

Cartographie à haute résolution de la perte de masse des glaciers au Yukon et en Alaska dérivée de données de GRACE

Cheick Doumbia (1), Pascal Castellazzi (2), Alain N. Rousseau (1), Macarena Amaya (3)

(1) Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, Canada, G1K 9A9 (cheick.doumbia@ete.inrs.ca)

(2) Commonwealth Science and Industrial Research Organisation (CSIRO), Land and Water, Waite Rd, Urrbrae SA 5064, Australia

(3) Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Paseo del Bosque s/n, B1900FWA La Plata, Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCTION

Contexte

Dans le cadre de la mise en place d'un système de prévision hydrologique sur le bassin versant amont de la rivière Yukon, des simulations de débit ont été réalisées sans prendre en compte la fonte des glaciers ayant une surface totale de 980 km². Tel que le montre la figure 1. (II), les débits observés (en bleu) ont une amplitude supérieure à celle des débits simulés (en rouge).

De nombreuses études montrent qu'il est possible de caractériser la fonte des glaciers grâce aux données gravimétrique GRACE (cf. tableau 1). Au cours de cette étude, nous exploitons à partir de ces données mensuelles dans le temps, une méthode d'inversion sur les territoires de l'Alaska, du Yukon et de la Colombie Britannique permettant de tenir compte de petites surface de glaciers.

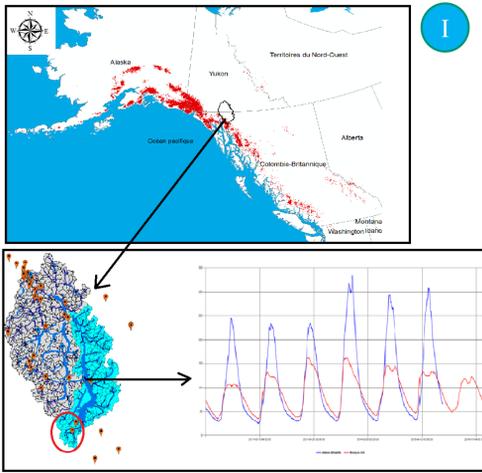


Fig. 1. (I) Zone d'étude GRACE, (II) Bassin versant amont de la rivière Yukon

Etat de l'art

Depuis son lancement en 2002, plusieurs études ont été réalisées dans la région du Golfe d'Alaska, à partir de GRACE.

La mission gravimétrique GRACE est constituée de deux satellites. Elle permet de mesurer les variations spatio-temporelles du champ de gravité et donc les variations de masse dans le système terrestre. Sa fréquence temporelle est mensuelle ou décennale (Baghdadi et Zribi, 2017).

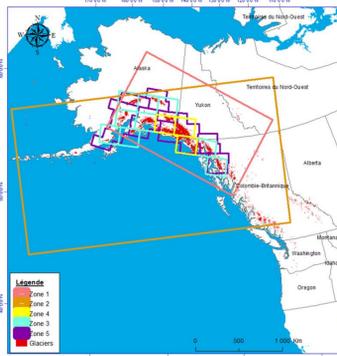


Fig. 2. Représentation des zones glaciaires des études précédentes

Tableau 1. Bilan des études précédentes sur les variations de masse des glaciers dans notre zone d'étude

Zone	Auteurs	Période	Méthodes (Solution GRACE / autres)	Perte (10 ⁶ m ³ /an)	Source	Surface de glaciers (km ²)
1	Tamsiea et al. (2005)	2002-2004	- Moyennes régionales - Utilisation d'un filtre Gaussien - Degré et ordre et troncature = 70 - Pas de correction pour le mouvement du géocentre - Non prise en compte de l'ajustement isostatique et d'autres plus petits.	-140000	GRACE	44041
2	Chen et al. (2006)	2002-2005	- Degré et ordre et troncature = 60 - 2 techniques de lissage optimisées - Corrections : fuites et TWS estimé par GILDAS - Élimination d'effets importants des données GRACE	-101000	GRACE	50725
3	Luthcke et al. (2008)	2003-2006 (Période) 2003-2007 (Période)	- Utilisation des données GRACE KBR - Solutions corrigées avec des modèles statiques et des modèles variables dans le temps - 12 Mascons de résolutions = 10 jours et ~ 49000 km ²	-111268 -91630	GRACE	37882
4	Arendt et al. (2008)	2003-2007	- Mascons 6, 7 et 10 (Luthcke et al. (2008)). - Après corrections des signaux de gravité résiduels, variations de masse des glaciers considérées de façon homogène à l'intérieur d'un mascon. - Altimétrie par laser aéroporté	-22472 -23126	GRACE Altimétrie ICESat	11639
5	Arendt et al. (2013)	2003-2009 (Période) 2003-2010 (Période) 2003-2009	- Solution de haute résolution développée par la NASA à partir des observations GRACE KBR. - Mascons de résolutions = 10 jours et ~ 25000 km ² - Signaux des glaciers isolés par modélisation - Corrections du géocentre - Réduction du résidu par itération (3 fois) - Application du filtre Gaussien - Altimétrie ICESat	-66543 -77451 -70906	GRACE Altimétrie ICESat	39557

