

Etude de la précision du satellite lidar GLAS/ICESat pour l'altimétrie des eaux continentales

Nicolas Lemarquand¹, Nicolas Baghdadi¹ et Jean-Stéphane Bailly²

¹ CEMAGREF, UMR TETIS, 500 rue François Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France

² AgroParisTech, UMR TETIS, 500 rue François Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France.

nicolaslemarquand@hotmail.com

Résumé

Pour le siècle à venir, la maîtrise des ressources en eau potable sera certainement la clé de tous les enjeux pour des milliards d'êtres humains. Malheureusement, une diminution du nombre de stations limnimétriques est observée, ainsi qu'une baisse de la qualité des mesures. La télédétection, qui a vu l'essor de nombreux satellites altimétriques radar et plus récemment la mise en orbite du satellite lidar ICESat, pourrait être une alternative intéressante pour le suivi des réseaux hydrologiques.

L'objectif de cette étude est d'estimer le potentiel d'ICESat pour la surveillance des eaux continentales à travers les cas du lac Léman (Suisse et France) et des rivières de la France métropolitaine. Nous nous sommes d'abord intéressés à la précision du satellite ICESat sur le lac Léman par comparaison des données satellitaires aux données de références mesurées par stations limnimétriques. Deux stations limnimétriques (Chillon et Saint Prex) ont été utilisées pour évaluer la précision des altitudes ICESat. Avant tout, il était nécessaire de convertir les différentes données dans un même système de référence pour procéder à la comparaison des deux jeux de données. Les données ICESat, initialement définies dans l'ellipsoïde Topex, ont été converties en altitudes orthométriques par une translation entre l'ellipsoïde Topex et le WGS84 et par une conversion vers le système de référence vertical IGN69 (RGF93) avec la grille RAF98. Ensuite, les spots « eau seule » ont été extraits trace par trace. Enfin, l'altitude moyenne a été déterminée pour chacune des traces puis comparée aux données de références.

L'erreur RMS est de 33 cm ($-0.20 \text{ cm} \pm 0.21 \text{ cm}$) sans la correction de saturation. Quand la correction de saturation est utilisée la qualité des mesures est améliorée : l'erreur RMS est alors de 14 cm ($0.01 \text{ cm} \pm 0.10 \text{ cm}$). Cependant, les profils temporels GLAS montrent une adaptation lente du capteur GLAS. A la transition terre-eau, les premiers spots ont une altitude plus importante que celle des références de 30 cm à 50 cm. Le laps de temps nécessaire pour un retour à la normale est de 0.2s. Cela correspond à 8 mesures et une distance d'adaptation de 1,360 km. Quand les spots de transition sont écartés, la précision des altitudes ICESat est de 5 cm. Il apparaît donc que les objets d'étude de petites dimensions, tels que les petits lacs et les petites rivières sur lesquels ne peut être appliquée une marge de 1,5 km, ne peuvent faire l'objet d'une surveillance satellitaire précise avec le satellite ICESat.

Pour illustrer cette hypothèse, la précision d'ICESat fut évaluée sur les cours d'eau ayant une largeur plus importante que la taille de l'empreinte d'un spot au sol (environ 55 m pour le laser 3). L'erreur RMS trouvée est de 1,15 m ($0,03 \text{ m} \pm 1,17 \text{ m}$) principalement due au temps d'adaptation d'ICESat aux transitions terre-eau. En définitive, le satellite ICESat n'est pas adapté à la surveillance des eaux continentales.

Mots Clés : ICESat, lidar, altimétrie satellitaire, lac, rivière, station limnimétrique

Abstract

For the coming century, the control of water resources will be certainly the key of all the stakes for billions of human beings. Unfortunately a reduction in the number of stations is observed with a decline of measurements quality. Remote sensing, which saw the development of numerous satellite radar altimeters and more recently the launch of the satellite lidar ICESat, could be an interesting alternative for the study of the hydrological networks.

The objective of this study is to estimate the potential of ICESat for monitoring continental water missions through the cases of the Lake Geneva (Switzerland and France) and rivers of Metropolitan France. Our first axis of study

concerned the satellite-based assessment of ICESat on the Lake Geneva by comparing laser data to hydrological gauge water levels. Two hydrological stations (Chillon and Saint Prex) were used to evaluate the accuracy of ICESat elevations. First it was necessary that all data was in the same datum to conduct a consistent comparison. ICESat elevations, which are referenced in the Topex ellipsoid, were converted into orthometric elevations by a translation between Topex ellipsoid and WGS84 and then into the vertical reference IGN69 (RGF93) with the grid RAF98. The shots of water alone were then extracted track by track and the mean elevation calculated for each track was used for the comparison with reference elevations (hydrological gauges).

