

Fondements des Conventions IERS

Ecole d'Eté 2018

Champ de gravité variable

Jean-Michel Lemoine / CNES

Energiade COES IGN

robsevatore CITS INSU

() Observatoire () The UPF I le cham



Plan

- 1. Marées terrestres
- 2. <u>Rebond post-glaciaire</u>
- 3. Marée polaire
 - 1. Terre solide
 - 2. Océans
- 4. Charges de surface
 - 1. Marées océaniques
 - 2. Charge atmosphérique
 - 3. Charge hydrologique
- 5. Calcul et modélisation du champ variable

Marées terrestres





Rebond post -glaciaire





Glacial Isostatic Adjustment as Equivalent H2O Thickness Variation Rate



From: The Antarctica component of postglacial rebound model ICI exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level hist Geophys J Int. 2014;198(1):537-563. doi:10.1093/gji/ggu140 Geophys J Int | © The Authors 2014. Published by Oxford University Press of

ICE-6G_C VM5a

Marée polaire



Marée polaire solide (§6.4) :

The pole tide is generated by the centrifugal effect of polar motion, characterized by the potential

$$\Delta V(r,\theta,\lambda) = -\frac{\Omega^2 r^2}{2} \sin 2\theta \left(m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda\right)$$

= $-\frac{\Omega^2 r^2}{2} \sin 2\theta \operatorname{\mathbf{Re}}\left[\left(m_1 - im_2\right) e^{i\lambda}\right].$ (6.22)

(See Section 7.1.4 for further details, including the relation of the wobble variables (m_1, m_2) to the polar motion variables (x_p, y_p) .) The deformation which constitutes this tide produces a perturbation

$$-\frac{\Omega^2 r^2}{2} \sin 2\theta \, \mathbf{Re} \, \left[k_2 \left(m_1 - im_2\right) e^{i\lambda}\right]$$

in the external potential, which is equivalent to changes in the geopotential coefficients C_{21} and S_{21} . Using for k_2 the value 0.3077 + 0.0036i appropriate to the polar tide yields

$$\Delta \bar{C}_{21} = -1.333 \times 10^{-9} (m_1 + 0.0115m_2),$$

$$\Delta \bar{S}_{21} = -1.333 \times 10^{-9} (m_2 - 0.0115m_1),$$

where m_1 and m_2 are in seconds of arc.

Marée polaire océanique : Desai 2002

Charges de surface



Le potentiel de simple couche



Dû à l'orthogonalité des fonctions de Legendre :

$$\iint_{S} P_{lm}(\sin \varphi') P_{l'm'}(\sin \varphi') \, ds = \frac{4\pi}{(2-\delta_{0m})(2l+1)} \frac{(l+m)!}{(l-m)!} \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

$$\iint_{S} \frac{q}{d} ds = \frac{4\pi R^2}{r} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2l+1} \left(\frac{R}{r}\right)^l \sum_{m=0}^{l} P_{lm}(\sin \varphi) \left(q_{lm}^c \cos m\lambda + q_{lm}^s \sin m\lambda\right)$$

on a :



Le potentiel de simple couche

d'où :

$$U_{p} = 4\pi GR \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2l+1} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^{l} P_{lm}(\sin\varphi) \left(q_{lm}^{c} \cos m\lambda + q_{lm}^{s} \sin m\lambda\right)$$

Charge q de :

 $\begin{array}{ll} mar{\acute{e}}\ oc{\acute{e}}\ anique: q = \xi_w \rho_w \ (\rho_w = 1025 \ kg/m^3) & hydrologie: q = \xi_w \rho_w \ (\rho_w = 1000 \ kg/m^3) \\ pression \ atmosph{\acute{e}}\ rique: q = \Delta P_a \ / g \end{array}$



D'après la première hypothèse de Love, le déplacement de la croûte élastique est proportionnel au potentiel de charge : $\xi(\varphi, \lambda) = \sum_{l=1}^{\infty} h'_l \frac{U_l}{\varphi} = \frac{3}{\rho} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{h'_l}{2l+1} q_l(\varphi, \lambda)$

D'après la seconde hypothèse de Love, cette déformation génère un potentiel additionnel de déformation de charge: $\Delta U_{l}(\varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} k'_{i} U_{i} = 4\pi G R \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k'_{i}}{q_{i}(\varphi, \lambda)}$

$$\Delta U_{p}(\varphi,\lambda) = \sum_{l=1}^{\infty} k_{l}' U_{l} = 4\pi GR \sum_{l=1}^{\infty} \frac{k_{l}'}{2l+1} q_{l}(\varphi,\lambda)$$

