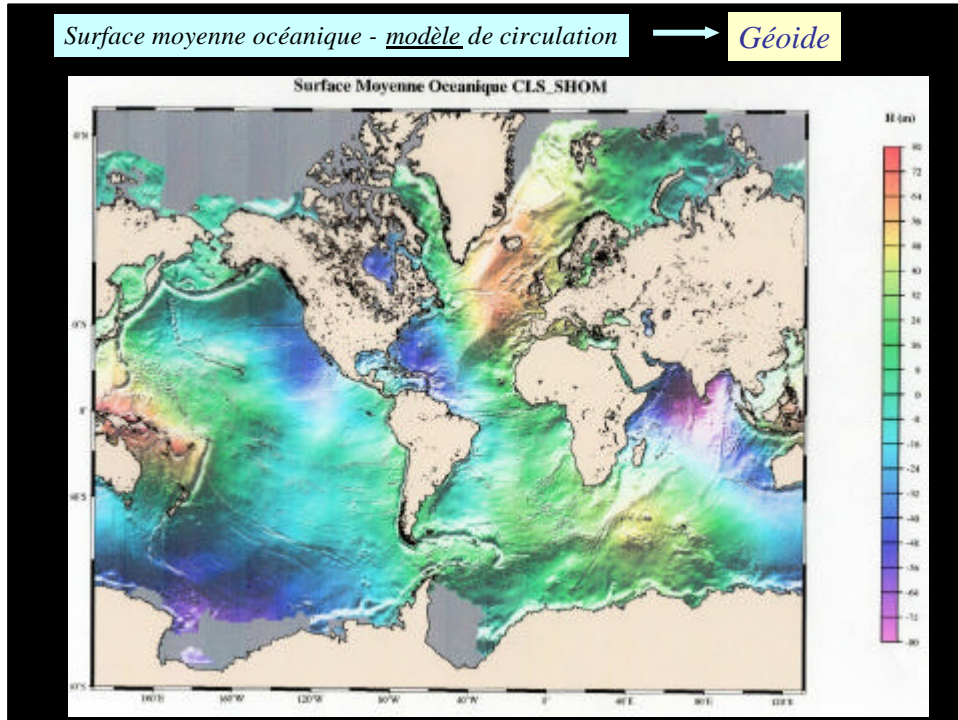




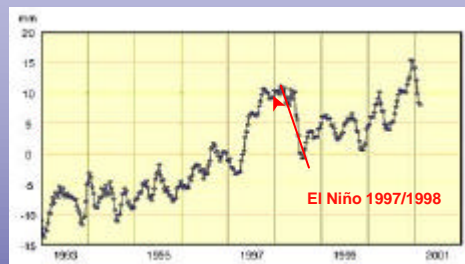
Surface moyenne océanique - modèle de circulation



Géοide

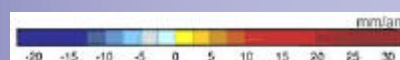
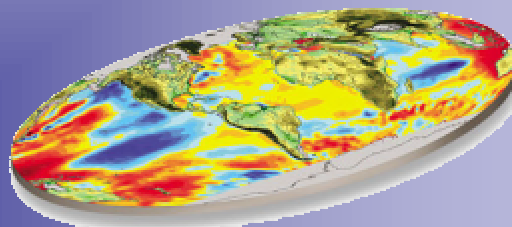


### Variations du Niveau Moyen des Mers

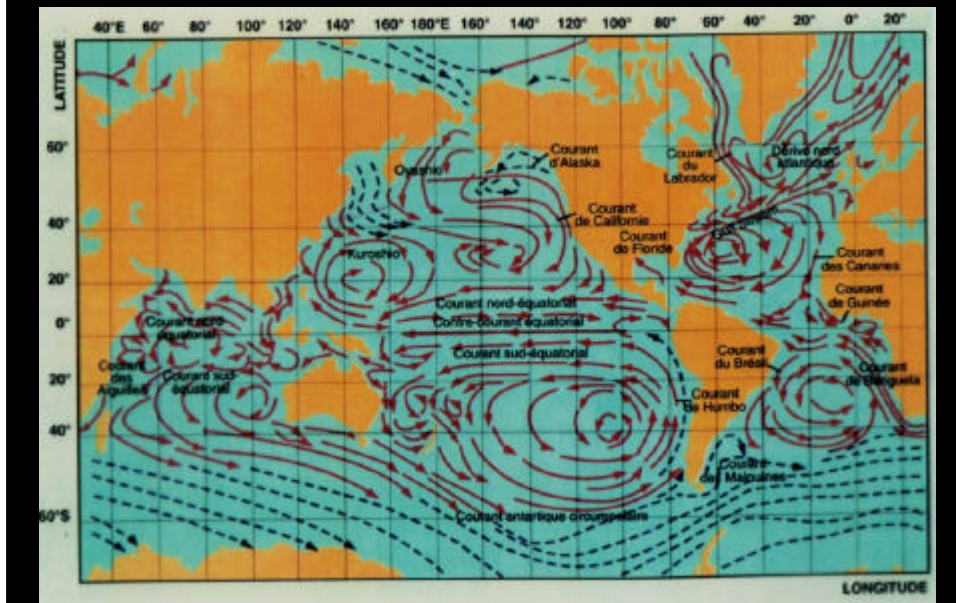


Une augmentation globale de 2.5 mm/an

Mais pas partout...



