

À l'intérieur et à la surface de la Terre, les déplacements de masses peuvent engendrer un déplacement du Centre de masse (CM) du « système Terre » (incluant les océans et l'atmosphère) par rapport au centre géométrique de la Terre solide ou Centre de figure (CF), et inversement. Lorsque l'on s'intéresse au comportement mécanique de la Terre, il est naturel de se positionner dans un référentiel dont l'origine est le centre d'inertie, c'est-à-dire le CM (Greff *et al.*, 2001). Pour cette raison, on désignera ici le « géocentre » comme le CF de la Terre en mouvement par rapport à un CM fixe (il faut noter cependant qu'il est fréquent, en géodésie et en astronomie, que le terme « géocentre » soit utilisé pour désigner le CM de la Terre et non le CF, notamment dans les conventions IERS).

Les systèmes de référence utilisés pour le positionnement sur Terre ont comme origine naturelle le CM de la Terre. C'est précisément le cas du Système international de référence terrestre (ITRS, en anglais). Les réalisations récentes de l'ITRS, ou Repères internationaux de référence terrestres (ITRF, en anglais), sont construites en combinant les repères individuels des observations de quatre techniques de géodésie spatiale : l'interférométrie à très longue base (VLBI), la télémétrie laser sur satellites (SLR), le radio-positionnement intégré par satellite (DORIS), et les techniques GNSS (GPS et GLONASS). L'origine de l'ITRF est en pratique confondue avec l'origine du repère individuel SLR, considérant que le centre de ce repère, qui est le point autour duquel orbitent les satellites SLR, est théoriquement le CM. En conséquence, l'ITRF est théoriquement centré sur un « CM moyen », moyenné sur le temps des observations SLR, et présentant une dérive linéaire (ou « séculaire ») moyenne.

Cependant, la position du CM à l'intérieur de la Terre n'est pas aisément accessible et son observation laisse apparaître des mouvements artificiels et/ou géophysiques à différentes échelles de temps qui pourraient affecter la précision et la stabilité à long terme du repère de référence terrestre, et donc la précision du positionnement sur Terre. L'avant-dernière réalisation de l'ITRS, l'ITRF2005, présente, le long de l'axe Z, une dérive de près de 1.8 mm/an par rapport à la réalisation précédente, l'ITRF2000, pouvant suggérer une large accélération du CM vers le pôle Sud ces dernières années, ou de manière équivalente, un mouvement du géocentre vers le pôle Nord (Altamimi *et al.*, 2005). Un tel changement d'origine est important, considérant que la stabilité de l'origine de l'ITRF est requise aujourd'hui à 0.1 mm/an pour les applications en sciences de la Terre. Il a été mis en évidence, par exemple, qu'une imprécision sur l'origine du repère peut avoir des répercussions fortes sur la détermination de l'élévation moyenne du niveau des mers (voir par exemple Collilieux *et al.*, *cet ouvrage*), élévation dont l'évaluation précise est cruciale aujourd'hui pour des raisons scientifiques et socio-économiques.

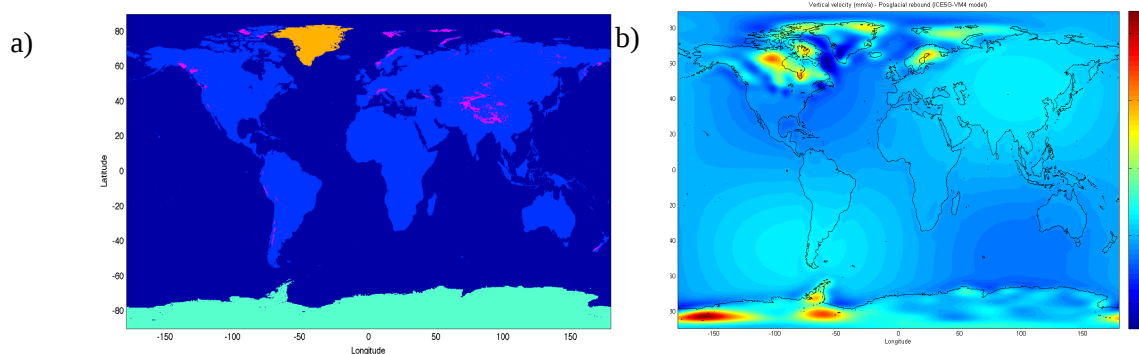


Fig. 1. a) Les quatre régions qui échangent de la masse en raison des changements climatiques récents : la calotte polaire du Groenland (orange), la calotte polaire de l'Antarctique (cyan), les glaciers (violet) et les océans (bleu foncé). b) Déplacement vertical du sol engendré par le rebond postglaciaire d'après le modèle ICE5G de (Peltier 2004).