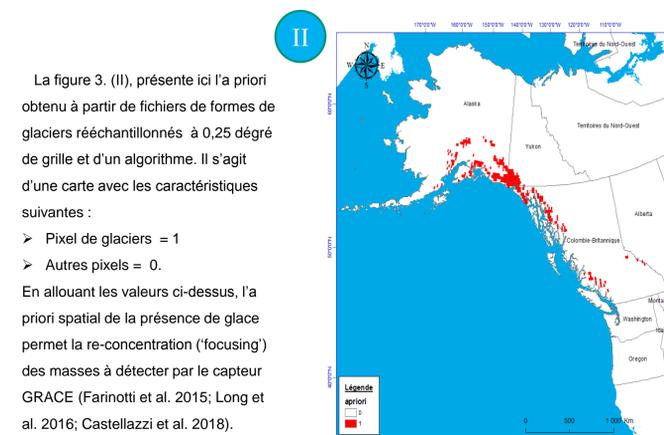
- La surface des glaciers est de 980 km² et occupent donc ~ 5 % de la surface totale du bassin versant amont de la rivière Yukon (Samuel et al., 2016).
- Les précédentes études portent sur des surfaces plus importantes avec une surface de mascon minimale de ~ 49 000 km² (Luthcke et al., 2008).

MATERIELS & METHODES

Données



Cette figure 3. (I), présente les données d'entrée utilisées dans le cadre de la méthode d'inversion. Il s'agit de fichiers de formes de glaciers mis en ligne par US National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, <http://nsidc.org/glims/>.



La figure 3. (II), présente ici l'a priori obtenu à partir de fichiers de formes de glaciers rééchantillonnés à 0,25 degré de grille et d'un algorithme. Il s'agit d'une carte avec les caractéristiques suivantes :

- Pixel de glaciers = 1
- Autres pixels = 0.

En allouant les valeurs ci-dessus, l'a priori spatial de la présence de glace permet la re-concentration ('focusing') des masses à détecter par le capteur GRACE (Farinotti et al. 2015; Long et al. 2016; Castellazzi et al. 2018).

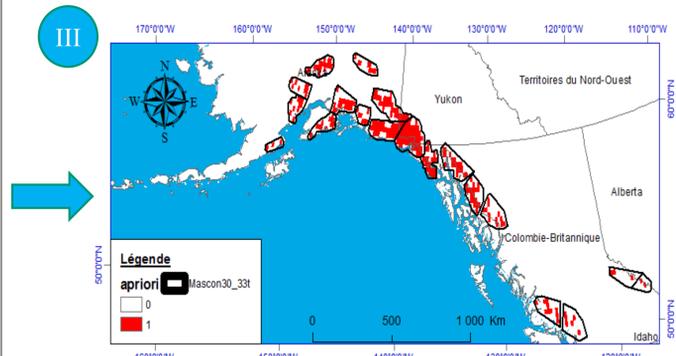
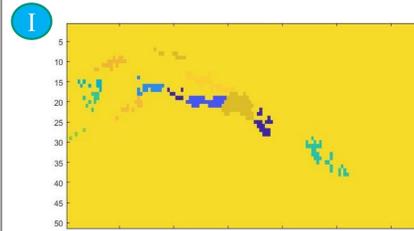


Fig. 3. (I) Shapefile de glaciers, (II) a priori, (III) Délimitation des zones de concentration de masse (mascon).

Quatre scénarios de délimitation de masse de concentration (mascon) ont été mis en œuvre au cours de cette étude dans l'optique de se rapprocher des valeurs de référence. Les surfaces de ces mascons varient entre ~ 5000 km² et ~50 000 km².

Il existe plusieurs solutions GRACE caractérisant les variations temporelles de masse dues aux masses d'eau continentales (TWS). Cette étude ne prend en compte que l'une d'entre elles.

Inversion



Des valeurs de flux de masse sont allouées par un algorithme génétique à chaque Mascon jusqu'à convergence vers une carte de flux dérivée du signal GRACE.