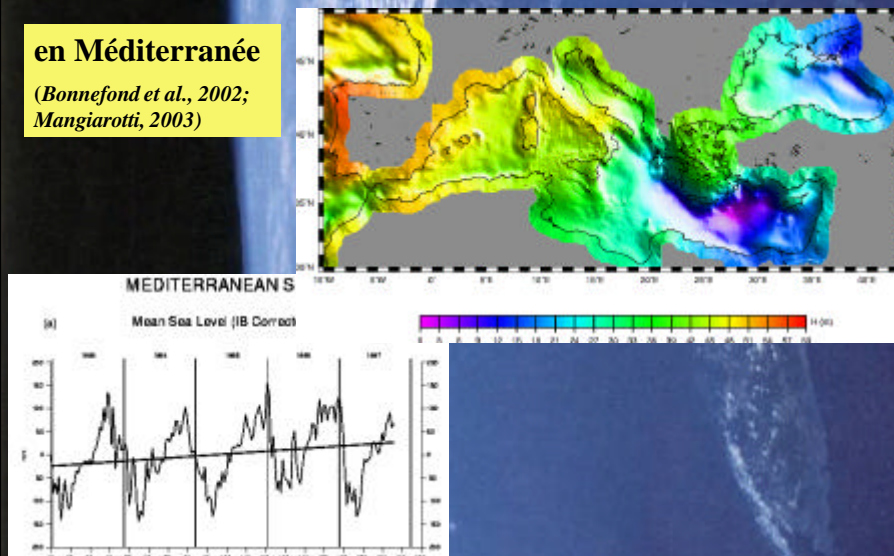
## La circulation océanique



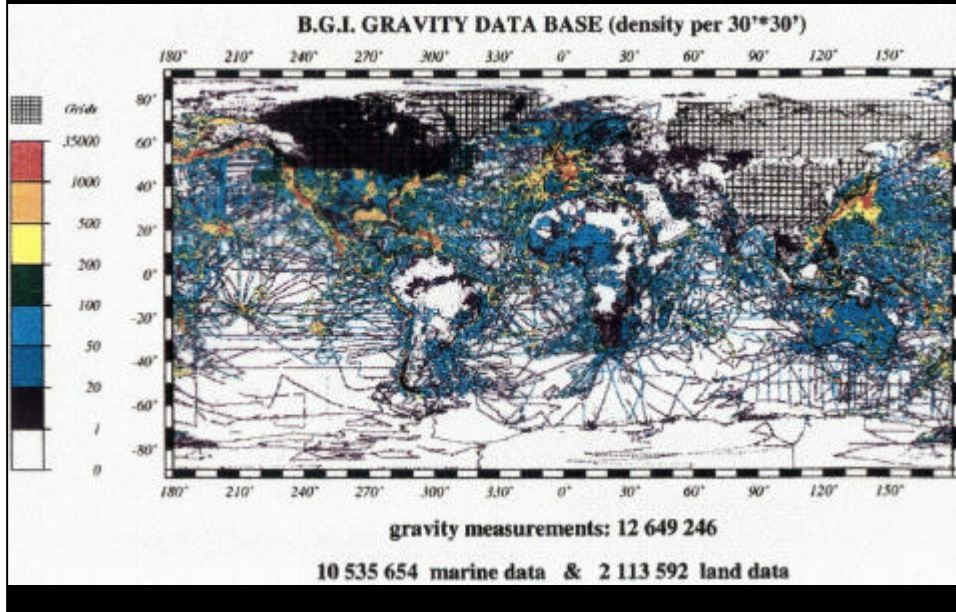
## Niveau moyen et évolution temporelle

en Méditerranée

(Bonfond et al., 2002;  
Mangiarotti, 2003)



LES MESURES DE PESANTEUR EN SURFACE (continents, océans)



## La dynamique orbitale

➤ Contexte : **Mouvement orbital perturbé**

Définition : amélioration en parallèle

- des modèles d'orbite : méthodes de **mécanique céleste**
- des modèles de forces : détermination de paramètres **géodynamiques**

### 1. Le problème «direct» : **extrapolation d'orbite**

intégration des équations de la dynamique à partir

- 1) d'un modèle de force donné
- 2) de conditions initiales

$$\frac{d\mathbf{E}}{dt} = \mathbf{SM}(\mathbf{E}, \Sigma)$$
$$\mathbf{E}(t_0) =$$

### 2. Le problème «inverse» : **restitution d'orbite**

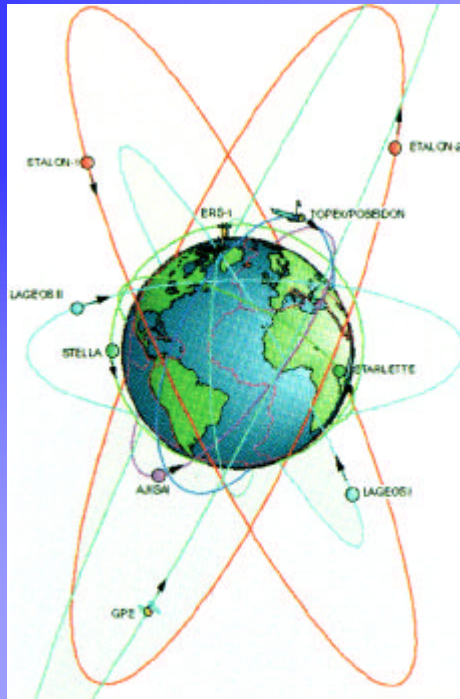
estimation de paramètres  $\Sigma$  basée sur les observations





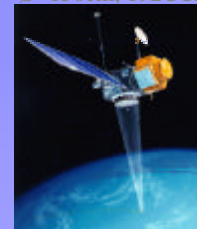
C  
o  
n  
s  
t  
e  
l  
l  
a  
t  
i  
o  
n