L'ITRF2008, la dernière réalisation du système qui vient d'être finalisée, semble présenter une origine très proche de l'ITRF2005, laissant suspecter une imprécision sur la détermination de l'origine de l'ITRF2000 qui expliquerait le désaccord entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005. Se pourrait-il néanmoins que ce mouvement apparent du CM (ou du géocentre) soit vrai ? À quel mouvement est soumis le géocentre à long terme ? Est-ce qu'un mouvement séculaire du CM (ou du géocentre) pourrait induire une dérive de l'origine de l'ITRS visible entre ses différentes réalisations ? Nous n'avons, jusque récemment, qu'une très vague idée de l'évolution temporelle naturelle que devrait présenter l'origine de l'ITRF. Il faut dire que très peu d'études scientifiques se sont intéressées au mouvement « séculaire » du géocentre. Nous allons voir ici que ce mouvement, bien que n'expliquant pas complètement l'écart entre les différentes réalisations de l'ITRS, est probablement loin d'être négligeable, et qu'une des sources prépondérantes de ce mouvement est le changement climatique récent.

1. Une dérive du géocentre à long terme ?

Les mouvements décennaux et séculaires du géocentre sont dus à l'impact combiné de plusieurs phénomènes géodynamiques. Tout phénomène engendrant un déplacement de masses à l'intérieur ou à la surface de la Terre sur ces échelles de temps est susceptible d'engendrer de tels mouvements. Le rebond postglaciaire qui, en générant une remontée régulière du sol de quelques centimètres par an en Scandinavie et en Amérique du Nord (voir la Figure 1) en réponse à la dernière déglaciation (il y a quelques milliers d'années), modifie lentement la forme de la Terre et donc déplace son géocentre. Il a été montré que ce rebond postglaciaire peut engendrer un déplacement du géocentre au maximum de 0.5 mm/an (Greff-Lefftz, 2000). C'était, jusqu'il y a peu, la seule estimation d'un possible mouvement séculaire du géocentre dont nous disposions.

D'autres phénomènes sont pourtant susceptibles d'engendrer des mouvements du géocentre à long terme, comme par exemple la convection thermo-chimique dans le manteau terrestre, les changements de topographie dus à la tectonique des plaques, ou encore la dynamique du noyau externe. En collaboration avec Marianne Greff-Lefftz et Jean Besse de l'Institut de physique du globe de Paris, nous avons montré que ces phénomènes ne peuvent engendrer de mouvement supérieur au millimètre par siècle, ce qui est négligeable compte tenu de la précision des mesures de positionnement et des systèmes de référence aujourd'hui (Greff-Lefftz et al., 2010). Enfin, des déplacements du géocentre peuvent aussi être induits par la dynamique climatique. Les échanges de masses entre les enveloppes fluides de la Terre (l'atmosphère, les océans, l'hydrologie continentale et les calottes polaires) créent une surcharge sur la Terre solide qui déforme la surface terrestre, modifie le champ de pesanteur, et engendre potentiellement un mouvement du géocentre. Au cours des dernières décennies, de plus en plus d'observations ont mis en évidence des échanges de masses d'eau à très grande échelle entre les calottes polaires, les glaciers et les océans, dus à la fonte massive des glaces. Ces échanges seraient les conséquences des changements climatiques que nous connaissons ces dernières années.

2. La fonte des glaces récente

S'il est globalement accepté aujourd'hui que la calotte polaire du Groenland, la calotte polaire de l'Antarctique, et les glaciers dans le reste du monde, ont globalement diminué de taille durant les dernières décennies, l'ampleur des masses mises en jeu reste très débattue.

Au Groenland, différentes études combinant des observations d'interférométrie radar (satellites ERS), de gravimétrie spatiale (mission spatiale GRACE), ou de mesures de topographie (satellite ICESat), ont montré que la masse de la calotte polaire diminue à raison de dizaines à centaines de GigaTonnes par an (1 GigaTonne = 10^{12} kg). Cependant, les valeurs observées sont très variables selon les études. Une tendance semble néanmoins se dégager, suggérant que le taux de perte de masse a augmenté depuis la dernière décennie, et peut-être même encore plus ces cinq dernières années. Les différentes études qui ont quantifié ces pertes globales de masses ont été répertoriées dans la Figure 2 (pour la liste précise des études scientifiques voir (Métivier et al., 2010)). La masse estimée et l'erreur sur ces estimations sont représentées dans la figure sous forme de barres allongées de différentes couleurs.