The error RMS is 33 cm (-0.20 cm ± 0.21 cm) without any saturation correction. When the saturation correction is supplied and different from -999.000, the quality of water elevation data is improved : the error RMS is 14 cm (0.01 cm ± 0.10 cm). However GLAS temporal profiles show a slow progressive adaptation of GLAS sensor before proposing correct elevations. On the passage of ICESat from the land to water, the first spots elevations are higher than reference elevation and the following spots from 30 cm to 50 cm. The progressive return to the normal can last 0.2 s. It corresponds to 8 measurements and an adaptation distance of 1.360 km. When the transition footprints are excluded, the accuracy for the ICESat elevation measurements is 5 cm. Besides hydrological objects with a small size (small lakes, small rivers), which can not apply a margin of 1.5 km to remove transition footprints, could not be monitoring using ICESat with a good accuracy.

Next the accuracy of ICESat was investigated on French rivers with a width larger than the size of ICESat footprint (about 55 m for the laser 3). The error RMS is 1.15 m (0.03 m ± 1.17 m) due to the time of ICESat adaptation on the passage from land to water. ICESat is not adapted for the monitoring of the continental water resource.

Keywords : *ICESat, lidar, satellite altimetry, lake, river, tide gauge*

1. Introduction

Dans les décennies à venir, le problème de l'approvisionnement en eau douce, en termes de qualité et de quantité, sera capital. Pour le moment, on estime à un milliard le nombre d'individus connaissant un manque d'eau pour leur consommation quotidienne et ce chiffre devrait être multiplié par cinq d'ici 30 ans. C'est le résultat d'une démographie qui s'envole et d'une répartition temporelle et spatiale de l'eau inégale [Calmant et Seyler, 2006].

L'eau douce est progressivement devenue une ressource précieuse. Elle fait l'objet de suivis temporels et spatiaux à tous les niveaux (rivières, lacs, zones humides) mais cela reste insuffisant pour comprendre les cycles naturels de l'eau. La surveillance de l'eau douce a été assurée jusqu'à présent par des réseaux de stations limnimétriques organisés généralement par état. Ces réseaux sont chargés de mesurer les variations temporelles des niveaux d'eau des rivières et leurs débits. Hélas ils connaissent un véritable déclin depuis 1990 : interruptions intempestives des enregistrements, insuffisances chroniques de financement, différences dans le traitement des données et du contrôle de la qualité, non-informatisation des données [Calmant et Seyler, 2006, Créteaux et Birkett, 2006]. Ce déclin est particulièrement prononcé dans les régions pauvres où l'informatique et les infrastructures manquent cruellement.

Il y a donc un réel besoin d'une surveillance mondiale, homogène et pérenne des volumes d'eau douce avec une distribution souple des données [Calmant et Seyler, 2006, Alsdorf et Lettenmaier, 2003, Coe et Birkett, 2004] et la télédétection semble être toute désignée pour répondre aux attentes en matière de surveillance du cycle de l'eau.

Les missions d'altimétrie radar ont rapidement montré un potentiel prometteur pour l'observation des eaux continentales avec deux principaux atouts : une couverture spatiale quasi-globale et une périodicité temporelle adaptée à l'observation des phénomènes hydrologiques.

L'altimétrie radar connaît un véritable essor dans les années 90 avec le lancement de TOPEX/Poséidon (T/P). A l'époque, l'empreinte au sol (spot) du satellite T/P varie de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres ce qui restreint les études hydrologiques aux plus gros objets tels que les grands lacs. Cependant la périodicité de 10 jours est un argument de taille et offre aux scientifiques la possibilité de faire un suivi régulier du niveau des eaux. Les précisions trouvées varient de quelques centimètres (Grands Lacs, Etats-Unis) [Morris et Gill, 1994] à une dizaine de centimètres (Lac Tchad, Afrique) [Birkett ; 2000]. D'autres études montrent des résultats

similaires : 5 cm RMS pour le lac Issykkul (Kirghizistan) et 10 cm RMS pour le lac Chardarya (Kazakhstan) [Créteaux et Birkett, 2006].

Le cas des cours d'eau se révèle plus difficile à étudier en raison de leur taille. De fait, les premières études portant sur les cours d'eau se concentrent sur le bassin amazonien. En 2002, Birkett entreprend une analyse poussée de la précision de T/P en s'appuyant sur 14 sites. L'erreur RMS moyenne est de 1,10 m. La précision se dégrade très rapidement sur les cours d'eau [Birkett *et al.*, 2002].

L'altimétrie radar trouve toutefois rapidement ses limites du fait de la dimension du spot, large de plusieurs centaines de mètres, qui restreint la surveillance à des lacs et des cours d'eau de grandes dimensions. A cet égard, ICESat, le premier satellite équipé de la technologie lidar (*Light Detection and Ranging*), offre un potentiel intéressant : la largeur du spot varie de 55 m à 100 m, ce qui permet de mesurer l'élévation de cibles bien plus petites que celles des satellites altimétriques radar et offre aux chercheurs de nouvelles perspectives d'étude.

Avec ICESat, les précisions obtenues en altimétrie sur les grands lacs sont de 3 à 8 cm RMS [Chipman et Lillesand, 2007, Urban *et al.*, 2008]. Une étude équivalente a porté sur le lac américain Pontchartrain (Etats Unis d'Amérique). L'erreur RMS est de 3 cm environ, après avoir translaté les mesures altimétriques pour se rapprocher artificiellement du système de nivellement des stations limnimétriques [Urban *et al.*, 2008]. Sur les lacs plus petits dans le Comté d'Otter Tail, Minnesota (Etats Unis d'Amérique), la précision est moins bonne, 20 cm environ [Bhang *et al.*, 2007].