S  
A  
T  
E  
L  
L  
I  
T  
E  
S

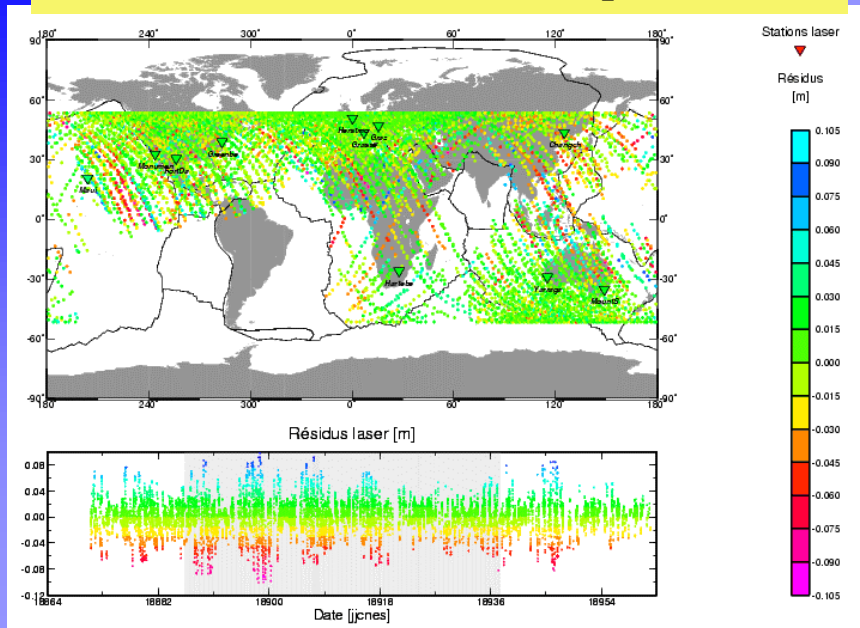


*Stella*  
Ø=24cm, 60CCR, 48kg

*TOPEX/Poseidon*  
Ø=150cm, 192CCR

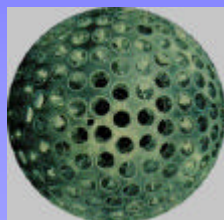


### O-C Laser LAGEOS-2, rms par station

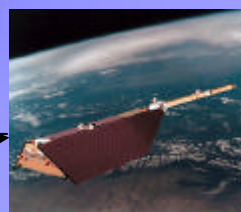


## Exemples de calcul d'orbite (2002)

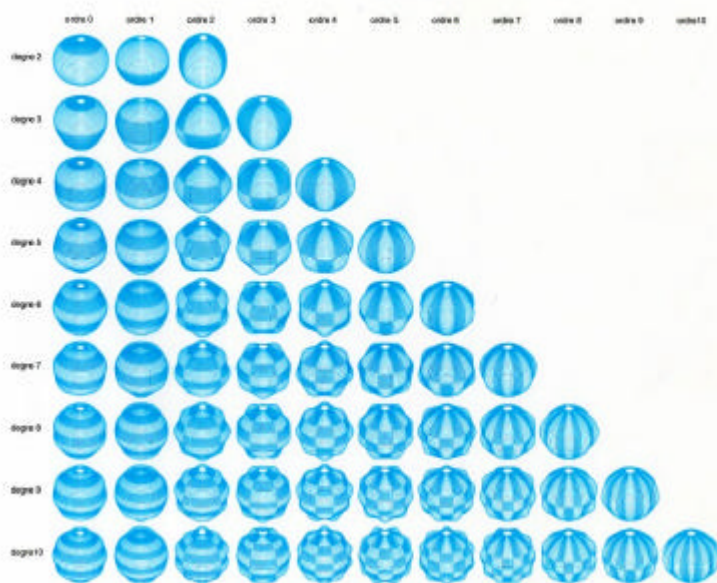
Satellite	Période couverte	Nbre d'arcs	RMS
LAGEOS-1	6/2/1980 à 12/12/2001	329	~2cm
LAGEOS-2	8/12/1992 à 12/12/2001	138	~2cm
STARLETTE	7/10/1983 à 18/3/2002	235	~6cm
STELLA	16/11/1993 à 2/11/2000	74	~7cm
AJISAI	23/9/1986 à 25/11/200	165	~8cm
T/P	8/3/1994 à 4/5/2002	91	~3cm
CHAMP	25/5/2001 à 21/12/2001	220	~15cm



Modèle Eigen S (avec mes. CHAMP)



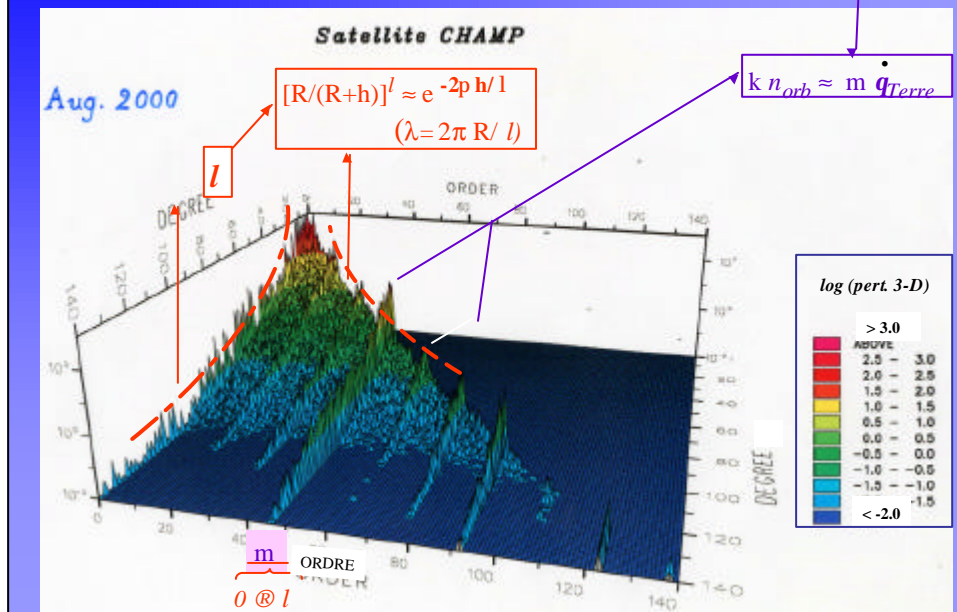
### Harmoniques sphériques : $P_m(\sin j) \cos m l$





## Perturbations gravitationnelles : une orbite filtre et résonne

Perturbations gravitationnelles en position (mètre), par degré et ordre des harmoniques



### Atténuation des Perturbations

vs

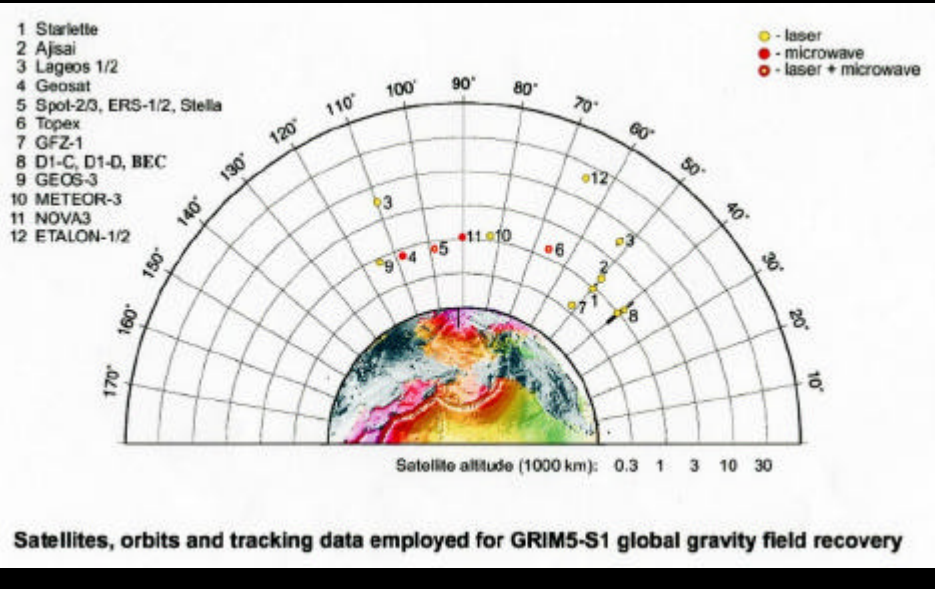
Taille des anomalies de gravité & Altitude du satellite

Altitude	res. = 2000 km	res. = 100 km	res. = 50 km
400 km	0.50	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-11}$
250 km	0.68	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$

(Atténuation relative à une perturbation de 20 000 km d'étendue)

Précision d'observation limitée

classes d'harmoniques préférentiellement déterminées par chaque satellite  
→ variété d'orbites



## Estimation de paramètres géodynamiques

- Forces gravitationnelles
  - Partie statique du champ de gravité
  - Marées terrestres
  - Marées océaniques
- Forces non gravitationnelles
  - Densité atmosphérique
  - ...



Les périodes caractéristiques associées aux phénomènes sont très différentes les unes des autres

$$J_n = J_{n\text{statique}} + \dot{J}_n(t-t_0) + J_{n\text{annuel}} + J_{n\text{semi-annuel}} + \dots$$

## Exemple: la masse de la Terre

Plusieurs possibilités :

- (Terre + Lune) - Lune : **peu précis**
- Expériences terrestres de mesures de gravité :

