

Mesures gravimétriques absolues et relatives en co-localisation avec des techniques géodésiques de positionnement précis: quel lien entre les variations de pesanteur et les mouvements verticaux?

Soutenance de thèse

Caroline ROZIER de LINAGE



Institut de Physique du Globe de Strasbourg
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre
Université Louis Pasteur Strasbourg I

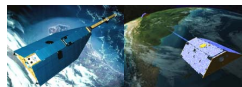
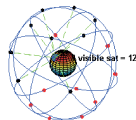


9 septembre 2008

Les mesures géodésiques et gravimétriques

- au sol \Rightarrow gravimètres absolus et supraconducteurs
- positionnement (vertical et horizontal)
 \Rightarrow GPS, VLBI, DORIS
- spatiales: champ de gravité
 - à très basse résolution spatiale
 \Rightarrow télémétrie laser sur satellites (SLR)
 - à haute résolution spatiale
 \Rightarrow satellites CHAMP (2000-), GRACE (2002-)

\Rightarrow mesures de plus en plus précises avec accès aux variations temporelles



Combinaison des mesures géodésiques et gravimétriques

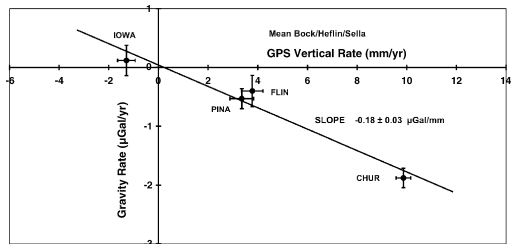
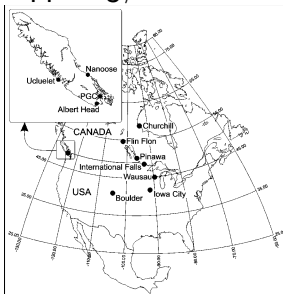
Utilisation combinée de ces différentes mesures:

- pour contraindre les processus géophysiques en séparant les effets géométrique et gravitationnel
⇒ mesures colocalisées gravimétrie + déplacement vertical
- pour valider les mesures spatiales du champ de gravité par des mesures au sol
⇒ gravimétrie spatiale + gravimétrie au sol (+ déplacement vertical)

Exemple: rebond post-glaciaire

Relaxation visqueuse du manteau

- rapport g/u observé: $-0.18 \mu\text{Gal mm}^{-1}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$)



Lambert et al. (2006)

- rapport g/u théorique: $-0.15 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
(modèles visco-élastiques)

Processus géophysiques considérés

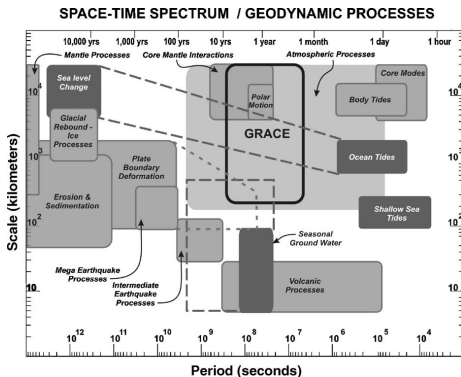
Lambert et al. (2006)

- surcharges

- hydrologie continentale
- pression atmosphérique
- marées océaniques

⇒ à partir de sorties de modèles globaux

- séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004



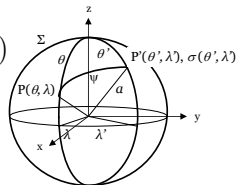
Plan

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Réponse de la Terre à une variation temporelle de la distribution des masses en surface

- Variation de charge en $r = a$:

$$\begin{aligned}\sigma(\theta, \lambda, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\sigma_n^{m,c}(t) Y_n^{m,c}(\theta, \lambda) + \sigma_n^{m,s}(t) Y_n^{m,s}(\theta, \lambda)) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n(\theta, \lambda, t)\end{aligned}$$



- Variation de l'observable en $r = a$:

$$f(\theta, \lambda, t) = \iint_{\Sigma} G_f(\Psi) \sigma(\theta', \lambda', t) dS = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \sigma_n(\theta, \lambda, t)$$

$G_f(\Psi)$: fonction de Green (domaine spatial)

f_n : fonction de transfert (domaine spectral)

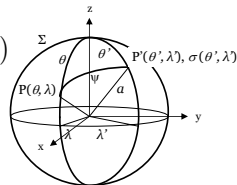
$$f_n = \frac{G_{f,n}}{\delta_n} = \frac{G_{f,n}}{4\pi a^2}$$

⇒ nombres de Love d'un modèle de Terre à symétrie sphérique, élastique et isotrope (PREM, *Dziewonski et Anderson, 1981*)

Réponse de la Terre à une variation temporelle de la distribution des masses en surface

- Variation de charge en $r = a$:

$$\begin{aligned}\sigma(\theta, \lambda, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\sigma_n^{m,c}(t) Y_n^{m,c}(\theta, \lambda) + \sigma_n^{m,s}(t) Y_n^{m,s}(\theta, \lambda)) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n(\theta, \lambda, t)\end{aligned}$$



- Variation de l'observable en $r = a$:

$$f(\theta, \lambda, t) = \iint_{\Sigma} G_f(\Psi) \sigma(\theta', \lambda', t) dS = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \sigma_n(\theta, \lambda, t)$$

$G_f(\Psi)$: fonction de Green (domaine spatial)

f_n : fonction de transfert (domaine spectral)

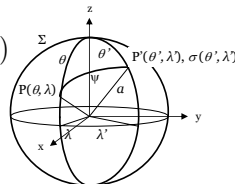
$$\left. \begin{array}{l} G_f(\Psi) \\ f_n \end{array} \right\} f_n = \frac{G_{f,n}}{\delta_n} = \frac{G_{f,n}}{4\pi a^2}$$

⇒ nombres de Love d'un modèle de Terre à symétrie sphérique, élastique et isotrope (PREM, *Dziewonski et Anderson, 1981*)

Réponse de la Terre à une variation temporelle de la distribution des masses en surface

- Variation de charge en $r = a$:

$$\begin{aligned}\sigma(\theta, \lambda, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\sigma_n^{m,c}(t) Y_n^{m,c}(\theta, \lambda) + \sigma_n^{m,s}(t) Y_n^{m,s}(\theta, \lambda)) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n(\theta, \lambda, t)\end{aligned}$$



