

# Résumé

L'objectif de cette thèse est de modéliser les déformations élastiques terrestres résultant du changement actuel de l'épaisseur des glaciers et d'étudier comment, dans les observations géodésiques et gravimétriques, elles peuvent être séparées des déformations visco-élastiques consécutives à la déglaciation du Pléistocène qui s'est terminée il y a environ 10 000 ans. Pour calculer les déformations élastiques, nous convoluons les fonctions de Green du mouvement du sol et de la variation de la gravité pour un modèle de Terre sphérique avec les variations spatiales de l'épaisseur de glace. Nous considérons d'abord les glaciers du massif du Mont Blanc dans les Alpes françaises, où un amincissement significatif d'environ 2 m/an a été observé entre 1979 et 2004. Cette étape permet de montrer que les variations d'inclinaison du sol induites par les variations de l'épaisseur de glace sont bien supérieures à la sensibilité des inclinomètres hydrostatique à longue base. Le suivi des changements de masse des glaciers pourrait être effectué par ce type d'instruments. Ensuite, nous additionnons la déformation élastique au Svalbard, Norvège, estimée à partir de 6 modèles de fonte actuelle des glaces, et la déformation visco-élastique qui résulte de la dernière déglaciation de la fin du Pléistocène et qui est calculée à l'aide du logiciel SELEN 2.7 de Spada & Stocchi (2007). Ainsi, une diminution d'environ 25 km<sup>3</sup>/a du volume des glaciers permet d'expliquer les observations de déplacement du sol de 5.64 mm/a et de variation de la gravité de -1.02  $\mu$ Gal/a. La variation de gravité a été déterminée en répétant 6 mesures de gravité absolue entre 1998 et 2007 et en analysant les données d'un gravimètre relatif supraconducteur installé à Ny-Alesund. Toutefois, l'analyse des solutions de la mission de gravimétrie spatiale *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE) conduit à une variation de volume comprise entre -18 et -5 km<sup>3</sup>/a. En fait, il apparaît que la forte topographie présente dans cette région englacée ne peut être négligée pour expliquer les deux types d'observations. Nous étudions la séparation des effets des changements de masse passés et actuels à partir des observations sol ou satellite. Dans les régions englacées, en l'absence de topographie, l'utilisation des observations sol, vitesse de déplacement et taux de variation de gravité, et la prise en compte de deux rapports théoriques du taux de variation de gravité au sol avec la vitesse de déplacement du sol,  $C^V = -0.15 \mu\text{Gal}/\text{mm}$  et  $C^{e,N} = -0.26 \mu\text{Gal}/\text{mm}$  caractérisant respectivement les déformations visqueuses et élastiques, permet de séparer dans les observations les effets induits par les changements actuels des masses de glace de ceux induits par les changements passés. Dans les régions à forte topographie, le rapport  $C^{e,N}$  peut varier. Le contexte de glaciation/déglaciation passée et actuelle permet d'estimer un domaine de valeurs possibles pour ce rapport. Enfin, en supposant que les variations de gravité (GRACE) et de hauteur altimétrique (ENVISAT) observées en Antarctique sont liées aux changements de l'épaisseur de la calotte, nous avons évalué la perte de glace dans les régions des glaciers de Pine Island, Thwaites et Totten et l'accumulation de glace pour le glacier Kamb.

**Mots clés :** géodésie et gravimétrie, réajustement isostatique, fontes de glace passées et actuelles, visco-élasticité.

# Abstract

The aim of this thesis is to model the elastic deformations of the Earth induced by the current change of the thickness of glaciers and to study how, in the geodetic and gravity measurements, they can be separated from the visco-elastic deformations subsequent to the last Pleistocene deglaciation. To estimate the elastic deformations, we convolve the Green functions of the ground motion and the gravity variations for a spherical model of the Earth with the geographical variations of ice-mass bodies. We first study the Mont Blanc area in the French Alps where an important elevation change of glaciers,  $\sim 2$  m/yr between 1979 and 2004, has been recently observed. We show that the variations of the ground tilt due to changes in ice-thickness of the glaciers is well above the sensitivity of the long base hydrostatic tiltmeters. Such instruments can be used to monitor the time variations of ice masses. Next, we add the elastic deformations induced by current ice-mass changes in Svalbard, Norway, estimated from 6 models of ice thinning to the viscous deformations due to the last Pleistocene deglaciation and estimated using the SELEN 2.7 software of Spada & Stocchi (2007). We find that a decrease of about  $25 \text{ km}^3/\text{yr}$  of the volume of the glaciers can explain the observed ground displacement rate of  $5.64 \text{ mm/yr}$  and gravity variation of  $-1.02 \text{ } \mu\text{Gal/yr}$ . The gravity variation has been deduced from six repeated absolute gravity measurements between 1998 and 2007 and by analysing the time series of the superconducting gravimeter of Ny-Ålesund. However, the analysis of the solutions of the space gravity mission Grace Recovery And Climate Experiment (GRACE) leads to a volume change ranging between  $-18$  and  $-5 \text{ km}^3/\text{yr}$ . To explain ground and satellite measurements in such an ice covered area where topography is important, the topography of the glaciers has to be taken into account in the computation of the ground gravity changes. Then, we study the separation of effects induced by past and present ice-mass changes from ground and satellite observations. In regions covered by ice, with no topography, using ground observations, ground displacement et gravity variation rates, and taking into account the two theoretical gravity-variation-to-vertical-displacement ratios,  $C^V = -0.15 \text{ } \mu\text{Gal/mm}$  and  $C^{e,N} = -0.26 \text{ } \mu\text{Gal/mm}$  respectively for the viscous and elastic deformations, can lead to the separation in the observations of the effects induced by the current change of ice masses and that due to past changes. In regions where topography has a strong influence, the  $C^{e,N}$  ratio may change. The current and past glaciation/deglaciation context provides a range of possible values for this ratio. Finally, assuming that space gravity (GRACE) and altimetry (ENVISAT) observations in Antarctica are induced by the change of the thickness of the ice cap, we confirm the loss of ice mass in the regions of the Pine Island, Thwaites and Totten glaciers and the gain of ice mass for the Kamb glacier.

**Key words :** geodesy and gravity – glacial isostatic adjustment – past and current ice-mass changes – visco-elasticity.