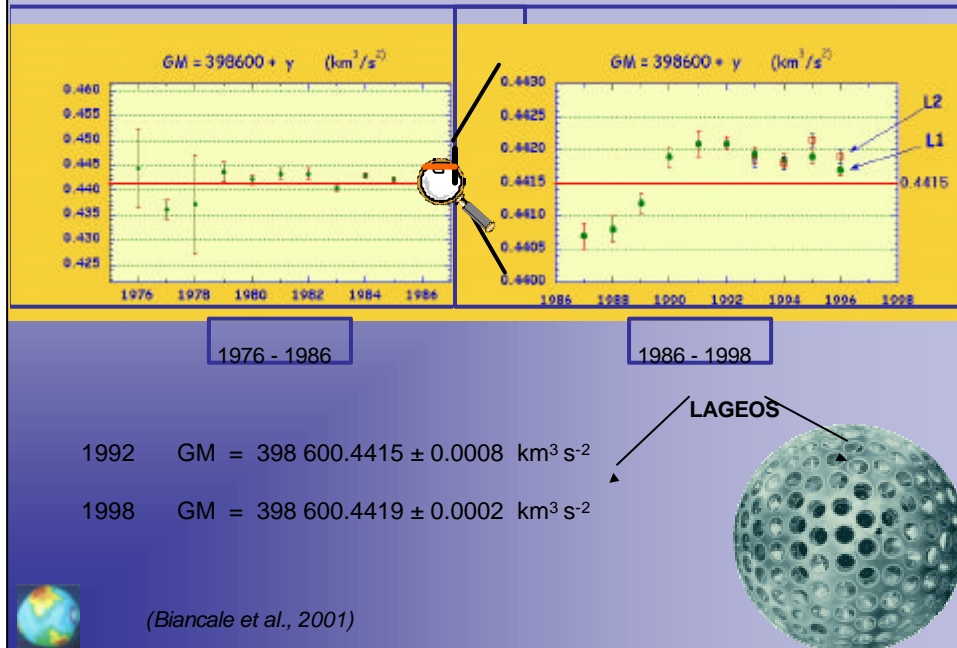
**modèle lié aux paramètres de l'ellipsoïde, mesure de G**

$$g_e \gg \frac{GM}{a^2} \left(1 + f - \frac{3}{2} c\right)$$

- Satellites géodésiques : **précis pour GM**



### Détermination de GM avec la télémétrie laser



## Modèles récents de géopotential produits dans le monde

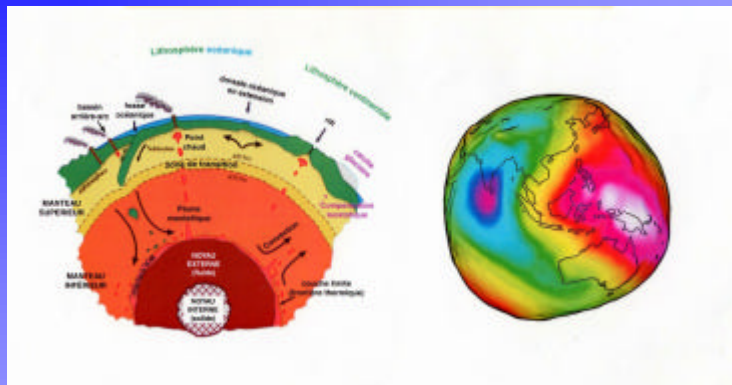
GEM	GSFC
JGM	CSR+GSFC
TEG	CSR
GRIM	GRGS+GFZ
EGM 96	GSFC+NIMA

Ex: EGM 96 : modèle combiné (sat.+ gravi + alti)  
(360,360) - résol.= 55 km (*théorique !!!*)

GRIM5 S1: solution satellites (99,95)  
C1: solution combinée (120,120)

*Remarque : résol. = 20 000 km / deg. max du modèle*

## Géopotential et Géophysique interne

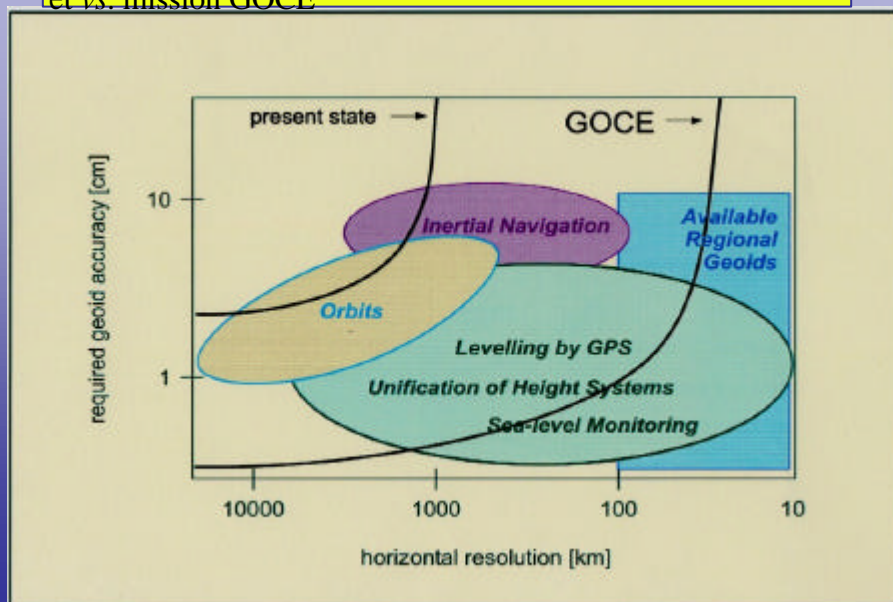


- **L'écorce terrestre** : couche superficielle dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 30 (cont.) et 10 km (océans), séparée du manteau (1ère discontinuité)
- **Manteau** : s'étend jusqu'à 2900 km env., 2ème discontin. puis noyau liquide
- **Noyau solide interne**, la graine, d'un rayon de 1250 km env.

## Précisions nécessaires aux études en Sciences de la Terre

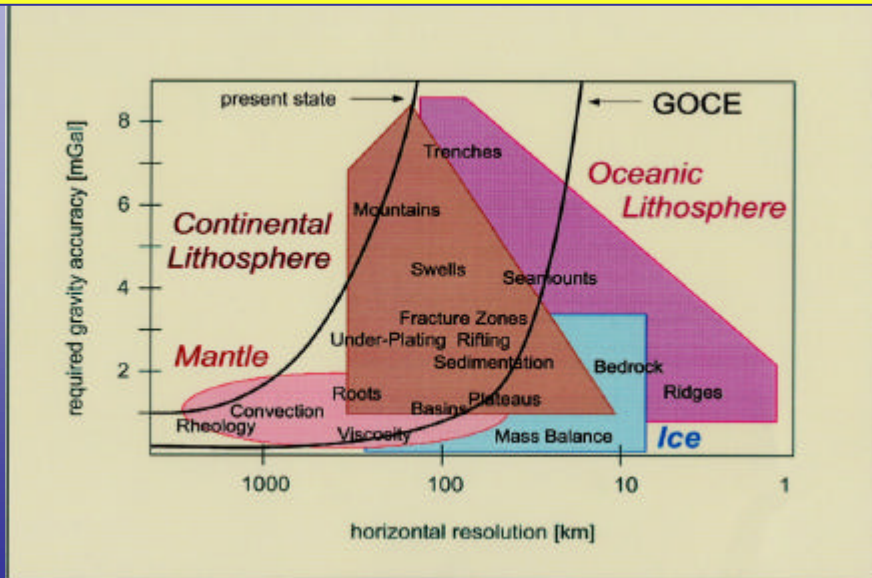
	Précision géoïde	Précision gravité	Résolution spatiale
Circulation océanique grande échelle	2 cm		60 - 250 km
échelle des bassins	< 1 cm		1000 km
Géodynamique			
lithosphère continentale		1-2 mgals	50-400 km
composition du manteau		1-2 mgals	100-5000 km
lithosphère océanique		5-10 mgals	100-200 km
processus de soulèvement		5-10 mgals	
Géodésie			
mouvements verticaux	2 cm	1-5 mgals	100-200 km
structures inférieures des calottes glaciaires		1-5 mgals	50-100 km
hauteur globale (mondiale)	< 5 cm	1-5 mgals	50-100 km