- Variation de l'observable en $r = a$:

$$f(\theta, \lambda, t) = \iint_{\Sigma} G_f(\Psi) \sigma(\theta', \lambda', t) dS = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \sigma_n(\theta, \lambda, t)$$

$G_f(\Psi)$: fonction de Green (domaine spatial)

f_n : fonction de transfert (domaine spectral)

$$\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} f_n = \frac{G_{f,n}}{\delta_n} = \frac{G_{f,n}}{4\pi a^2}$$

⇒ nombres de Love d'un modèle de Terre à symétrie sphérique, élastique et isotrope (PREM, *Dziewonski et Anderson, 1981*)

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Décomposition de la variation de gravité sol

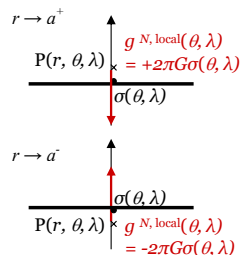
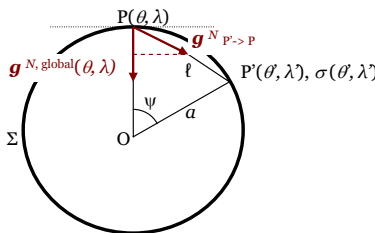
Convention:

$g = \mathbf{g} \cdot (-\mathbf{n})$, i.e. $g > 0$ si \mathbf{g} orienté vers le centre de la Terre

$$g(\theta, \lambda) = g^N(\theta, \lambda) + g^E(\theta, \lambda)$$

- effet newtonien
- effet élastique

Effet newtonien



$$\begin{aligned}
 g^N(\theta, \lambda) &= \iint_{\Sigma} G_{g^N}(\Psi) \sigma(\theta', \lambda') dS \\
 &= \iint_{\Sigma-P} \frac{G \sigma(\theta', \lambda')}{\ell^2} \sin(\Psi/2) dS + \iint_{\Sigma} \delta(\Psi) \sigma(\theta', \lambda') dS \\
 &= \iint_{\Sigma-P} \frac{G \sigma(\theta', \lambda')}{4a^2 \sin(\Psi/2)} dS \pm 2\pi G \sigma(\theta, \lambda)
 \end{aligned}$$

Domaine spectral

$$g_n = g_n^N + g_n^E = g_n^{N, \text{global}} + g_n^{N, \text{local}} + g_n^{E, u} + g_n^{E, m}$$

- effet newtonien (charge locale + reste de la charge)

$r \rightarrow a^+$ (charge locale au-dessous)

$$\begin{aligned} g_n^N &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n+1}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} + 2\pi G \end{aligned}$$

$r \rightarrow a^-$ (charge locale au-dessus)

$$\begin{aligned} g_n^N &= -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} - 2\pi G \end{aligned}$$

- effet élastique (effet à l'air libre du déplacement vertical + redistribution des masses internes)

$$g_n^E = -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1}{2n+1} (2h'_n - (n+1)k'_n)$$

Domaine spectral

$$g_n = g_n^N + g_n^E = g_n^{N, \text{global}} + g_n^{N, \text{local}} + g_n^{E, u} + g_n^{E, m}$$

- effet newtonien (charge locale + reste de la charge)

$r \rightarrow a^+$ (charge locale au-dessous)

$$\begin{aligned} g_n^N &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n+1}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} + 2\pi G \end{aligned}$$

$r \rightarrow a^-$ (charge locale au-dessus)

$$\begin{aligned} g_n^N &= -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} - 2\pi G \end{aligned}$$

- effet élastique (effet à l'air libre du déplacement vertical + redistribution des masses internes)

$$g_n^E = -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1}{2n+1} (2h'_n - (n+1)k'_n)$$

Domaine spectral

$$g_n = g_n^N + g_n^E = g_n^{N, \text{global}} + g_n^{N, \text{local}} + g_n^{E, u} + g_n^{E, m}$$

- effet newtonien (charge locale + reste de la charge)

$r \rightarrow a^+$ (charge locale au-dessus)

$$\begin{aligned} g_n^N &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n+1}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} + 2\pi G \end{aligned}$$

$r \rightarrow a^-$ (charge locale au-dessous)

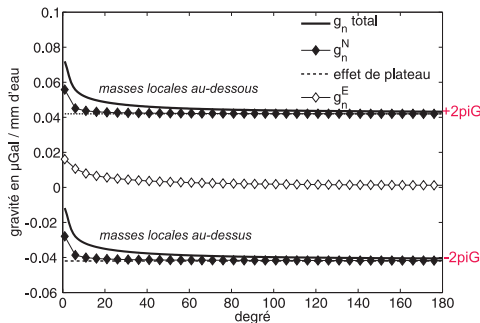
$$\begin{aligned} g_n^N &= -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n}{2n+1} \\ &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1/2}{2n+1} - 2\pi G \end{aligned}$$

- effet élastique (effet à l'air libre du déplacement vertical + redistribution des masses internes)

$$g_n^E = -\frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{1}{2n+1} (2h'_n - (n+1)k'_n)$$

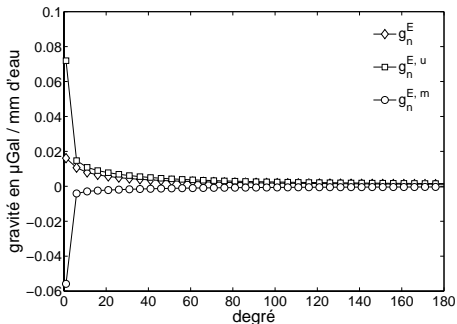
Calcul pour PREM (modifié sans océan)

Résolution associée au degré n (en km): $\frac{\Lambda}{2} = \frac{20\,000}{n}$



- effet newtonien local dominant aux hauts degrés ($n \geq 30$)
 \Rightarrow détermine le signe de g
- effets élastiques et newtonien global importants aux bas degrés ($n \leq 20$), nuls aux hauts degrés ($n \geq 30$)
 \Rightarrow effet toujours positif

Partie élastique



- sensibilité aux bas degrés ($n \leq 20$)
- effets du déplacement vertical et de redistribution des masses antagonistes

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - **Fonctions de transfert d'autres observables**
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