Les cours d'eau ont fait l'objet de très peu d'études jusqu'à présent. En 2006, Urban étudie la précision d'ICESat sur le fleuve du Tapajos (bassin amazonien) qui présente une trace exceptionnellement longue de 50 km. L'erreur RMS est de 3 cm par beau temps, 8 à 15 cm sous ciel partiellement nuageux et 25 cm par mauvais temps.

Seulement, ces travaux ne montrent les performances d'ICESat à des fins altimétriques que pour des objets d'études qui font figure d'exception : lacs et cours d'eau de grandes dimensions et bénéficiant d'une bonne couverture spatiale. En outre, il n'est jamais précisé la valeur des marges qui ont été établies autour des spots pour se prémunir de tout risque d'éventuelles perturbations liées aux transitions terre-eau ce qui assure la bonne qualité des données. Pourtant, de la valeur de ces marges dépend la taille des objets d'études auxquels les chercheurs peuvent s'intéresser pour assurer la continuité de la surveillance hydrologique terrestre par des systèmes laser de type ICESat.

A l'image du facteur 10 observé par Birkett entre l'erreur RMS moyenne obtenue sur les cours d'eau et celle obtenue sur les grands lacs avec le satellite altimétrique radar TOPEX/Poséidon, nous pouvons certes nous attendre, avec le lidar, à une précision qui se dégrade à mesure que les objets d'étude se font plus petits, mais qu'en est-il réellement avec ICESat ? Pouvons-nous mesurer avec précision l'altimétrie de cours d'eau larges de quelques centaines de mètres avec un spot au sol inférieur à 100 m ?

Dans cet article, nous présentons notre analyse de la précision du satellite ICESat et de sa réponse aux transitions terre-eau, en s'intéressant à un cas simple, le lac Léman. Puis nous généralisons cette étude de précision sur les cours d'eau du territoire français métropolitain.

1.1. Description du site

De manière générale, le lac est un objet d'étude simple car il présente une surface relativement plane, ne subit pas les effets de marées et, selon la taille, peut bénéficier d'une bonne couverture spatiale. Notre choix s'est porté sur le lac Léman (Suisse et France) qui a une altitude moyenne de 372 m et une surface de 582 km².

Au Sud, le lac Léman est bordé par le massif de la Haute-Savoie. La transition terre-eau en phase ascendante y est brutale, avec une dénivelée de 550 m sur une distance de 5 km. A l'opposée, au Nord dans la région de Lausanne, la transition terre-eau en phase descendante est plus douce avec une dénivelée de 260 m sur 5 km.

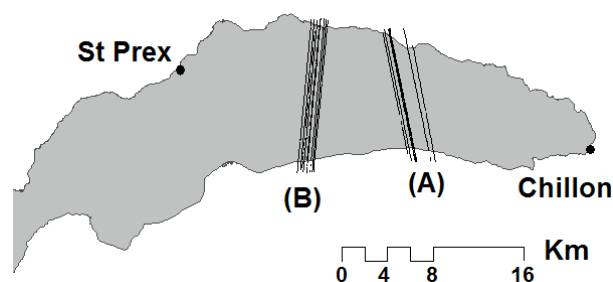


Figure : Le lac Léman avec les traces ICESat ascendantes (a) et les traces ICESat descendantes (b).

1.2. Données

Le *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) est le premier instrument lidar qui équipe un satellite pour l'observation globale et continue de la Terre. Il est le principal instrument embarqué à bord du satellite ICESat. Pour récolter les informations, il combine les signaux de lasers altimétriques opérant dans les longueurs d'onde du visible (532 nm) et du proche infrarouge (1064 nm). Le GLAS a une fréquence de mesure de 40 Hz, ce qui correspond au sol à un spot tous les 170 m.

Les données *GLAS Land surface Altimetry* (GLA14 release 28, 29 et 31) proviennent du *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC). Elles couvrent la période du 02 mars 2004 au 13 mars 2008 au cours de laquelle le Lac Léman est traversé par 21 traces longues de 8,5 km à 10,5 km pour un total de 774 spots (Figure 1). Pour la suite de l'étude, 6 traces ont été exclues du jeu de données car leurs mesures altimétriques étaient anormales (environ 3500 m d'altitude), témoignant d'épisodes nuageux.

Deux stations hydrologiques, Chillon et Saint Prex (Figure 1), ont été exploitées pour déterminer la précision altimétrique d'ICESat. Nous avons utilisé une station « moyenne » dont les mesures limnimétriques correspondent à la moyenne des mesures limnimétriques des deux stations suisses, situées de part et d'autre à égale distance des traces d'ICESat. Ces mesures limnimétriques (données « terrains ») qui nous servent de références pour la détermination de la précision d'ICESat ont été obtenues dans les annuaires hydrologiques de la Suisse, édités par l'Office Fédéral de l'Environnement.