### Géoïde : Performances désirées en Géodésie vs. état actuel et vs. mission GOCE

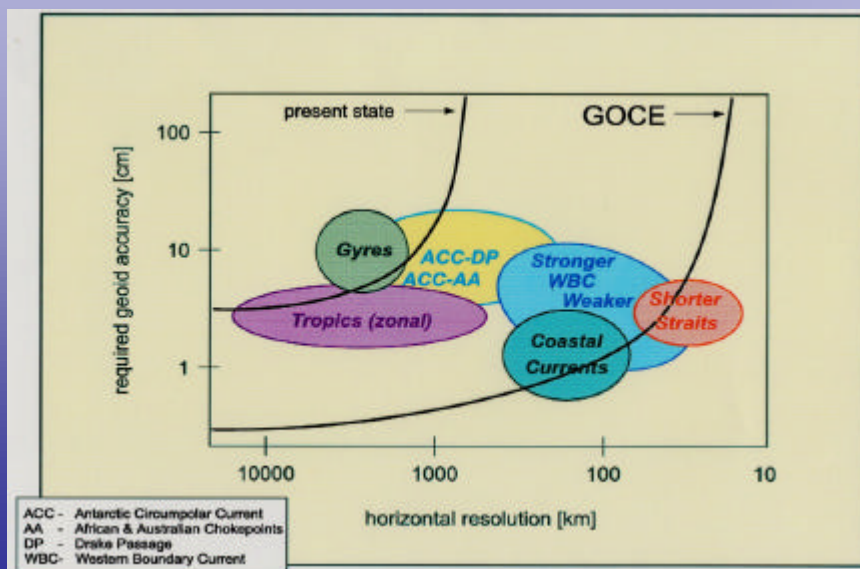




Gravité : Performances désirées en Géophysique vs. état actuel et vs. mission GOCE



Géotide : Performances désirées en Océanographie vs. état actuel et vs. mission GOCE



## Comment faire mieux ?

4 souhaits :



?

1. Orbite la plus basse possible
2. Suivi continu de la trajectoire
3. S'affranchir des forces de surface (... les mesurer)
4. Augmenter la sensibilité de la mesure par « différentiation »

CHAMP

GRACE

GOCE



2000

CHAMP



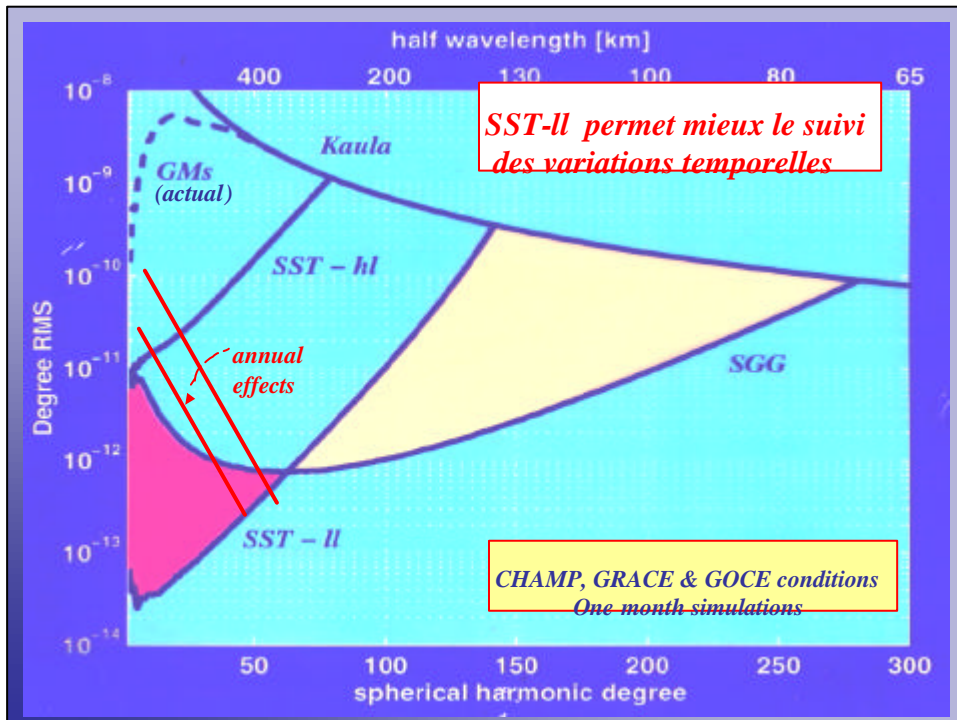
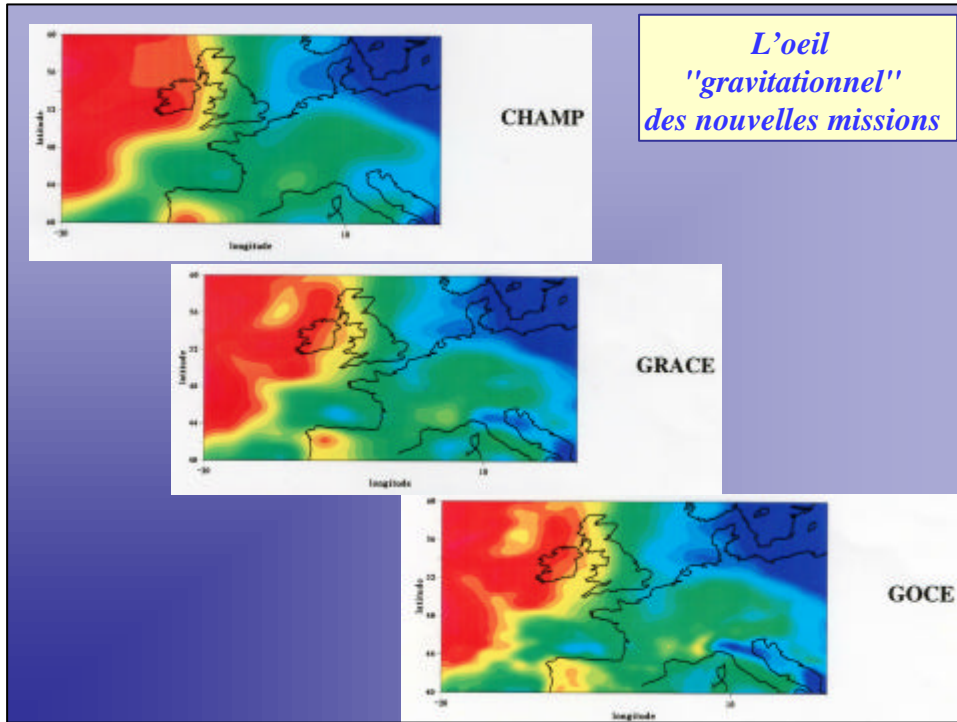
2002