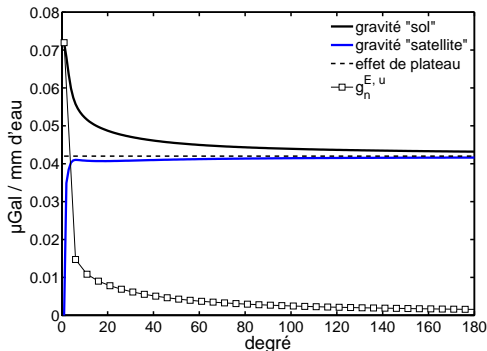
Gravité satellite

Comparaison avec la gravité sol

- Dérivée verticale \dot{V} du potentiel ($r \rightarrow a^+$)

$$\begin{aligned}\dot{V}_n &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n+1}{2n+1} (1+k'_n) \\ &= g_n^{r \rightarrow a^+} + \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{2h'_n}{2n+1} \\ &= g_n^{r \rightarrow a^+} + \frac{2g_0}{a} u_n\end{aligned}$$

⇒ utilisation de mesures du déplacement vertical



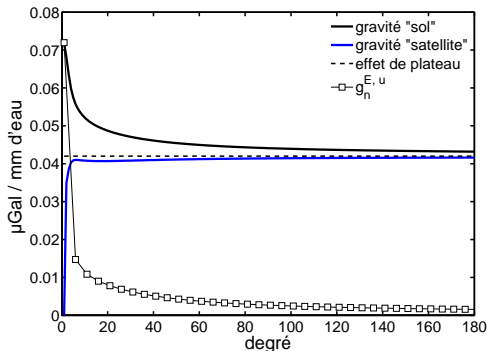
Gravité satellite

Comparaison avec la gravité sol

- Dérivée verticale \dot{V} du potentiel ($r \rightarrow a^+$)

$$\begin{aligned}\dot{V}_n &= \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{n+1}{2n+1} (1+k'_n) \\ &= g_n^{r \rightarrow a^+} + \frac{3g_0}{a\bar{\rho}} \frac{2h'_n}{2n+1} \\ &= g_n^{r \rightarrow a^+} + \frac{2g_0}{a} u_n\end{aligned}$$

⇒ utilisation de mesures du déplacement vertical



Fonctions de transfert d'autres observables

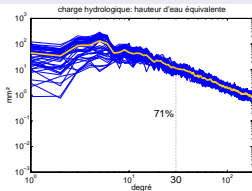
Illustration avec une charge hydrologique

Modèle global LaD (Milly et Shmakin, 2002): humidité du sol + neige

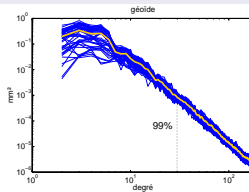
Spectres d'énergie
mensuels

$$\sum_{m=0}^n f_n^2 [(\sigma_n^{m,c}(t))^2 + (\sigma_n^{m,s}(t))^2]$$

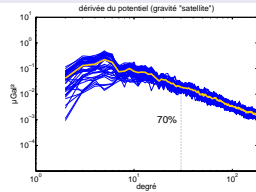
Charge hydrologique



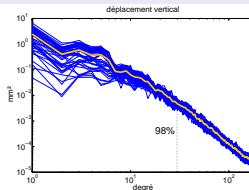
Géoïde



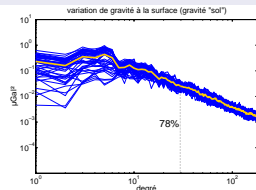
Gravité satellite



Déplacement vertical



Gravité sol ($r \rightarrow a^+$)

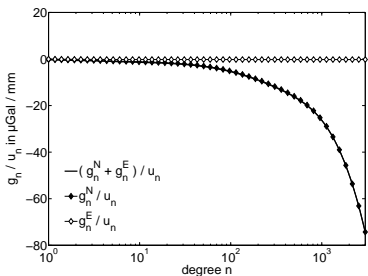


- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Etude dans le domaine spectral

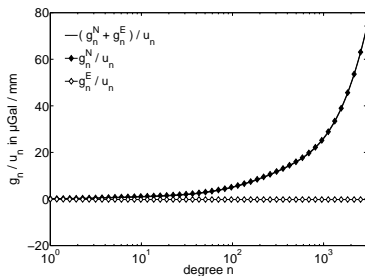
Rapport des fonctions de transfert g_n/u_n

$r \rightarrow a^+$ (charge locale au-dessous)



$$\frac{g_n^N}{u_n} = \frac{g_0}{a} \frac{n+1}{h'_n} < 0 \quad \forall n$$

$r \rightarrow a^-$ (charge locale au-dessus)

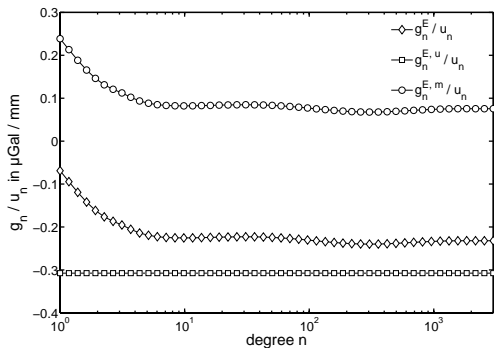


$$\frac{g_n^N}{u_n} = -\frac{g_0}{a} \frac{n}{h'_n} > 0 \quad \forall n$$

Etude dans le domaine spectral

Rapport des fonctions de transfert

Partie élastique



- $-\frac{2g_0}{a}$: gradient à l'air libre
 $\Rightarrow -0.3080 \mu\text{Gal mm}^{-1}$

- limite de $\frac{g_n^{E,m}}{u_n}$ aux très hauts degrés?

$$\frac{g_n^E}{u_n} = -\frac{2g_0}{a} + \frac{g_0}{a} \frac{(n+1)k'_n}{h'_n} < 0 \quad \forall n$$

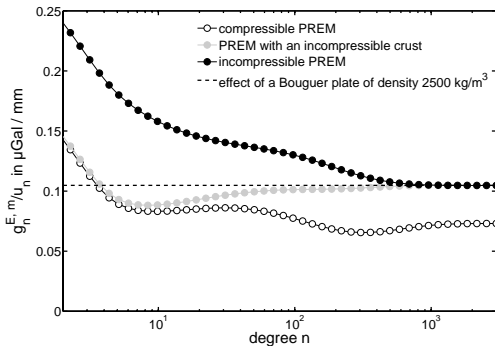
Etude dans le domaine spectral

Rapport des fonctions de transfert

Limite asymptotique de la partie élastique

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_n^{E,m}}{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_0}{a} \frac{(n+1)k'_n}{h'_n} = 2\pi G \tilde{\rho}$$

Quelle valeur pour la densité équivalente $\tilde{\rho}$?