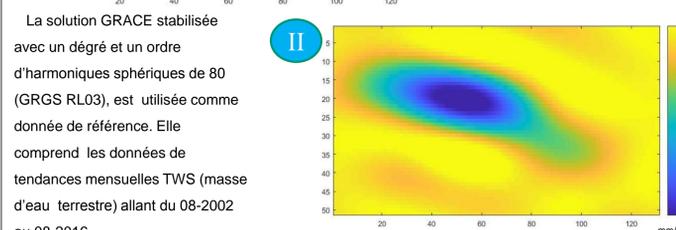


Fig. 4. (I) Exemple de scénario de mascon retenus pour l'inversion, (II) Tendances mensuelles de la solution GRGS RL03 du 08-2002 au 08-2016 (mm/an).

Les solutions de variation de masse d'eau terrestre TWS comprennent différents éléments (cf. Equation 1). Compte tenu de l'importante surface glaciaire de la zone Alaska, Yukon et Colombie Britannique, nous émettons l'hypothèse que les variations de glaciers sont plus importantes (cf. Equation 2).

$$\Delta TWS = \Delta GWS + \Delta SMS + \Delta IS \quad \text{Equation 1}$$

$$\Delta TWS = \Delta I \quad \text{Equation 2}$$

Δ: Variation; TWS : Terrestrial Water Storage; IS : Ice and Snow; SMS : Soil Moisture ; GWS : Groundwater

RESULTATS & DISCUSSIONS

Inversion

Les quatre différents scénarios simulés au cours de cette étude donnent des pertes du même ordre de grandeur.

Tableau 2. Résultats des quatre types de scénarios

	Mascon30_31t	Mascon30_32t	Mascon30_33t	Mascon30_34t
Nombre mascons	12	20	19	15
RMS (mm/an)	7,4091	6,3325	7,0062	6,2965
Perte totale glaciers (mm/an)	-102513,17	-113253,83	-104621,84	-118194,33
Evolution diffuse (mm/an)	-15444,38	2421,29	-9845,23	6519,81
Moyenne résiduelle (mm/an)	7,5954	6,7672	7,1067	6,3606
Erreur absolue (%)	0,0049	0,0043	0,0046	0,0041
Perte totale glaciers (10 ⁶ m ³ /an)	-38629	-42675	-39421	-44539
Surface (km ²)	55832			

Pour toute la région à l'étude, une perte totale d'environ 109 646 mm/an a pu être détectée et des cartes à haute résolution des pertes de masses ont été produites.

Les paramètres RMS et moyenne résiduelle caractérisent l'erreur moyenne entre la solution GRGS RL03 et les résultats de simulation. Sur les différents scénarios, nous avons ainsi une moyenne d'erreur d'environ 7mm/an. L'erreur absolue par rapport au taux de perte de masse annuelle est d'environ 0,0040%.

Ces faibles valeurs d'erreur confortent notre hypothèse affirmant que les glaciers sont les principales masses d'eau induisant les variations de masse dans notre région d'étude. En outre, l'influence du nombre de mascons semble donc être négligeable dans cette région.

Comparaison

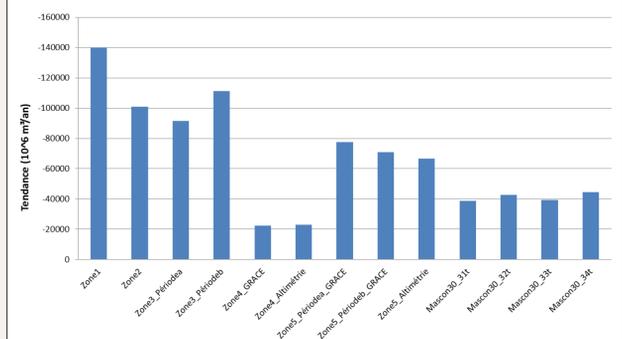


Fig. 5. Comparaison de nos résultats avec ceux recensés des études réalisées dans la même région avec des surfaces glaciaires différentes (cf. Tableau 1)

Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de différentes études réalisées dans la région d'étude. Nos résultats montrent des pertes de masse inférieures de 38 à 71% à celles obtenues dans les précédentes études suivant les méthodes et la surface glaciaire utilisées. Cela pourrait s'expliquer par la haute résolution spatiale de la méthode d'inversion qui tient compte exclusivement des pertes liées aux glaciers.