2. Méthode

2.1. Harmonisation des données

Les données de références sont rattachées au « Repère Pierre du Niton », qui est l'origine des altitudes pour tous les travaux topographiques effectués en Suisse. L'altitude de ce point fixe, situé sur un rocher dans la rade de Genève, a été déduit du marégraphe du port de Marseille par rattachement. Elle est de 373,6 m au-dessus du niveau de la mer.

Concernant les produits GLA14, ils nécessitent plusieurs transformations géodésiques pour pouvoir être comparés aux mesures de références. Ils sont originellement définis en coordonnées géographiques dans le même ellipsoïde que celui utilisé par le satellite TOPEX/Poséidon.

La première transformation des coordonnées a été le passage de l'ellipsoïde TOPEX/Poséidon vers l'ellipsoïde WGS-84, largement rencontré avec le système GPS. Cette conversion entre les deux ellipsoïdes introduit une différence minime pour la latitude (la longitude reste la même pour les deux ellipsoïdes). La différence maximale est de $\pm 1,23 \times 10^{-7}$ degrés (à une latitude de ± 45 degrés) ce qui se traduit par une différence horizontale de $\pm 1,37$ cm à la surface [Haran, 2004 (documentation technique disponible sur le site du NSIDC)]. Cet écart est négligeable au regard de l'imprécision de la géolocalisation des spots qui est d'une dizaine de mètres.

En revanche, la conversion des hauteurs ellipsoïdales TOPEX/Poséidon vers les hauteurs ellipsoïdales WGS-84 n'est pas négligeable. Elle est de 70 cm à l'équateur et de 71,3682 cm aux pôles. Nous avons employé l'équation (1) qui permet de calculer la différence de hauteurs ellipsoïdales pour deux ellipsoïdes donnés (1 et 2) à la longitude ϕ , a et b étant la notation standard du demi-grand axe et du demi-petit axe d'un ellipsoïde [Haran, 2004].

$$\Delta h = h_2 - h_1 = a_2 - a_1 \cos^2 \phi + b_2 - b_1 \sin^2 \phi \quad (1)$$

La seconde transformation a été le passage des hauteurs ellipsoïdales aux altitudes. Il existe une relation simple permettant de passer des hauteurs ellipsoïdales aux altitudes à 1 mm près : on peut transformer une hauteur ellipsoïdale h en l'altitude H en soustrayant la hauteur du géoïde N à la hauteur ellipsoïdale (équation (2)).

$$h \approx N + H \quad (2)$$

La conversion repose donc sur la connaissance de la hauteur du géoïde. ICESat exploite à cet effet le géoïde EGM96 (*releases* 28 et 29) et le géoïde EGM2008 (*release* 31) pour calculer l'altitude. L'intervalle de la maille de ces grilles de géoïde est de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ pour l'EGM96 et de $0,083^{\circ} \times 0,083^{\circ}$ pour l'EGM2008. Cela correspond respectivement à un nœud de la grille tous les 25 km et 8 km.

Nous avons préféré le quasi-géoïde français QGF98 à ces deux modèles de géoïde. Le quasi-géoïde français QGF98 est repris par la grille RAF98 pour la conversion en France des hauteurs ellipsoïdales vers les altitudes. En particulier les altitudes sont calculées dans le système de référence altimétrique NGF-IGN69 (système de référence géodésique RGF93) qui a pour origine le marégraphe du port de Marseille.

Par ailleurs, sa résolution est meilleure : $0,025^{\circ}$ en latitude et $0,033^{\circ}$ en longitude. Quant à la précision verticale sur la France, elle est de 1 à 5 cm selon Circé (IGN) ce qui est très satisfaisant. Il faut remarquer en toute rigueur que le système de référence géodésique RGF93 n'a pas le même ellipsoïde (GRS80) que le système de référence WGS-84 (WGS84) mais les deux ellipsoïdes sont à l'origine définis de la même manière. Ils ont le même demi-grand axe et un écart de seulement 0,0001 m sur le demi-petit axe, écart qui a été introduit dans le développement en harmonique sphérique. Pour ces raisons, les coordonnées géographiques connues dans le système WGS84 ont donc été assimilées aux coordonnées géographiques du système RGF93 puis converties avec Circé.

2.2. Exploitation des données

Dans un premier temps nous avons étudié la précision d'ICESat en recherchant un cas de figure idéal, c'est-à-dire un cas de figure où les spots « eau+terre » ont été écartés pour ne travailler qu'avec des spots « eau seule ». A l'aide d'une analyse spatiale (exploitation de données d'occupation du sol), une marge de 300 m, correspondant à l'espacement d'environ 2 spots consécutifs, a été appliquée en s'appuyant sur le contour du lac. Tous les spots situés au sein de cette marge ont été écartés. Les spots restant, dits « eau seule » ont ensuite été extraits trace par trace. Pour chaque trace, la moyenne des altitudes des spots a été calculée et comparée aux altitudes de références de précision centimétrique.

Ensuite nous avons étudié la réponse du satellite ICESat en élargissant nos spots de l'étude à la transition terre-eau, précisément aux spots de la marge de 300 m et à ceux de part et d'autre de cette marge. Des profils temporels ont été tracés pour chaque passage du satellite.