- modèles stratifiés avec croûte incompressible:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_n^{E,m}}{u_n} = 0.1048 \mu\text{Gal mm}^{-1}$$

$$\Rightarrow \tilde{\rho} = 2500 \text{ kg m}^{-3} = \rho_{\text{croûte}}$$

- modèle stratifié compressible:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_n^{E,m}}{u_n} = 0.0730 \mu\text{Gal mm}^{-1}$$

$$\Rightarrow \tilde{\rho} = 1742 \text{ kg m}^{-3} < \rho_{\text{croûte}}$$

Etude dans le domaine spectral

Rapport des fonctions de transfert

Limite asymptotique de la partie élastique: conclusion

Pour une Terre compressible,

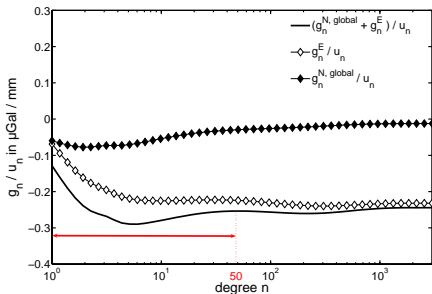
$$\begin{aligned}
 & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_n^E}{u_n} \\
 & = \\
 -0.3086 \mu\text{Gal mm}^{-1} & < -0.2350 \mu\text{Gal mm}^{-1} & < -0.2032 \mu\text{Gal mm}^{-1} \\
 \text{gradient à l'air libre} & & \text{gradient de Bouguer} \\
 & & \tilde{\rho} = \rho_{\text{croute}}
 \end{aligned}$$

Etude dans le domaine spectral

Rapport des fonctions de transfert

A l'extérieur des masses

$$g_n^{N, \text{local}}(\theta, \lambda) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{g_n^{N, \text{global}} + g_n^E}{u_n} = \frac{g_0}{2ah'_n} + \frac{g_n^E}{u_n}$$



- rapport à variations bornées, convergeant vers $-0.2474 \mu\text{Gal mm}^{-1}$

- valeur moyenne spectrale:

$$\sum_{n=1}^{50} \frac{g_n^{N, \text{global}} + g_n^E}{u_n} = -0.26 \mu\text{Gal mm}^{-1}$$

⇒ à valider dans le domaine spatial à l'extérieur des masses

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Méthodologie

- sorties de modèles globaux $\Rightarrow \sigma(\theta, \lambda, t)$ (grilles globales régulières)
- prédiction de $g(\theta, \lambda, t)$ et de $u(\theta, \lambda, t)$ pour PREM

Calcul de g/u :

- 1 hydrologie, atmosphère
 \Rightarrow calcul du coefficient de la régression linéaire entre $g(\theta, \lambda, t)$ et $u(\theta, \lambda, t)$
- 2 marées océaniques
 \Rightarrow calcul d'un rapport g/u complexe pour chaque fréquence

Méthodologie

- sorties de modèles globaux $\Rightarrow \sigma(\theta, \lambda, t)$ (grilles globales régulières)
- prédiction de $g(\theta, \lambda, t)$ et de $u(\theta, \lambda, t)$ pour PREM

Calcul de g/u :

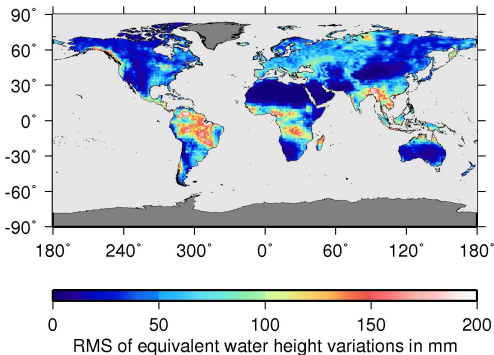
- 1 hydrologie, atmosphère
 \Rightarrow calcul du coefficient de la régression linéaire entre $g(\theta, \lambda, t)$ et $u(\theta, \lambda, t)$
- 2 marées océaniques
 \Rightarrow calcul d'un rapport g/u complexe pour chaque fréquence

Etude dans le domaine spatial

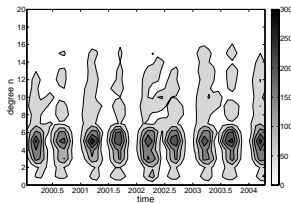
Hydrologie

humidité du sol (modèle LaD, Milly et Shmakin 2002)

Ecart-type des variations mensuelles
(Janvier 2000 - Avril 2004)
soil moisture, LaD model



Spectre d'énergie en fonction du
temps



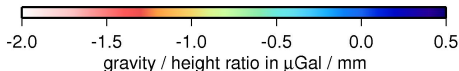
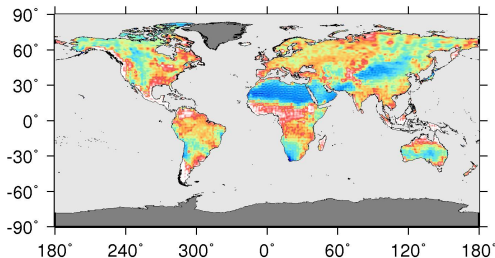
- degré 5 (demi-longueur d'onde: 4000 km)
- signal saisonnier

Etude dans le domaine spatial

Hydrologie: rapport g/u

Humidité du sol

soil moisture, LaD model



Moyenne et écart-type sur différents bassins:

Orénoque	Nord de l'Australie	Afrique de l'Ouest	Europe	Sahara et Arabie
-1.46 ± 0.40	-1.69 ± 0.50	-1.56 ± 0.33	-1.08 ± 0.32	-0.28 ± 0.26

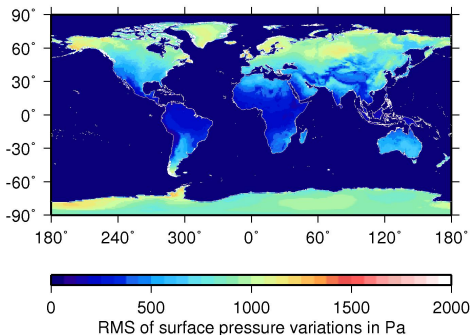
- moyenne continents:
 $-0.97 \pm 0.54 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
- degré 5:
 $-1.07 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
- valeur moyenne spectrale ($-0.26 \mu\text{Gal mm}^{-1}$) retrouvée dans le désert du Sahara