CONCLUSIONS

A la suite de cette étude, des cartes de haute résolution de perte de masses de glaciers situés sur les territoires de l'Alaska, du Yukon et de la Colombie Britannique ont pu être produites. La convergence de l'algorithme génétique avec une incertitude d'environ 0,0040%, permet d'observer la robustesse de la procédure d'inversion. La comparaison de nos résultats obtenus à partir de la solution grgs avec ceux de la littérature montre des différences de 38 à 71% en moins. Ce qui est plausible compte tenu de la haute résolution spatiale de cette étude. La technique utilisée a ainsi permis la discrimination des masses tout en respectant la distribution spatiale de l'a priori, c'est-à-dire la séparation des masses liées aux glaciers versus celles des eaux de surface ou de l'humidité du sol.

Notre étude montre ainsi la possibilité de déterminer les variations de masse de glaciers tant à une échelle régionale que locale. L'approche méthodologique utilisée permettrait entre autres d'étudier l'apport des glaciers de cette région à l'élévation du niveau marin. Avec la variation des débits estivaux, le calage des modèles de fonte de glaciers des modèles hydrologiques et la gestion des ressources en eau de l'Alaska, du nord de la Colombie Britannique et du Yukon peuvent être assurés.

En outre, la fonte des glaciers est un processus dynamique ayant lieu entre la zone d'accumulation et d'ablation. Elle est dirigée par les échanges d'énergie entre la surface des glaciers et l'atmosphère (Paterson, 1969 et Hock, 2005). Ce qui montre les limites des méthodes de quantification des pertes basées sur des observations de terrain ou des données satellitaires classiques. Dans ce contexte, l'utilisation de données gravimétrie reste une bonne alternative.

LIMITES & PERSPECTIVES

Limites

- Pour les données GLIMS, seuls les polygones de glaciers complexes sont représentés pour certaines régions (Huss et Farinotti, 2012).
- Il existe très peu d'études ayant utilisé cette même méthode d'inversion.
- Une seule solution a été utilisée au cours de cette étude.

Perspectives

- Utilisation d'autres solutions GRACE.
- Comparaison avec le bilan de masse de glaciers spécifiques obtenus par d'autres méthodes.
- Validation du modèle de prévision hydrologique HYDROTEL sur le bassin versant amont de la rivière Yukon.

REFERENCES

- Arendt, A., Luthcke, S., Gardner, A., O'neel, S., Hill, D., Moholdt, G., & Abdalati, W. (2013). Analysis of a GRACE global Mascon solution for Gulf of Alaska glaciers. *Journal of Glaciology*, 59(217), 913-924. doi:10.3189/2013jgl12j197
- Arendt, A. A., Luthcke, S. B., Larsen, C. F., Abdalati, W., Krabill, W. B., & Beedle, M. J. (2008). Validation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St. Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry. *Journal of Glaciology*, 54(188), 778-787. doi:10.3189/002214308787780067
- Baghdadi et Zribi (2017) Observation des surfaces continentales par télédétection micro-onde. Volume 2. Série Télédétection pour l'observation des surfaces continentales.
- Castellazzi, P., Longuevergne, L., Martel, R., Rivera, A., Brouard, C., & Chaussard, E. (2018). Quantitative mapping of groundwater depletion at the water management scale using a combined GRACE/InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 205, 408-418. doi: 10.1016/j.rse.2017.11.0255
- Chen, J. L., Tapley, B. D., & Wilson, C. R. (2006). Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2), 353-363. doi: 10.1016/j.epsl.2006.05.039
- Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., ... Günther, A. (2015). Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8, 716. doi: 10.1038/ngeo2513
- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography* 29, 3, 362-391. doi: 10.1191/0309133305pp453ra
- Huss, M., and D. Farinotti (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *J. Geophys. Res.*, 117, F04010. doi:10.1029/2012JF002523
- Luthcke, S. B., Arendt, A. A., Rowlands, D. D., McCarthy, J. J., & Larsen, C. F. (2008). Recent glacier mass changes in the Gulf of Alaska region from GRACE mascon solutions. *Journal of Glaciology*, 54(188), 767-777. doi:10.3189/002214308787779933
- Paterson, W. S. B. (1969). *The Physics of Glaciers*, U.K., Oxford: Pergamon.
- Samuel, J., J. Kavanaugh, B. Benkert, M. Samolczyk, S. Laxton, R. Evans, S. Saal, B. Horton, J. Clague, Z. Harner, L. Kinneer. 2016. Evaluating climate change impacts on the upper Yukon River basin: Projecting future conditions using glacier, climate and hydrological models. Whitehorse, Yukon: Northern Climate ExChange, Yukon Research Centre.
- Tamsiea, M. E., E. W. Leuliette, J. L. Davis, and J. X. Mitrovica (2005). Constraining hydrological and cryospheric mass flux in southeastern Alaska using space-based gravity measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20501. doi:10.1029/2005GL023961.