3. Résultats

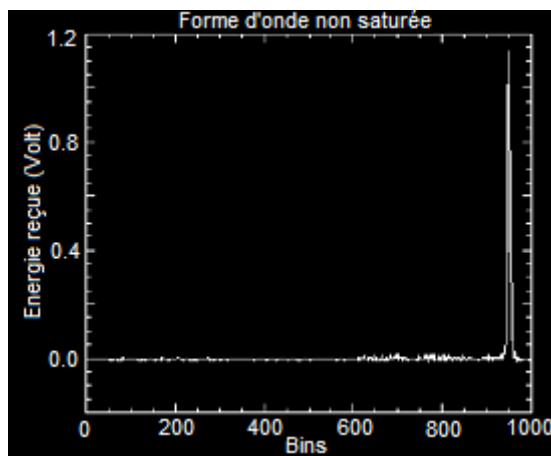
3.1. Etude de la précision d'ICESat

Cette partie de l'étude a été divisée en deux étapes. La première étape a eu pour objet d'étudier l'influence de la correction de saturation sur les mesures altimétriques. Dans la seconde, nous avons comparé nos résultats aux mesures de références.

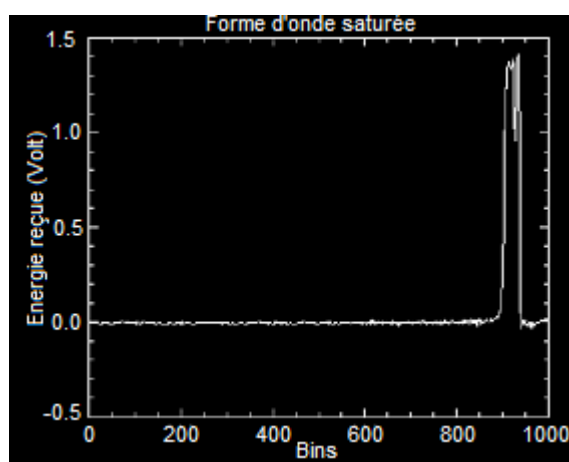
3.1.1. La correction de saturation

La saturation du capteur peut survenir lorsqu'il mesure un milieu fortement réfléchissant. La plupart du temps, la correction de saturation est nulle car la terre ferme est peu réfléchissante mais il peut arriver que cette correction soit nécessaire, en particulier sur des surfaces d'eau qui sont des milieux à caractère spéculaire lorsque la visée est au nadir.

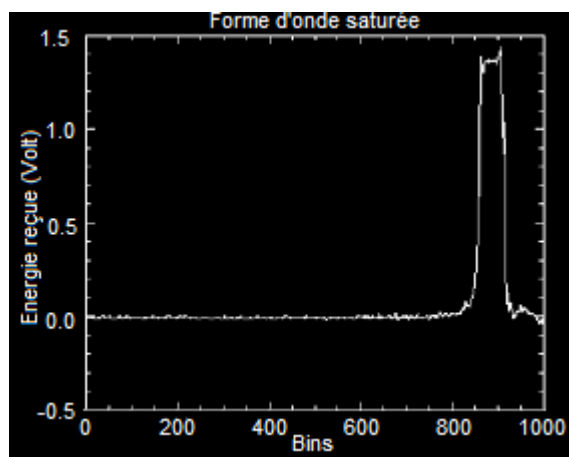
La figure 2 montre quelques formes d'onde GLAS obtenues sur le Lac Léman. En eau calme, la forte réflectance sature le capteur ce qui se traduit par un élargissement du signal retourné. L'altitude calculée est alors sous-estimée.



(a) Altitude sans correction = 372,195 m. Correction = 0. Altitude corrigée = 372,195 m.



(b) Altitude sans correction = 370,918 m. Correction = 1.202. Altitude corrigée = 372,120 m.



(c) Altitude sans correction = 370,585 m. Correction = -999. Altitude corrigée = 370,585 m.

Figure 2. Formes d'onde obtenues sur le Lac Léman en eau seule. (a) Forme d'onde non saturée, (b) et (c) formes d'onde fortement saturées. Ces exemples sont extraits de la trace du 3 juin 2005. L'altitude de référence est de 372,18 m. En abscisse : numéro du bin (bins espacés de 1 ns). En ordonnée : énergie mesurée en retour (Volt).

Par défaut, la correction de saturation n'est pas prise en compte dans les calculs des élévations par l'algorithme *ICESat-Science Investigator-led Processing System* mais elle peut être ajoutée par l'utilisateur. Le guide d'utilisation des produits altimétriques GLA donne peu d'information sur le sujet. Il est seulement recommandé de

ne pas effectuer cette correction pour les données GLA14 sur la terre ferme (NSIDC, *Glas Altimetry Product Usage Guidance*, communication personnelle avec D. Korn du NSIDC User services, 2010).