Etude dans le domaine spatial

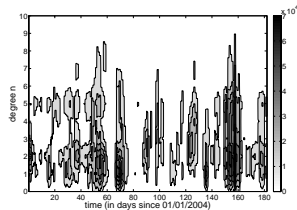
Atmosphère

Champs de pression de l'ECMWF + réponse des océans en baromètre inverse

Ecart-type des variations 3h
(Janvier - Juin 2004)
ECMWF surface pressure, ocean IB response



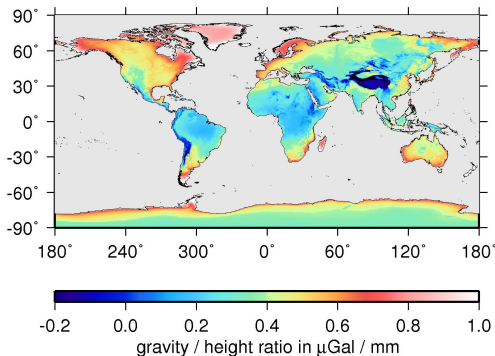
Spectre d'énergie en fonction du
temps



- degré 2 zonal (contraste hautes/basses latitudes) + degré 5
- période dominante: 10 jours

Atmosphère: rapport g/u

ECMWF surface pressure, ocean IB response



Moyenne et écart-type:

Continents	Hautes latitudes $> 40^\circ \text{N/S}$	Basses latitudes $40^\circ \text{S} - 40^\circ \text{N}$
0.38 ± 0.22	0.49 ± 0.23	0.30 ± 0.18

- moyenne continents: $0.38 \pm 0.22 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
- degré 2: $0.14 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
- degré 5: $0.50 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
- contraste hautes/basses latitudes
- fortes valeurs aux hautes latitudes le long des côtes et dans les îles

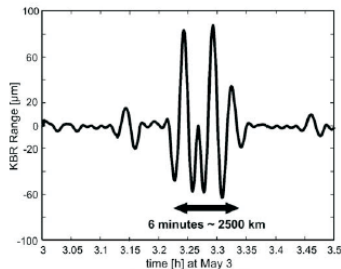
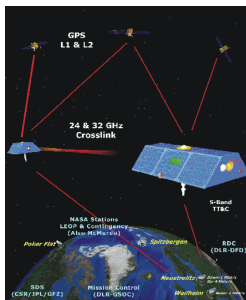
Synthèse sur le rapport g/u

- rapport g/u *modélisé* très variable spatialement (-2 à 2 $\mu\text{Gal mm}^{-1}$); dépend de la taille des structures
- importance des effets locaux
⇒ problème pour l'interprétation du rapport g/u *observé*
- à l'extérieur des masses g/u est relativement constant, proche de $-0.26 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
⇒ moyenne spectrale ($-0.28 \mu\text{Gal mm}^{-1}$) validée

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE

Présentation de la mission GRACE



- altitude \sim 480 km, orbite quasi polaire
- mesures de la distance entre satellites (\sim 220 km, à 10 μm près), d'accélération, d'attitude, GPS
- vitesse relative entre satellites \Rightarrow différence de potentiel entre les 2 satellites

Présentation de la mission GRACE

Modélisation d'effets connus:

$$V_{\text{mod}}(t) = V_{\text{statique}} + \\ V_{\text{planètes}}(t) + V_{\text{séculaire}}(t) + V_{\text{marées}}(t) + V_{\text{atmo}}(t) + V_{\text{océans}}(t)$$

Effets présents dans les résidus d'observation $V_{\text{obs}}(t) - V_{\text{mod}}(t)$:

- hydrologie continentale (humidité du sol, eau des nappes, neige...)
- glaciers et calottes
- circulation océanique
- rebond post-glaciaire
- effet des très forts séismes...

Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE

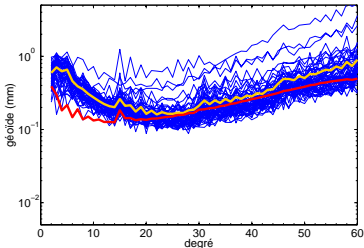
Spectre d'amplitude par degré du géoïde

$$\text{Géoïde: } N(\theta, \lambda, t) = \frac{V(\theta, \lambda, t)}{g_0} = a \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n [C_n^m(t) Y_n^{m,c}(\theta, \lambda) + S_n^m(t) Y_n^{m,s}(\theta, \lambda)]$$

2 stratégies pour l'inversion des **coefficients de Stokes**:

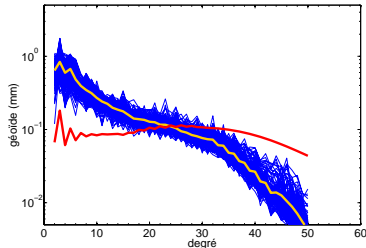
Sans *a priori*
 ⇒ CSR (Texas)

CSR-RL04 (écart à la moyenne sur Avril 2002 – Mars 2007)



Avec *a priori* et contrainte
 ⇒ GRGS (Toulouse)

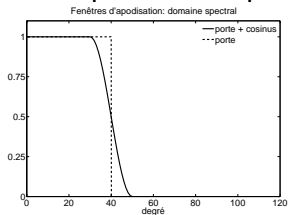
GRGS (écart à la moyenne sur Août 2002 – Juillet 2007)



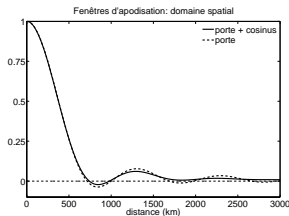
variations temporelles, variation moyenne, erreur formelle calibrée moyenne

Filtrage des solutions libres du CSR

Fenêtre d'apodisation spectrale

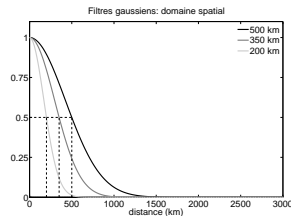
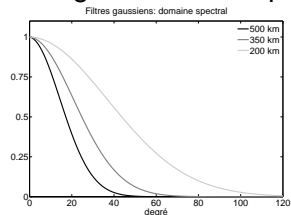


$$W_n$$



$$W(\Psi)$$

Filtre gaussien isotrope

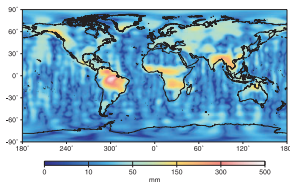
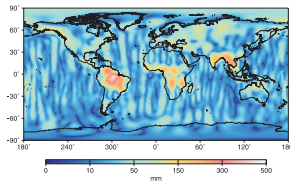
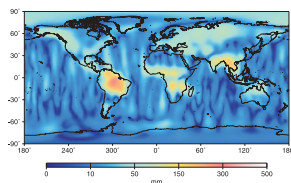


Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE

Charge en hauteur d'eau équivalente (cm)

Amplitude de la variation saisonnière estimée sur 2002-2005

GRGS

CSR apodisation
entre $n_1 = 20$ et $n_2 = 40$ CSR filtrage gaussien
de rayon 500 km

GRGS
CSR apodisation entre
 $n_1 = 20$ et $n_2 = 40$
CSR filtrage gaussien
de rayon 500 km

	Océans	Continents	Tropiques ($25^\circ\text{S}-25^\circ\text{N}$)	Moyennes et hautes latitudes ($> 25^\circ\text{N/S}$)
GRGS	23	65	98	43
CSR apodisation entre $n_1 = 20$ et $n_2 = 40$	31	70	102	48
CSR filtrage gaussien de rayon 500 km	19	54	79	36

Synthèse

- erreurs moyennes:

	Résolution	Erreur sur la variation saisonnière	Erreur sur la variation
GRGS	400 km	2 cm	10 jours: 4-5 cm
CSR apodisation entre $n_1 = 20$ et $n_2 = 40$	500 km	3 cm	30 jours: 7 cm

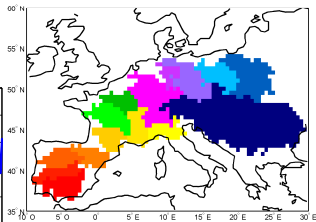
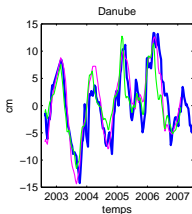
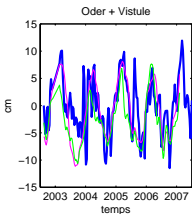
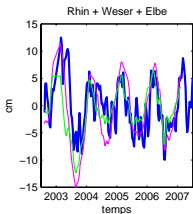
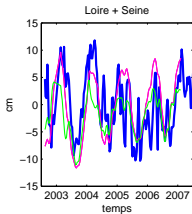
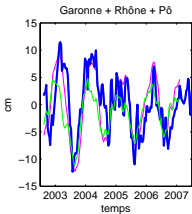
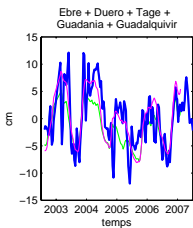
- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Variations de gravité et hydrologie en Europe

Variations de teneur en eau issues de GRACE

Bilan par groupes de bassins fluviaux

solutions GRACE (GRGS), modèles: ECMWF, GLDAS



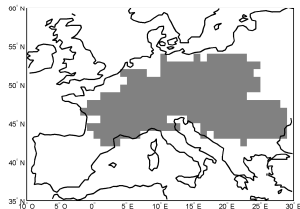
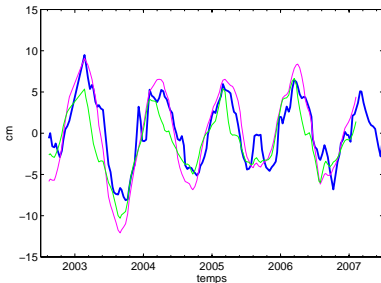
- été 2003: évènement sec partout sauf sur Oder+Vistule
- automne 2006: évènement sec (Rhin+Weser+Elbe, Espagne)
- bassin du Danube: meilleur rapport signal-sur-bruit et meilleur accord avec les modèles

Variations de gravité et hydrologie en Europe

Variations de teneur en eau issues de GRACE

Intégration sur un ensemble de bassins de 2 millions de km^2

solutions GRACE (GRGS), modèles: ECMWF, GLDAS



- bonne corrélation GRACE-modèles: 0.91, 0.81.
- déficit hydrique de l'été 2003: 5 cm (GRACE)
8 cm (modèles)
- fermeture du bilan hydrologique après 3 ans (GRACE, GLDAS)

- 1 Rappels théoriques sur les surcharges
 - Fonction de transfert de la gravité sol
 - Fonctions de transfert d'autres observables
- 2 Rapport g/u entre variation de gravité et déplacement vertical
 - Etude dans le domaine spectral
 - Etude numérique dans le domaine spatial pour différentes surcharges
- 3 Apports de la mission de gravimétrie spatiale GRACE
 - Résolution et précision des solutions de champ de gravité GRACE
 - Variations de gravité et hydrologie en Europe
 - Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

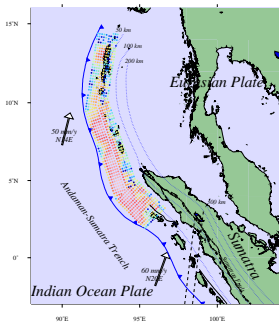
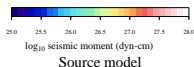
Présentation et objectifs de l'étude

Intérêt de ce séisme:

- dimension de la zone de rupture: $\sim 1200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$, $M_w = 9.1$
⇒ détection possible par GRACE
- mouvements verticaux + variation de densité
- domaine océanique

Objectifs:

- séparation des effets sismiques d'autres effets géophysiques (hydrologie, circulation océanique) et d'erreurs d'aliasing
- séparation des effets cosismique et postsismique
- modélisation de l'effet cosismique: approche globale avec PREM, réponse statique de l'océan.