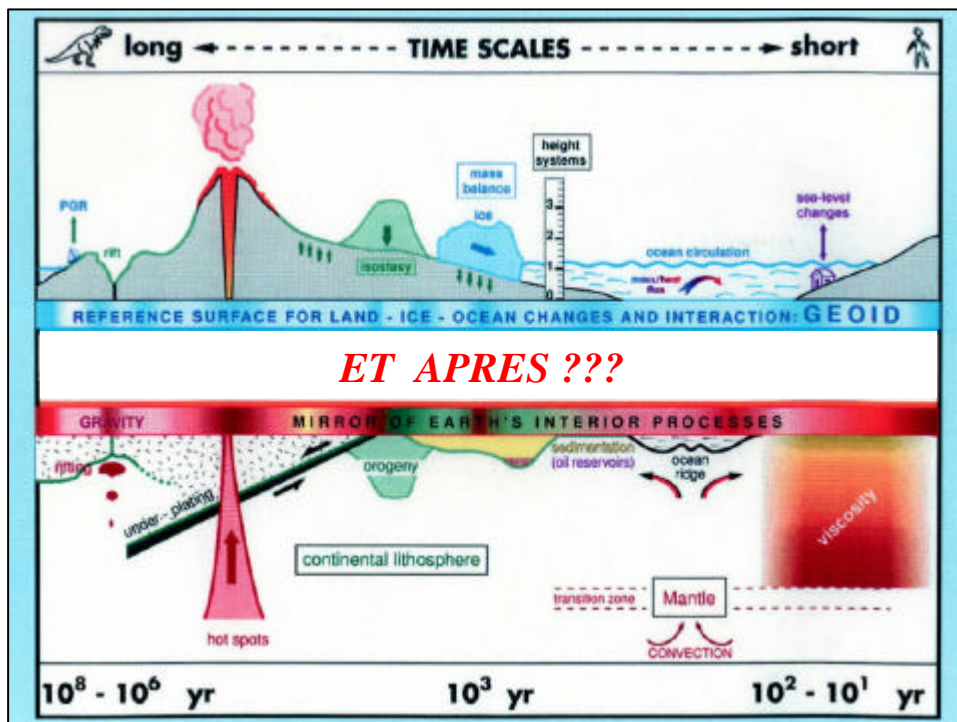
GRACE



2006

GOCE





LES MISSIONS CHAMP DE GRAVITE  
**CHAMP, GRACE, GOCE,**  
*... Et après ???*

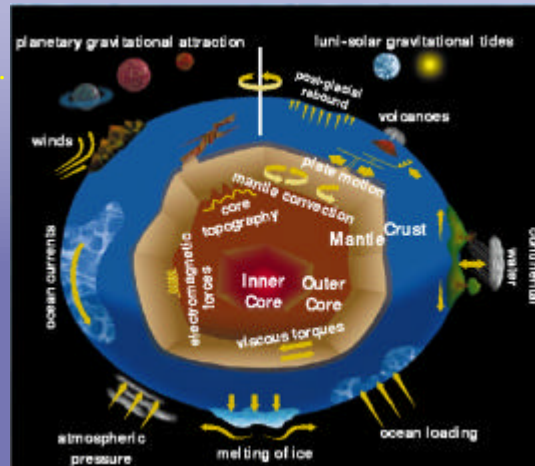
- Génération 0 Modèles classiques (GRIM, JGM, TEG,...)
- Génération 1 CHAMP : amélioration modèle moyen  
 variations temporelles (grandes  $\lambda$ )
- Génération 2 GRACE : amélioration/CHAMP  
 variations temporelles  $\lambda > 400$  km
- Génération 3 GOCE : modèle moyen haute résolution  $\leq 100$  km  
 (résolution "ultime" d'ici 2010 ?)
- Génération 4 Système opérationnel d'observation des variations  
 temporelles  $\lambda > 200$  km ?  
 SSI (Sat-Sat Interféro) ? SGGE (SGG Extended) ?

GRFO

## Variabilité Temporelle

- Masses en mouvement permanent dans le syst. Terre :

- Terre solide
- Atmosphère
- Hydrosphère
  - Océans
  - Glaces pol.
  - Sols
  - Rivières & lacs



## Conséquences

- Redistribution de masses des géo-fluides cause des changements gravitationnels
- Couplage entre composantes du syst. Terre cause transferts de moment angulaire, et donc des changements dans les moments d'inertie
- Les bas degrés du champ et les EOP sont directement affectés par ces changements et ils sont donc des indicateurs du "global change"



## Définition Géocentre

- A une époque  $t$  :

$$x_c = (1/M) \int x' dM$$

$$y_c = (1/M) \int y' dM$$

$$z_c = (1/M) \int z' dM$$

- Ces coeff. sont linéairement reliés au 1<sup>er</sup> degré du modèle de champ :

$$C_{1,0}, C_{1,1} \text{ and } S_{1,1}$$

## Moments de deg. + élevés

- A une époque  $t$ , les moments du second deg. sont reliés à : l'aplatissement, l'orientation de l'axe de figure et à l'ellipticité de l'équateur :

- $C_{2,0}$ ,
- $C_{2,1}$  and  $S_{2,1}$ , and
- $C_{2,2}$  and  $S_{2,2}$

## Observations & Modèles

- Les techniques spatiales fournissent des résolution et exactitude de +en+ grande des différentes composantes du système Terre
- Nous sommes loin d'avoir une complète et satisfaisante image de toutes ces composantes
- Les modèles fournissent des estimations des composantes les moins bien observées

## Variabilité du Géocentre

- Observations et modèles des processus géophys. fournissent des moy. au jour et au mois
- Avec les nvelles missions spatiales, la situation va s'améliorer

JOHNSON ET AL.: OCEANIC CONTRIBUTIONS TO GRAVITATIONAL FIELD

Table 3. Geocenter Motion Seasonal Sinusoids Computed From the Combined Analysis of LAGEOS I and II Satellites, Atmosphere, Ocean, and Continental Water Storage<sup>a</sup>

Source	Axis	Annual		Semi-Annual	
		Amplitude, mm	Phase, deg	Amplitude, mm	Phase, deg
Atmosphere (IB)	x	0.55	104	0.23	90
ECMWF	y	1.31	91	0.38	217
<i>Dong et al. [1997]</i>	z	0.87	133	0.73	271
Atmosphere (IB)	x	0.40	165	0.30	270
GEOS-1	y	1.35	150	0.47	335
<i>This paper</i>	z	0.44	134	0.70	353
Oceans (ISO Model)	x	1.05	79	0.39	248
<i>Dong et al. [1997]</i>	y	0.09	121	0.29	282
	z	0.18	218	0.16	41
Oceans (T/P Model)	x	0.96	73	0.86	187
<i>Chen et al. [1998]</i>	y	0.97	52	0.73	173
	z	0.49	3	0.25	232
Oceans (POCM_4B)	x	0.89	92	0.24	117
No correction	y	0.40	130	0.23	22
	z	0.05	193	0.13	189
Oceans (POCM_4B)	x	0.83	95	0.24	111
<i>Sea level adjustment</i>	y	0.40	136	0.24	23
	z	0.14	220	0.09	182
Continental Hydrology	x	3.28	25	0.84	319
<i>Dong et al. [1997]</i>	y	2.94	185	0.94	48
	z	3.57	40	0.60	344
Continental Hydrology (CDAS-I)	x	1.28	44	0.15	331
<i>Chen et al. [1999]</i>	y	0.52	182	0.56	312
	z	3.30	43	0.50	75