Pour connaître l'effet de la correction de saturation sur la précision finale, nous avons constitué deux jeux de données correspondant aux mesures non-corrigées (cas 1) et corrigées (cas 2). La correction est une valeur positive, allant de 0 m à 1,50 m. Il existe une valeur d'avertissement (-999,000) pour signaler à l'utilisateur que l'algorithme n'a pas été en mesure de calculer la correction de saturation adéquate mais que la mesure altimétrique aurait dû être corrigée. Pour de telles mesures, la précision est inévitablement de l'ordre du mètre.

En l'absence de correction de saturation (Tableau 1), nous constatons que les écart-types de l'erreur sont plus élevés, avec huit dates dont l'écart-type excède 20 cm. Ce chiffre tombe à une date quand la correction est appliquée. Les 8 dates marquées d'une étoile (*) ont des valeurs de correction de saturation faible ou nulle, c'est pourquoi leurs écarts-types sont très proches dans les deux cas.

Tableau 1. Comparaison des mesures non-corrigées et corrigées avec des mesures de références. Les dates marquées d'une étoile (*) ont une correction de saturation nulle ou presque nulle.

REFERENCE			ICESAT SANS CORRECTION (cas 1)				ICESAT AVEC CORRECTION (cas 2)			
DATE	Altitude de référence	Nb. Spots	Altitude moyenne	Biais	Ecart-type	RMSE	Altitude moyenne	Biais	Ecart-type	RMSE
02/03/04*	371,59	60	371,72	0,13	0,05	0,14	371,72	0,13	0,05	0,14
12/06/04*	372,21	47	372,19	-0,02	0,11	0,11	372,24	0,03	0,12	0,12
04/03/05*	371,74	61	371,72	-0,02	0,07	0,07	371,77	0,03	0,09	0,09
16/03/05	371,68	42	370,59	-1,09	0,50	1,19	371,77	0,10	0,16	0,19
03/06/05	372,18	61	371,49	-0,69	0,59	0,90	372,17	-0,01	0,09	0,09
15/11/05*	372,25	47	372,00	-0,25	0,11	0,27	372,04	-0,20	0,12	0,24
19/03/06	371,82	43	371,48	-0,34	0,29	0,45	371,74	-0,08	0,15	0,17
07/06/06*	372,17	60	372,24	0,07	0,04	0,08	372,24	0,07	0,04	0,08
18/06/06	372,26	45	372,14	-0,12	0,28	0,30	372,42	0,16	0,11	0,19
07/11/06*	372,22	61	372,25	0,03	0,09	0,09	372,28	0,06	0,04	0,07
19/11/06	372,23	48	372,02	-0,21	0,34	0,40	372,17	-0,06	0,09	0,11
25/03/07*	371,74	61	371,81	0,07	0,10	0,12	371,87	0,13	0,07	0,14
06/04/07	371,66	43	371,53	-0,13	0,18	0,22	371,64	-0,02	0,15	0,15
16/10/07	372,21	59	372,02	-0,19	0,24	0,30	372,20	-0,01	0,07	0,07
13/03/08*	371,53	22	371,31	-0,22	0,21	0,30	371,31	-0,22	0,21	0,30
MOYENNE		-	-	-0,20	0,21	0,33	-	0,01	0,10	0,14

La moyenne des écarts-types est meilleure lorsque la correction est appliquée (10 cm contre 21 cm sans la correction) ce qui signifie que la correction de saturation diminue la dispersion des mesures altimétriques. Le biais est aussi plus faible dans le cas 2 : 1 cm contre -20 cm dans le cas 1.

Au final, l'erreur RMS est de 33 cm sans la correction et de 14 cm avec la correction. Lorsque les mesures sont corrigées de la saturation et que les spots de transition sont exclus, la précision tombe à 5 cm ce qui est une précision acceptable pour la surveillance des eaux continentales.

Ces résultats corroborent ceux observés par Urban en matière de correction de saturation et démontrent l'intérêt d'apporter une correction en eaux calmes, telles que les eaux continentales [Urban *et al.*, 2008].

3.1.2. Comparaison avec les mesures de références

L'erreur RMS moyenne des mesures corrigées est de 14 cm, nous retrouvons la gamme des précisions évoquées ci-avant pour les lacs. Plus précisément, l'exactitude moyenne des mesures est de 1 cm et son écart-type varie de 4 cm à 21 cm avec une moyenne de 10 cm. Ces chiffres montrent que le satellite ICESat est cohérent dans

ses mesures car la dispersion interne des mesures altimétriques est faible, de l'ordre de grandeur de sa précision annoncée dans le budget d'erreur (15 cm).

3.2. Etude de la transition terre-eau

A la transition terre-eau, les profils temporels montrent un comportement atypique du satellite ICESat (Figure 3). L'altitude des premiers spots « eau-seule » accuse systématiquement un écart significatif par rapport à l'altitude de référence. Quelles soient corrigées ou non, les mesures ont une différence de -30 à -50 cm avec la mesure de référence (cas des mesures non-corrigées – triangles noirs) ou inversement de $+30$ à $+50$ cm (cas des mesures corrigées – points blancs). En moyenne ce sont les 8 premiers spots de chaque trace qui sont affectés, bien que le phénomène de transition semble se manifester avec plus d'intensité lors des phases ascendantes (jusqu'à 13 spots de « transition »).