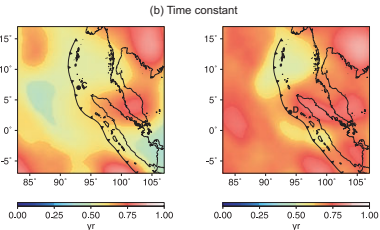
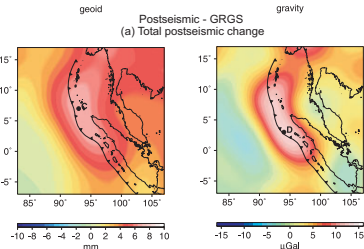
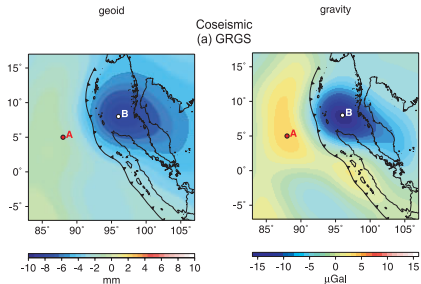


Modèle de la source d'Ammon
et al. 2005

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

Résultats

Effets cosismique et postsismique



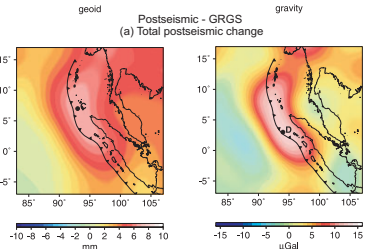
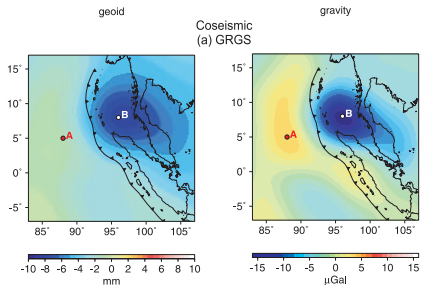
- cosismique min/max:
 -8 ± 0.6 / -1 ± 0.6 mm,
 -16 ± 2 / $+4 \pm 2 \mu\text{Gal}$

- postsismique max:
 6.8 ± 0.3 mm, $12.3 \pm 1.2 \mu\text{Gal}$
 constante de relaxation moyenne:
 $\tau = 0.6 \pm 0.07$ an (géoïde)
 $\tau = 0.7 \pm 0.15$ an (gravité)

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

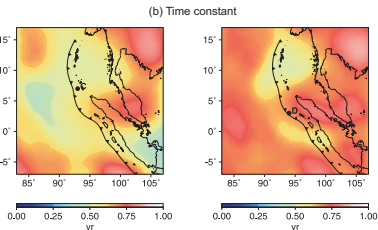
Résultats

Effets cosismique et postsismique



- cosismique min/max:
 -8 ± 0.6 / -1 ± 0.6 mm,
 -16 ± 2 / $+4 \pm 2 \mu\text{Gal}$

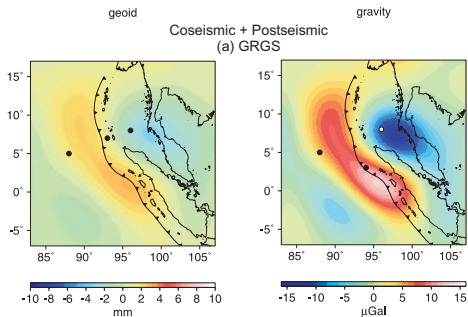
- postsismique max:
 6.8 ± 0.3 mm, $12.3 \pm 1.2 \mu\text{Gal}$
 constante de relaxation moyenne:
 $\tau = 0.6 \pm 0.07$ an (géoïde)
 $\tau = 0.7 \pm 0.15$ an (gravité)



Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

Résultats

Effet permanent 26 mois après le séisme



- signature cosismique non compensée par effet postsismique
- min/max:
-3.3 / 3.1 mm
-13.6 / +12.3 μGal

Modélisation de l'effet cosismique: théorie

- sommation des modes propres d'oscillation excités par le séisme pour PREM
- perturbation statique du potentiel gravitationnel due à une source ponctuelle en \mathbf{x}_S de moment sismique M_{ij} (Gilbert 1971):

$$V(r, \theta, \lambda) = \sum_{nlm} \frac{M_{ij} : \varepsilon_{ij}^{*(nlm)}(\mathbf{x}_S)}{n\omega_\ell^2} {}_n P_\ell(r) Y_{\ell m}(\theta, \lambda)$$

$n\omega_\ell$
 $\varepsilon_{ij}^{*(nlm)}(\mathbf{x}_S)$
 ${}_n P_\ell(r)$

fréquence propre du mode (nlm)

déformation causée par le mode (nlm) à la source

fonction propre radiale du mode (nlm)

Modélisation de l'effet cosismique: aspects numériques

- calcul des fonctions propres radiales: MINOS
 - convolution avec un modèle 3D de la source sismique (*Ammon et al. 2005*)
 - $\ell = 0 - 50$ avec apodisation entre 30 et 50
⇒ même résolution que les observations GRACE
- 1 calcul de la réponse de la Terre solide au fond de l'océan (MINOS)
 - 2 calcul de la réponse directe d'un océan global incompressible à partir du déplacement vertical et de la variation de potentiel au fond de l'océan

Modélisation de l'effet cosismique: aspects numériques

- calcul des fonctions propres radiales: MINOS
 - convolution avec un modèle 3D de la source sismique (*Ammon et al. 2005*)
 - $\ell = 0 - 50$ avec apodisation entre 30 et 50
⇒ même résolution que les observations GRACE
- 1 calcul de la réponse de la Terre solide au fond de l'océan (MINOS)
 - 2 calcul de la réponse directe d'un océan global incompressible à partir du déplacement vertical et de la variation de potentiel au fond de l'océan

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

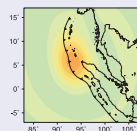
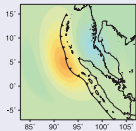
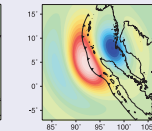
Modélisation de l'effet cosismique: résultats

Réponse de la Terre solide (MINOS)

Déplacement vertical

Géoïde

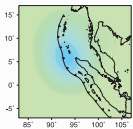
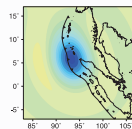
Gravité

-0.75 -0.50 -0.25 0.00 0.25 0.50 0.75
m-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse de l'océan

Géoïde

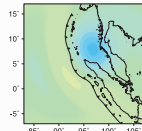
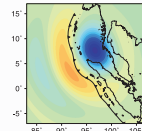
Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse totale

Géoïde

Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

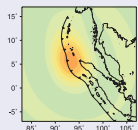
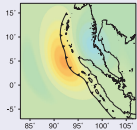
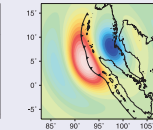
Modélisation de l'effet cosismique: résultats

Réponse de la Terre solide (MINOS)

Déplacement vertical

Géoïde

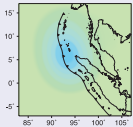
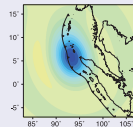
Gravité

-0.75 -0.50 -0.25 0.00 0.25 0.50 0.75
m-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse de l'océan