Le potentiel total de charge $U_p + \Delta U_p$ peut s'écrire sous une forme similaire au potentiel de volume dont les coefficients de Stokes s'expriment alors : $\begin{bmatrix} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{bmatrix} = \frac{4\pi R^2}{M} \frac{1+k'_l}{2l+1} \begin{cases} q^c_{lm} \\ q^s_{lm} \end{cases} = \frac{3}{R\rho_e} \frac{1+k'_l}{2l+1} \begin{cases} q^c_{lm} \\ q^s_{lm} \end{cases}$

Nombres de Love de charge



Nombres de Love de charge



Relations spectrales



hauteur d'eau (cm)

Marées océaniques



Marées océaniques

Ocean Tide Model EOT11a (01.06.2012 00:00:00)



O

20

40

60

80

-20

-40

-80

-60

Charge atmosphérique et réponse océanique



Charge atmosphérique et réponse océanique



Charge hydrologique



Hydrologie (à partir des données de climatologie)

Water WGHM without loading

April 2003

Déformation de charge à partir des hauteurs d'eau (sur les continents):









Equivalent Water Height comparison: 30day-model-19452-19481 - EIGEN-GL04S



$$\Delta N = R \sum_{l=2} \sum_{m=0} \overline{P}_{lm} (\sin \varphi) \left(\Delta \overline{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \overline{S}_{lm} \sin m\lambda \right)$$

$$\Delta h_w = \frac{g}{4\pi G R \rho_w} \sum_{l=2}^{50} \frac{2l+1}{1+k_l'} \Delta N_l^{geoid}$$

Calcul et modélisation du champ variable





Ces missions répondent à la question : « Comment faire mieux que par le passé ? »

4 critères fondamentaux à satisfaire :

1. Orbite la plus basse possible

2. Suivi continu de la trajectoire (GPS)

3. S'affranchir des forces de surface (... les mesurer \rightarrow accéléromètres)

 4. Augmenter la sensibilité de la mesure par « différentiation » (→ gradiomètres)

Comment faire mieux que par le passé ???

- 4 critères fondamentaux à satisfaire :
- 1. Orbite la plus basse possible
- 2. Suivi continu de la trajectoire (GPS)
- 3. S' affranchir des forces de surface (... les mesurer→ accéléromètres)
- 4. Augmenter la sensibilité de la mesure par « différentiation »





GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment

Charge utile : • récepteurs GPS Black-Jack

- réflecteurs laser
- système dual inter-satellite en bandes K/Ka
- accéléromètres super-STAR



Lancement : 17 mars 2002

C S-R



University of Texas at Austin Center for Space Research

24/32

GHz







GRACE en quelques chiffres

- 15 ans de données GRACE, de août 2002 à juin 2017 (fin de collecte des données : 30/06/2017)
- Dates de rentrée atmosphérique : GRACE-B le 24 décembre 2017, GRACE-A le 10 mars 2018
- Altitude orbitale dérivant lentement de 500 à 340 km, avec une longue période à 470 km
- Séparation moyenne des satellites : 200 km
- Base de données : 1 donnée de distance / vitesse / accélération inter-satellites toutes les 5 secondes (+ mesures accélérométriques, GPS, SLR)
- 164 solutions mensuelles et 464 solutions à 10 jours (CNES/GRGS)
- Données Super-STAR & KBR interrompues depuis décembre 2010 à des intervalles de 6 mois environ (périodes d'éclipses) dues à la faiblesse des batteries
- Permutation de l'ordre des satellites le 10/12/2005 et, à partir du 21/08/2014, à chaque période d'éclipse

Tableau des solutions GRACE disponibles



cnes · · · ·

GRACE permet d'accéder aux variations temporelles du champ de gravité

 \rightarrow Et donc aux déplacements des masses terrestres



2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017

Monthly gravity field from GRACE 0208





Film des solutions GRACE



Variations hydrologiques annuelles détectées par GRACE

Above

0.2800 - 0.2900

0.3100 0.3000 - 0.31000.2900 - 0.3000

Amplitude des variations hydrologiques annuelles en m d'eau

(rms: 0.0416 / moy: 0.0315 / min : 0.0001 / max : 0.5176)



Variations hydrologiques annuelles détectées par GRACE



Variations hydrologiques annuelles détectées par GRACE



Semi-annual signal (cosine)



Semi-annual signal (sine)





Fonte glaciaire associée à un fort signal saisonnier

GRACE satellite gravity data



Fonte glaciaire associée à un faible signal saisonnier

GRACE satellite gravity data







How much ice is Greenland losing? This is monitored by satellites which have measured changes in gravity around the ice sheet over the last decade (Velicogna 2009). In 2002 to 2003, the Greenland ice sheet was losing mass at a rate of 137 gigatonnes per year.

John Cook @skepticalscience.com



De 2002 à 2003 le Groenland perdait de la masse au taux de **137 GT / an**



John Cook @skepticalscience.com

En moins d'une décennie (en 2008-2009) ce taux est passé à **286 GT / an**

However, the rate of ice loss has more than doubled in less than a decade. The rate of ice loss over the 2008 to 2009 period was 286 gigatonnes per year.