En Antarctique, comme le montre la Figure 2, les fluctuations de masse de la calotte polaire sont aujourd'hui encore très mal contraintes. Certains scénarios, minoritaires, suggèreraient même que la calotte polaire gagnerait de la masse chaque année. Dans le détail, il est aujourd'hui unanimement observé que la calotte diminue en Antarctique Ouest. Il est cependant possible qu'elle augmente légèrement à l'est. La majeure partie des études s'accorde cependant à dire que la variation totale de masse reste globalement négative sur l'Antarctique. Une des raisons qui expliquent les divergences d'observations dans cette région est la très mauvaise connaissance du rebond postglaciaire en Antarctique.

Enfin l'ensemble des glaciers ailleurs dans le monde perd entre 100 et 400 GigaTonnes/an de masse (d'après le rapport du GIEC). Cette perte se serait accélérée pendant ces dix dernières années.

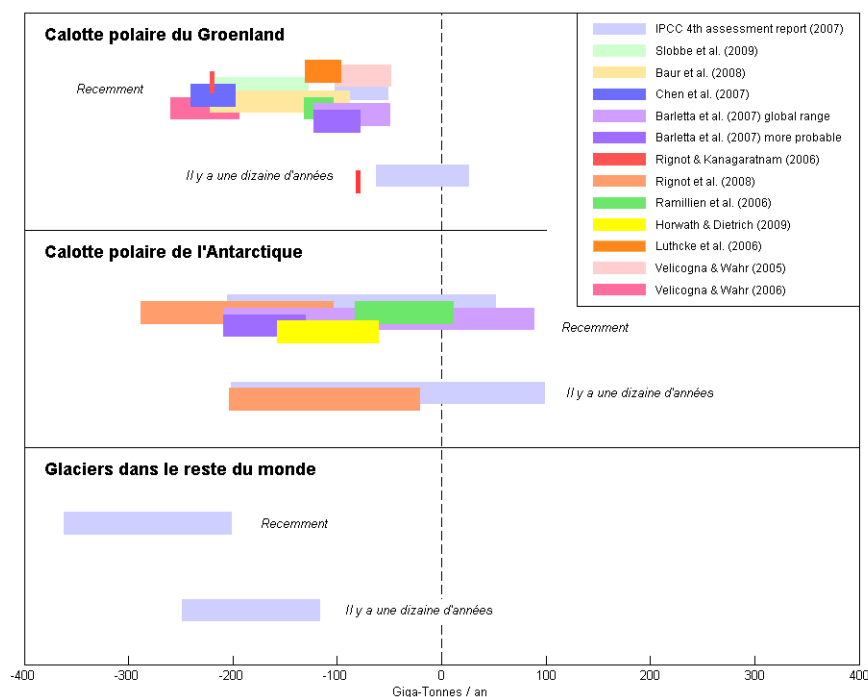


Fig. 2. Variations globales de masse de glace en Giga-Tonnes/an (i. e. 10^{12} kg/an) sur les calottes polaires et les glaciers d'après différentes études publiées. La longueur des barres colorées reflète l'incertitude des estimations de masse de chaque étude. On note par « récemment » des estimations de masses basées sur des observations sur une période de moins de 10 ans et incluant des données après l'année 2000. On note par « il y a une dizaine d'années » des estimations basées sur des observations réalisées dans les années 90 ou sur une période de plus de 20 ans. L'« IPCC 4th assessment report » est le rapport 2007 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

3. Les déformations de la Terre et le mouvement du géocentre actuel

La fonte des glaces allège la charge exercée par les calottes et les glaciers sur la croûte terrestre et provoque ainsi une déformation de la Terre en surface. À la fonte des glaces s'ajoute une élévation du niveau des mers qui charge la croûte terrestre en zone océanique. Il est important de noter que l'élévation des mers n'est pas homogène car la fonte de la glace s'accompagne d'un changement de la pesanteur locale, ce qui a pour conséquence de modifier le géoïde. Or le géoïde est la surface équipotentielle sur laquelle s'aligne le niveau des océans au repos (hors courants et marées). Cela a pour conséquence, en apparence paradoxale, que lorsque la glace fond au Groenland, le niveau des mers baisse fortement autour du Groenland et augmente lorsque l'on s'en éloigne. Cependant, la moyenne sur l'ensemble des océans est positive, à proportion de la masse perdue au Groenland (Mitrovica et al., 2001).