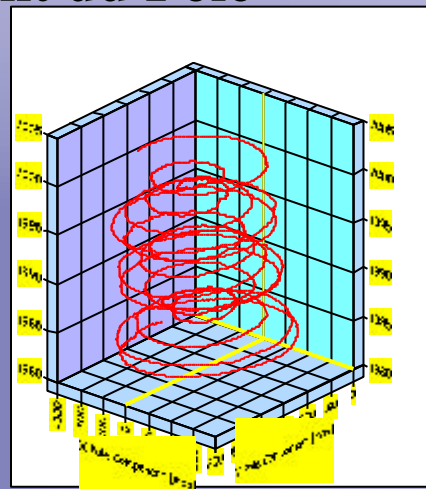
## Signaux à Longues Périodes

Source	Magnitude	Mouv. induit	Ref.
Niveau mer	1.2 mm/y	$0.064 \pm 0.02$ mm/y	2
Fonte glaces	2 mm/y	$0.046 \pm 0.20$ mm/y	2
Tectoniques	AMO-2	$0.309 \pm 0.05$ mm/y	2
Rebond postglaciaire	ICE-3G model	0.2 - 0.5 mm/y	1

- (1) : Marianne Greff-Lefftz (2000)
- (2) : Yu. Barkin (1997?)

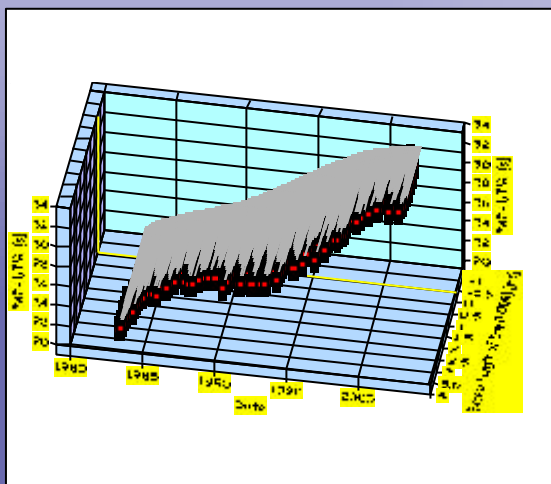
## Mouvement du Pole

- Valeurs journ. moyennes des pos. de l'axe instantané de rotation de la Terre par LAGEOS 1 & 2 sur la période 1983 - 2002 (LAGEOS-seul, de 1983 à 4<sup>ème</sup> trim. de 1992)



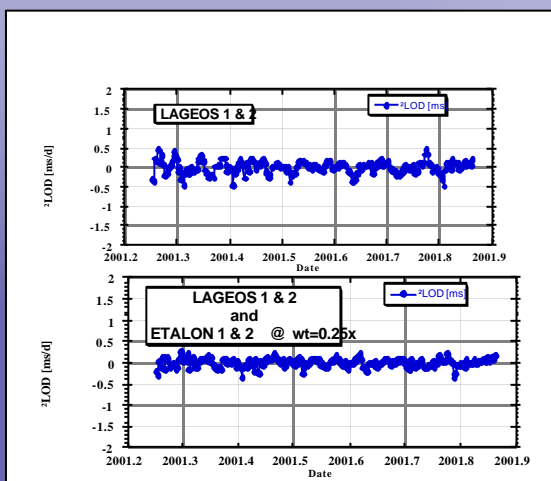
## Rotation de la Terre

- Variations journ. par LAGEOS 1 & 2 du "Length-Of-Day" (LOD) et de l'UT1R par rapport au TAI de 1983 à 2002 (LAGEOS-seul, de 1983 à 4<sup>ième</sup> trim. de 1992)

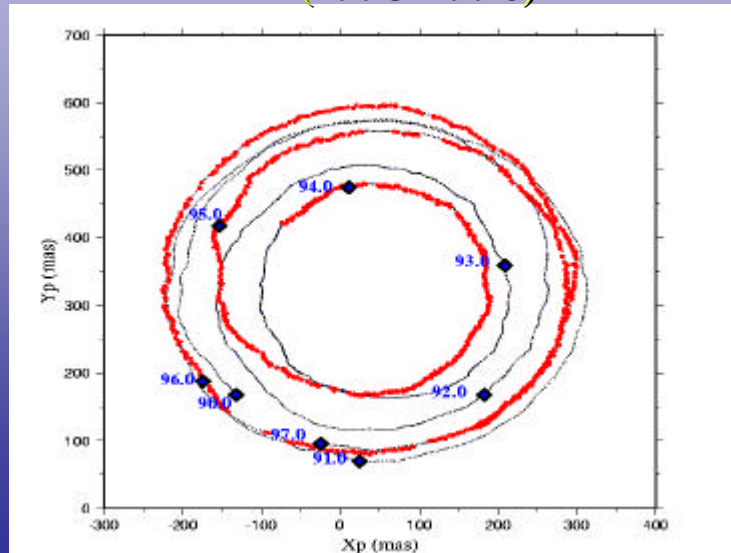


## ETALON Contributions to EOP

- Combined analysis of LAGEOS 1 & 2 and ETALON 1 & 2 data indicates that with proper adjustment of the relative weights of the two data sets, the latter can improve EOP and LOD in particular, by nearly 50%

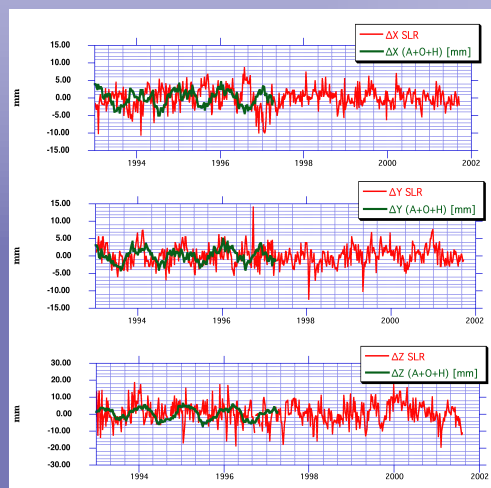


## Mouvement du pôle par DORIS (1993-1996)



## Geocenter Observations - SLR (JCET weekly)

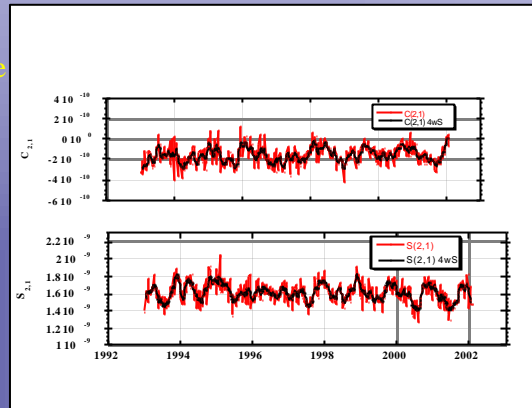
- Weekly estimates since 1993, secular trends removed
- Tracking network variations affect quality of results
- Order of magnitude of results consistent with predictions and other SLR series