Nous avons cherché à mieux caractériser ce phénomène de transition. On peut distinguer 4 phases singulières :

- phase 1 : les spots sont sur la terre ferme. La correction est valide (entre 0 m et 1,50 m).
- phase 2 : entre 3 et 8 spots « terre », « terre+eau » ou « eau-seule » ont une correction invalide (-999,000).
- phase 3 : entre 2 à 10 spots « eau-seule » ont une correction valide mais elle semble mal adaptée : ce sont nos spots de transition.
- phase 4 : les spots « eau-seule » qui suivent ont une altitude proche de l'altitude de référence. La correction est alors valide et semble bien adaptée.

Les profils temporels traduisent une adaptation progressive mais lente du capteur GLAS avant de faire des mesures correctes. Cette adaptation est estimée à environ 0,2 s. Spatialement, cela signifie que les mesures altimétriques effectuées sur les premières centaines de mètres qui suivent la transition terre-eau sont inévitablement biaisées. A titre d'exemple, cette distance d'adaptation est très exactement de 1360 m pour une suite de 8 spots de transition.

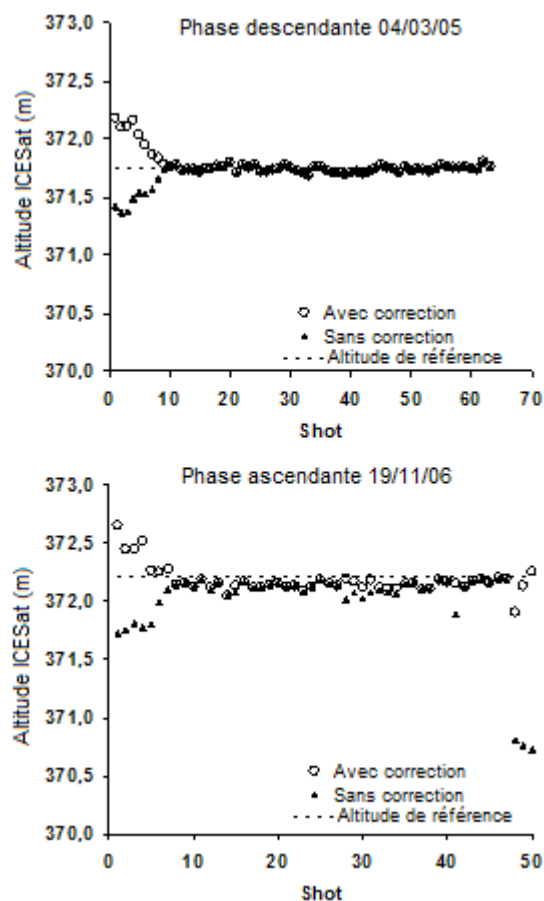


Figure 3. Exemples de profils temporels à partir du premier shot de la transition terre-eau. En abscisse : numéro du shot (chacun espacé de 0.025s). En ordonnée : l'altitude (ICESat avec/sans correction et altitude de référence).

4. Discussion

4.1. Discussion générale

Les résultats de notre analyse de la précision du satellite ICESat sur le lac Léman sont similaires à ceux rencontrés dans la littérature. Nous rappelons que les résultats rencontrés dans la littérature ne rendent généralement pas compte des marges qui ont été adoptées pour travailler avec des données de qualité et il n'est alors pas possible de connaître la taille minimale des objets d'étude.

Pour connaître les dimensions minimales de ces objets d'étude, nous avons travaillé sur la réponse du satellite ICESat aux transitions terre-eau. Cette analyse a mis en évidence un phénomène de transition assez conséquent qui affecte la première dizaine de spots « eau-seule ».

La saturation observée est due à la réflexion spéculaire de l'eau qui éblouit le détecteur et/ou à une variation brutale d'albédo qui fait saturer le détecteur. Le détecteur est alors inopérant tout le temps qu'il est saturé. Les profils montrent qu'il faut un certain temps au contrôle de gain pour compenser la saturation électronique par une réduction du gain. Cela peut expliquer le phénomène progressif de récupération (phases 2, 3 et 4) après l'éblouissement. Ici, ce laps de temps peut durer jusqu'à 0,325 s, ce qui équivaut à affecter 13 mesures sur une distance au sol de plus de 2 km. Ce temps nécessaire à la dessaturation dépend de l'électronique et du niveau de sur-éclairage qui est fonction de l'angle entre la ligne de visée et le nadir.

Le phénomène de transition semble plus intense en phase ascendante qu'en phase descendante. A priori rien ne laisse supposer que les paramètres d'observation du satellite soient différents en phases ascendantes et en phases descendantes. La configuration du terrain n'est peut être pas étrangère à cette différence car la transition terre-lac en phase ascendante est très différente de la transition terre-lac en phase descendante. Au Sud, la transition terre-lac en phase ascendante est brutale avec une dénivelée de 550 m sur une distance de 5 km, tandis qu'au Nord, la transition terre-lac en phase descendante est plus douce avec une dénivelée de 260 m sur 5 km.