Sans entrer dans les détails, nous avons calculé pour chaque scénario de fonte de glace l'évolution théorique attendue du niveau des mers, tant spatiale que temporelle. Nous avons ensuite calculé la déformation gravito-élastique de la Terre engendrée par la diminution de la masse de glace et

le chargement des océans, en nous basant sur la théorie classique des nombres de Love. Le calcul est ensuite itéré jusqu'à convergence vers un équilibre, car la déformation modifie à son tour le géoïde et donc le niveau des mers, etc. Une fois que l'on connaît la déformation globale, on en déduit la forme globale de la Terre et son évolution. On définit alors la position r en tout point en surface dans un repère centré sur le CM. La position du CF par rapport au CM est donc :

$$\vec{x}_{CF}(t) = \frac{1}{S_T(t)} \int_{S_T(t)} \vec{r}(t) dS$$

avec S_T la surface de la Terre solide et t le temps. On notera que la surface de la Terre varie aussi légèrement au cours du temps à cause des déformations.

À partir des observations collectées, nous avons calculé la gamme des déplacements séculaires possibles du géocentre. La Figure 3 présente les différentes composantes de la vitesse du géocentre engendrée par les fonte des glaces actuelle et passée, ainsi que par le rebond postglaciaire. Les valeurs pour le rebond postglaciaire sont directement tirées des travaux de (Greff-Lefftz, 2000).

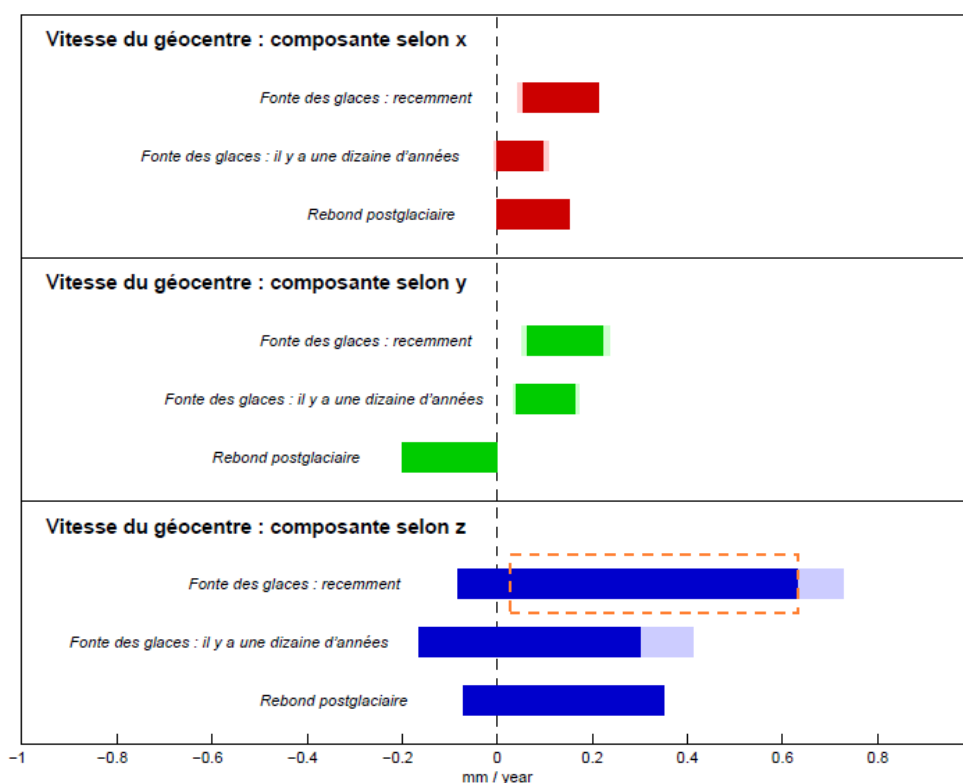


Fig. 3. Les différentes composantes de la vitesse du géocentre engendrées par la fonte de glace actuelle, la fonte de glace passée et le rebond postglaciaire. Les composantes X et Y sont orientées dans le plan équatorial, la composante z est selon l'axe nord-sud. Les barres de couleur reflètent la gamme des valeurs possibles des mouvements du géocentre calculée d'après des observations et leurs incertitudes (voir Figure 2). Lorsque la couleur est foncée, la variation de masse en Antarctique est négative (cas le plus probable). Les couleurs pâles représentent les autres modèles moins probables. Le cadre orange reflète le résultat lorsque les observations incluent des données plus récentes que 2005 (date d'une possible accélération de la fonte des glaces). Enfin les résultats pour le rebond postglaciaire sont directement tirés des travaux de (Greff-Lefftz 2000).