Géoïde

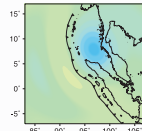
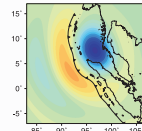
Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse totale

Géoïde

Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

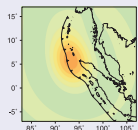
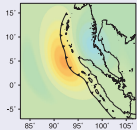
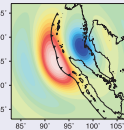
Modélisation de l'effet cosismique: résultats

Réponse de la Terre solide (MINOS)

Déplacement vertical

Géoïde

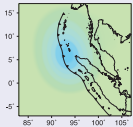
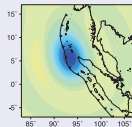
Gravité

-0.75 -0.50 -0.25 0.00 0.25 0.50 0.75
m-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse de l'océan

Géoïde

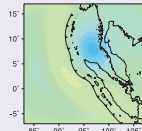
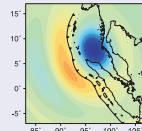
Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Réponse totale

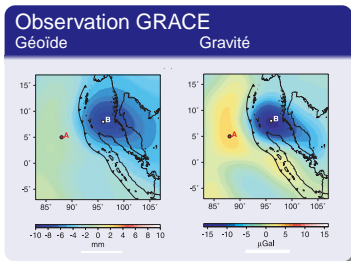
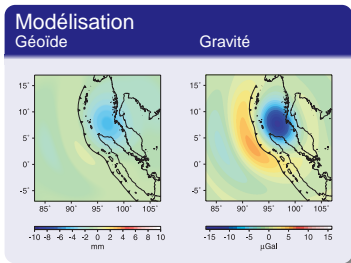
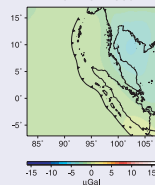
Géoïde

Gravité

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10
mm-15 -10 -5 0 5 10 15
 μGal

Signature gravitationnelle du séisme de Sumatra-Andaman

Effet cosismique: comparaison modèle/GRACE

Effet des variations non périodiques
Gravitéhydrologie + océan
GLDAS + ECCO

Conclusion (1)

- rapport g/u dans le cas d'une réponse élastique à différentes surcharges
 - entre -2 et $2 \mu\text{Gal mm}^{-1}$
 - ⇒ la conversion $g \Leftrightarrow u$ ne devrait pas faire intervenir le gradient à l'air libre ($-0.3 \mu\text{Gal mm}^{-1}$) ni le gradient de Bouguer ($-0.2 \mu\text{Gal mm}^{-1}$) comme cela est souvent le cas
 - ⇒ séparation nécessaire des différentes sources
 - dépend de la position des masses locales par rapport au gravimètre
 - proche de $-0.26 \mu\text{Gal mm}^{-1}$ à l'extérieur des masses

Conclusion (2)

- les estimations des variations du contenu en eau du sous-sol à partir des champs de gravité GRACE ont des précisions moyennes de 2 à 3 cm (annuelle) et 5 à 7 cm (à 10j ou 30j), à des résolutions de 400 à 500 km
- étude sur l'Europe des variations de contenu en eau (GRACE, modèles): malgré un signal faible et des bassins de petite taille, les solutions du GRGS restituent bien les évènements extrêmes; bonne corrélation avec les modèles
- approche originale de l'étude du séisme de Sumatra-Andaman
 - séparation des différents effets dans les données
 - modélisation de l'effet cosismique: modèle non plan et non homogène, réponse de l'océan \Rightarrow bon accord avec la signature cosismique observée (gravité), moins bon accord à grande longueur d'onde (geoïde)

Conclusion (2)

- les estimations des variations du contenu en eau du sous-sol à partir des champs de gravité GRACE ont des précisions moyennes de 2 à 3 cm (annuelle) et 5 à 7 cm (à 10j ou 30j), à des résolutions de 400 à 500 km
- étude sur l'Europe des variations de contenu en eau (GRACE, modèles): malgré un signal faible et des bassins de petite taille, les solutions du GRGS restituent bien les évènements extrêmes; bonne corrélation avec les modèles
- approche originale de l'étude du séisme de Sumatra-Andaman
 - séparation des différents effets dans les données
 - modélisation de l'effet cosismique: modèle non plan et non homogène, réponse de l'océan \Rightarrow bon accord avec la signature cosismique observée (gravité), moins bon accord à grande longueur d'onde (geoïde)

Conclusion (2)

- les estimations des variations du contenu en eau du sous-sol à partir des champs de gravité GRACE ont des précisions moyennes de 2 à 3 cm (annuelle) et 5 à 7 cm (à 10j ou 30j), à des résolutions de 400 à 500 km
- étude sur l'Europe des variations de contenu en eau (GRACE, modèles): malgré un signal faible et des bassins de petite taille, les solutions du GRGS restituent bien les évènements extrêmes; bonne corrélation avec les modèles
- **approche originale de l'étude du séisme de Sumatra-Andaman**
 - séparation des différents effets dans les données
 - modélisation de l'effet cosismique: modèle non plan et non homogène, réponse de l'océan \Rightarrow bon accord avec la signature cosismique observée (gravité), moins bon accord à grande longueur d'onde (géoïde)

Conclusion (3)

- déplacement vertical nécessaire à la comparaison entre mesures GRACE et mesures de gravité au sol, mais:
 - problème de la restitution par le GPS lorsque le signal est trop ténu (Europe) (*van Dam et al. 2007*), mais possible dans zones de mousson (intérêt du projet GHYRAF: Géodésie et Hydrologie en Afrique)
 - problème de la cohérence du choix de l'origine du repère pour les différents observables
- problème de la différence de résolution spatiale entre mesures au sol et mesures spatiales
⇒ utilisation du réseau GGP de gravimètres supraconducteurs en Europe: étude d'une méthode de décomposition en composantes principales

Conclusion (3)

- déplacement vertical nécessaire à la comparaison entre mesures GRACE et mesures de gravité au sol, mais:
 - problème de la restitution par le GPS lorsque le signal est trop ténu (Europe) (*van Dam et al. 2007*), mais possible dans zones de mousson (intérêt du projet GHYRAF: Géodésie et Hydrologie en Afrique)
 - problème de la cohérence du choix de l'origine du repère pour les différents observables
- **problème de la différence de résolution spatiale entre mesures au sol et mesures spatiales**
⇒ utilisation du réseau GGP de gravimètres supraconducteurs en Europe: étude d'une méthode de décomposition en composantes principales