## Figure Axis Orientation

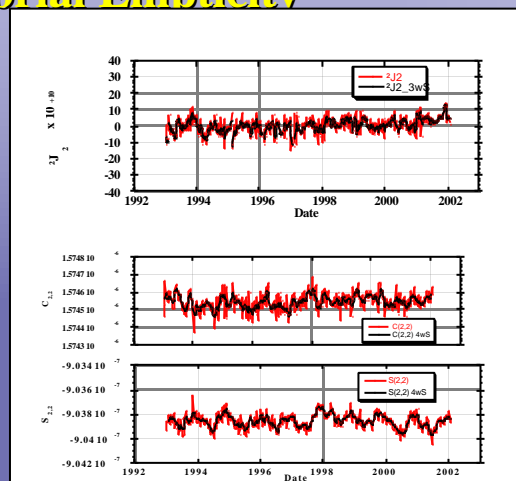
- Weekly estimates since 1993, secular trends removed
- LAGEOS 1 & 2 alone not enough to resolve robust 7-day averages
- Addition of the ETALONS should improve considerably



(JCET, Pavlis, 2002)

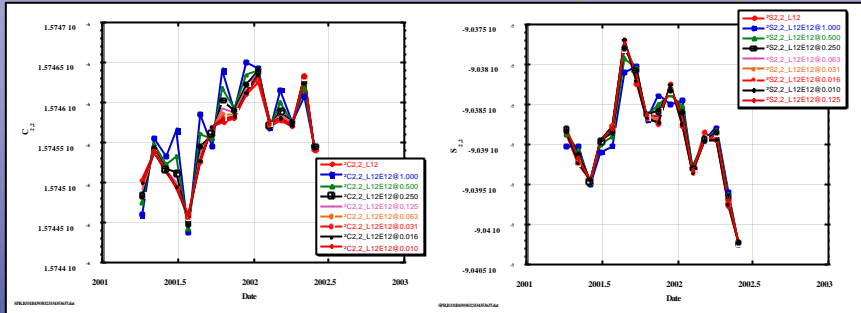
## Dynamical Flattening Equatorial Ellipticity

- Weekly estimates since 1993, secular trends removed
- Tracking network variations affect quality of results
- Order of magnitude of results consistent with predictions and other SLR series



(JCET, Pavlis, 2002)

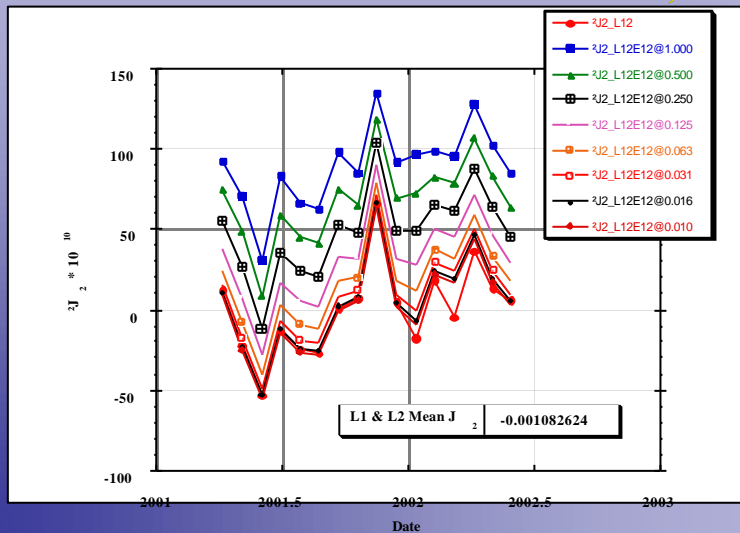
## Eq. Ellipticity - $C_{2,2}$ & $S_{2,2}$



- ETALONs introduce more variability in  $C_{2,2}$  &  $S_{2,2}$  estimates when at equal relative weight to LAGEOS
- Less sensitive to  $C_{2,1}$  &  $S_{2,1}$  variations than LAGEOS

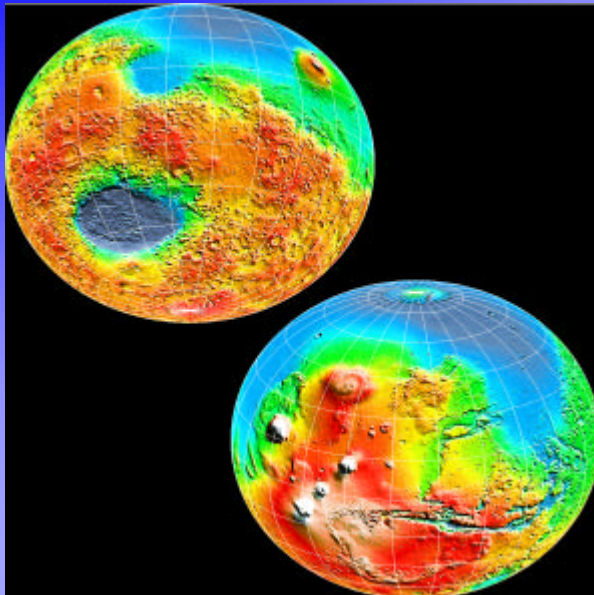
(JCET, Pavlis, 2002)

## Dynamical Flattening $J_{2,0}$



(JCET, Pavlis, 2002)

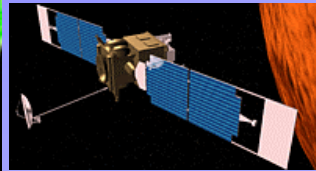
## Topographie de MARS



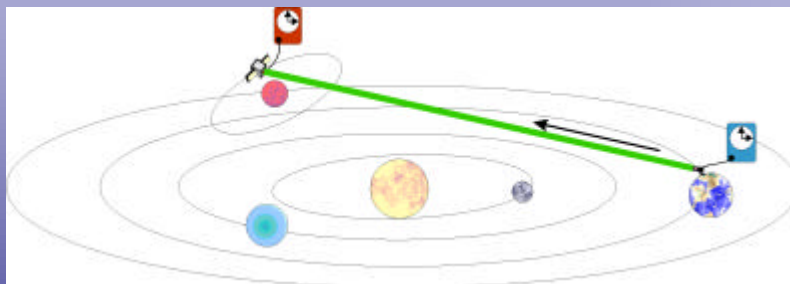
*Balmino, 1992*  
*Lemoine et al., 2001* :  
Solution HS du champ de  
gravité de Mars (80,80), à  
partir des données de  
poursuite(1997-2000) de  
MGS : GMM-2B

Orbite : 92.7deg/400 km  
Sol. stable -> 60,60

Altimètre laser (MOLA) :  
utilisation des X-over (1.9  
m rms).



## Ex. de R&d : télémétrie laser 1 voie : TIPO



Stabilité des oscillateurs Rubidium : qqs  $10^{-15}$  (1 jour)



Mesure différentielle sur 1 jour ~ qqs cm

(OCA Samain, 2002)

## Objectifs TIPO

- Validation de la télémétrie optique une voie
- Mesure champ de gravité global et local de Mars
- Mesure des perturbations subies par l'orbiter (Freinage dans l'atmosphère de Mars, Pression de radiation,...)
- Détermination mouvement orbital de Mars, masse de la planète
- Orbitographie pour l'aérocapture de l'orbiter
- Orbitographie pour le rendez-vous
- Corrélation avec des mesures Doppler micro-onde
- Propagation des ondes électromagnétiques

*(OCA Samain, 2002)*