Comme le montre la Figure 3, le mouvement séculaire du géocentre induit par la fonte des glaces est relativement petit le long des axes X et Y (dans le plan équatorial), moins de 0.2 mm/an, et a peu changé ces dernières années. En revanche le déplacement peut atteindre 0.7-0.8 mm/an le long de l'axe Z en direction du Nord. La gamme de valeurs possibles est cependant très large (bleu foncé et bleu clair) ; elle est principalement due à l'incertitude sur le bilan de masse en Antarctique. En effet, certaines études concluent qu'il est possible, bien que peu probable, que la calotte polaire gagne de la masse en moyenne chaque année. Si l'on suppose que la variation de masse en Antarctique est négative, alors la gamme de valeurs possibles est plus réduite (bleu foncé). Elle est d'autant plus réduite si l'on ne considère que les

études qui exploitent des observations au Groenland plus récentes que 2005 (pointillés orange), ce qui tendrait à suggérer une accélération du géocentre depuis les dix dernières années. Il est cependant difficile de conclure sur l'existence de cette accélération, les scénarios possibles étant assez variés. En sommant la contribution due à la fonte des glaces et le rebond postglaciaire, on voit que la vitesse du géocentre peut aisément atteindre plus de 1 mm/an sur l'axe Z, ce qui implique un déplacement du géocentre vers le nord, ou inversement un déplacement du CM vers le sud. Ce résultat semble en cohérence avec la tendance observée entre les réalisations de l'ITRS. Cependant, si une accélération du géocentre a eu lieu ces dernières années de façon à expliquer la différence entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005, elle ne pourrait ici être due qu'à la fonte des glaces et non au rebond postglaciaire dont l'effet est théoriquement homogène sur le dernier siècle. En conséquence, la dérive de l'origine entre ces deux repères ne pourrait être supérieure à approximativement 0.3-0.6 mm/an comme le montre la Figure 3. Le mouvement séculaire du géocentre, bien que loin d'être négligeable, ne peut expliquer l'écart entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005, ce qui conforte l'analyse de l'ITRF2008 qui tend à montrer que l'origine de l'ITRF2000 était inexacte.

L'analyse des données ITRF2008 nous permettra de rechercher si ce mouvement séculaire est détectable à l'échelle globale grâce aux observations de positionnement. Si l'on peut contraindre, grâce à l'ITRF, la dérive long terme du géocentre, alors on pourra en retour apporter une nouvelle information sur les mouvements de masse en surface, sur les bilans de la fonte des glaces, particulièrement en Antarctique, et contribuer à l'analyse des changements climatiques de ces dernières années.

Remerciements

Nous remercions le CNES pour le soutien qu'il apporte à ces travaux au travers de la proposition de recherche scientifique « Repère international de référence terrestre (ITRF) ».

Pour en savoir plus ...

Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, C. Boucher (2007) ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, n. B09401, doi: 10.1029/2007JB004949.

Collilieux, X., A. Santamaría-Gómez, G. Wöppelmann, Z. Altamimi, P. Bonnefond, P. Willis, C. Boucher, M.-N. Bouin (2011) Importance du système terrestre dans la mesure du niveau des mers. *Cet ouvrage*.

Greff, M., R. Biancale, J.-F. Crétaux, J.-M. Lemoine, S. Loyer, H. Legros, P. Gegout, M. Feissel, P. Sillard, P. Exertier (2001) Le géocentre : concepts, définition et réalisation. *Note du groupe de recherche AGRET*, <http://grgs.obs-mip.fr/index.php/fre/content/download/590/3620/file/geocentre.pdf>.

Greff-Lefftz, M. (2000) Secular variation of the geocenter. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, n. B11, p. 25685-25692.

Greff-Lefftz M., L. Métivier, J. Besse (2010) Dynamic mantle density heterogeneities and global geodetic observables. *Geophysical Journal International*, vol. 180, p. 1080-1094, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04490.x.

Métivier, L., M. Greff-Lefftz, Z. Altamimi (2010) On secular geocenter motion: The impact of climate changes. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 296, p. 360-366, doi: 10.1016/j.epsl.2010.05.021.

Peltier, W. R. (2004) Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 32, p. 111-149.