This is a vivid reminder that global warming isn't a statistical abstraction cooked up in a climate lab. Greenland is just one example of the physical realities of climate change. On the other side of the planet, Antarctica is also losing ice at an accelerating rate. All over the globe, glaciers are retreating at an accelerating rate.



Kjeldsen et al., 2015



Tabone et al., 2017

51

Rebond post-glaciaire



Tendance du PGR exprimé en mm/an pour 3 modèles : ICE-6G_C, W12A, IJ05R2

Tendance exprimée en EWH EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD.v12juin.B-P.DOT degré 0002 à 0090 (unité : m EWH / an) (mean: 0.0000 / st.dev: 0.0158 / min: -0.4660 / max: 0.1209)





Séisme de Sumatra en décembre 2004



Détection par GRACE de l'événement sismique de Sumatra du 26 décembre 2004

GRACE satellite gravity data



Séismes de magnitude 8.2 et 8.7 du 11 avril 2012 dans l'océan indien



mGal

- 0.008 - 0.007 - 0.006 - 0.005 - 0.003 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.003 - 0.004 - 0.003 - 0.002 - 0.004 - 0.005 - 0.004 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.001 - 0.002 - 0.002 - 0.002 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.002 - 0.003 - 0.00



5

In

mGal

0.009 0.008 0.007 0.006 0.005 0.004 0.003 0.002 0.001 0.000 -0.001 -0.002 -0.003 -0.004 -0.004 -0.006 -0.006 -0.006 -0.006







mGa

79°E)

Séisme du Japon (2011)



Séisme de Sendai (11 mars 2011)



GRACE satellite gravity data Equivalent water heights



En rouge et jaune : la solution du GFZ



En vert et bleu, la solution CNES/GRGS



www.thegraceplotter.com, by CNES/GRGS

Evènements hydrologiques extrêmes vus par GRACE

Hydrological Extreme Events as Seen by GRACE

November 01, 2005.

ifĢ

25 -15 -5 5 15 25

Total Water Storage Anomaly [cm] (seasonal and secular variations removed)

Variations hydrologiques non anthropique

GRACE satellite gravity data



www.thegraceplotter.com, by CNES/GRGS

Variations hydrologiques d'origine anthropique



Tendance à long terme du stockage d'eau dans les plaines du nord de la Chine



"Dans les plaines du nord de la Chine, la déplétion en eau à cause de l'irrigation est 2 à 4 fois plus importante dans les aquifères profonds que dans les aquifères de surface"

Variations du niveau moyen des océans détectées par les missions GRACE et Jason



and Jason-1 data, A. Lombard (LEGOS) & al., 2006

Sea Level Budget 1993-2010





Principaux résultats scientifiques de GRACE

- <u>Hydrologie</u> : première mesure globale du contenu en eau mondial sur toute la profondeur des nappes phréatiques
- <u>Glaciologie</u> : accès à la connaissance des transferts de masse entre la cryosphère et les océans
- <u>Océanographie</u> : accès à la composante massique de l'élévation du niveau de la mer ; fermeture du bilan entre altimétrie, masse et composante stérique
- <u>Rebond post-glaciaire</u> : accès à l'image gravitationnelle de l'ajustement isostatique
- <u>Séismes</u> : signature gravitationnelle des grands séismes
- <u>Orbitographie précise</u> : apport du champ de gravité variable à la qualité des orbites altimétriques (court terme et long terme)

La modélisation du champ moyen





Mean models: "bias and slope" vs. "piece-wise-linear" modelling

• "bias and slope"

• "piece-wise-linear"





C(2,0) time series from Lageos-1&2



- Les conventions 2010 semblent largement dépassées en ce qui concerne le champ variable par rapport à la connaissance qu'on en a aujourd'hui...
- MAIS... les solutions GRACE mensuelles ne sont pas utilisables directement (indisponibilité en dehors de la période GRACE, trous de données)
- Il existe des modèles moyens bâtis à partir des solutions GRACE (modèles « Piece Wise Linear » / an + signaux annuels et semi-annuels /an) → utilisés pour l'orbitographie des satellites altimétriques (GDR)
- MAIS... problèmes d'extrapolation de ces modèles (passé et futur)
- L'apport de données hors GRACE (DORIS / SLR / GNSS) apparaît plus que jamais nécessaire pour compléter la connaissance du champ avant et après GRACE
- En tout état de cause l'usage de modèles de champ variable doit s'accompagner de l'usage des champs de « dealiasing » utilisés lors de leur calcul
- Cette cohérence est également nécessaire entre la série de coefficients C21/S21
 du champ variable et le modèle de pôle moyen qui a été utilisé pour son calcul