Une observation reste inexpliquée. Pour la trace du 19/03/06, les premiers spots de la transitions sont successivement saturés faiblement (correction valide), trop saturés (correction = -999,000) puis saturés faiblement (correction valide). Cette alternance « correction valide »/« correction = -999,000 » est surprenante. Il peut y avoir éventuellement une erreur de restitution de la position du spot au sol liée à l'imprécision du pointage ou le fait que la ligne de visée oscille, se rapprochant du nadir dans certains cas pour donner une saturation tandis que dans d'autres cas, l'angle par rapport au nadir est suffisant pour éviter la saturation. Cette deuxième suggestion expliquerait l'attitude non systématique du phénomène (communication personnelle avec F. Fabre, EADS).

4.2. Application sur des cours d'eau en France métropolitaine

A titre expérimental, nous avons étudié la précision d'ICESat obtenue sur le réseau hydrographique français, qui présente des cours d'eau moyens, larges de quelques centaines de mètres. Seules les données GLA14 du laser 3 ont été exploitées puisque la taille du spot de ce laser est de 55 m environ contre 90 m pour le laser 2 et 149 m pour le laser 1. Plusieurs critères de sélection ont été établis pour la sélection des spots. Sont retenus les spots 1) en intersection avec les rivières d'une largeur supérieure à 50 m, 2) dans un rayon de 1 km d'une station hydrologique du réseau de la Banque Hydro Nationale, et 3) éloignés d'un ouvrage particulier (ouvrage de franchissement, retenu,...) pouvant introduire un écart altimétrique.

Seuls 26 traces et 46 spots ont été sélectionnés pour la comparaison. Cette faible population d'étude souligne la difficulté d'assurer une surveillance de cours d'eau avec les paramètres de vol tels qu'ils ont été définis par l'*Earth Science Enterprise* (NASA) pour la mission ICESat, qui était de privilégier la couverture géographique à la fréquence de répétition.

L'erreur RMS trouvée¹ sur les cours d'eau est de 1,15 m (biais : 0,03 m, écart-type : 1,17m). Plusieurs sources d'erreur ont été envisagées : la sélection des spots, le nivellement des stations, la présence d'ouvrages intermédiaires, de déversoirs, l'effet berge et la correction de saturation. De toutes ses sources d'imprécision, la principale est le défaut de correction de saturation, ou son imprécision : 61% des données étaient saturées et la correction de saturation n'avait pas pu être calculée par le système GLAS (-999,000). Pour les données corrigées, nous retrouvons les conclusions de notre étude du phénomène de transition. La correction proposée pour les spots de transition terre-eau n'est pas adaptée : sans la correction, les mesures sont sous-estimées, tandis qu'elles sont surestimées une fois corrigées.

Au final l'erreur RMS sur les cours d'eau en France correspond approximativement à dix fois la précision trouvée sur le lac Léman. Ces résultats ne sont pas sans nous rappeler les résultats de Birkett, en particulier le facteur 10 entre l'erreur RMS des grands lacs et l'erreur RMS des cours d'eau.

5. Conclusions

Sur les grands lacs tels que le lac Léman, l'erreur RMS moyenne des mesures non-corrigées est de 33 cm (min. : 7 cm ; max. : 119 cm) contre 14 cm (min. : 7 cm ; max. : 30 cm) avec la correction. La correction de saturation améliore considérablement la précision d'ICESat. Par ailleurs, notre étude montre que le satellite ICESat nécessite un temps d'adaptation d'environ 0,2 s aux transitions terre-eau. En effet, nous avons observé qu'en moyenne les 8 premiers spots suivant la transition accusent un écart systématique de 30 à 50 cm avec la mesure de référence, ce qui correspond à une distance de 1360 m. Cet écart est introduit par le système GLAS qui est incapable de calculer efficacement la correction de saturation. En écartant tous les spots de transition, la précision d'ICESat passe de 14 cm à 5 cm, ce qui permet alors une surveillance du niveau des eaux avec une précision acceptable.

Cette distance moyenne de 1360 m est donc la marge minimale à appliquer aux objets d'étude. En deçà, ni la précision des mesures altimétriques ni celle de la correction de saturation ne permettent de mesurer précisément

¹ Relation pour une variable x entre l'erreur RMS, la moyenne et la variance avec N le nombre de mesures effectuées [Willmott, 1982] :

$$RMS_x^2 = \mu_x^2 + \frac{1}{N} \sigma_x^2$$

l'altimétrie des eaux continentales. Les objets d'études de petite taille ne pouvant se voir appliquer une telle marge ne peuvent donc pas être étudiés avec le satellite ICESat.

A titre d'exemple, la précision d'ICESat fut évaluée sur les cours d'eau en France métropolitaine. Elle est de 1,15 m (bais : 0,03 m, écart-type : 1, 17m) avec une correction de saturation qui n'a pas pu être calculée pour 61% des données. Comme Birkett, nous observons un facteur proche de 10 entre l'erreur RMS des grands lacs et l'erreur RMS des cours d'eau.

Peu précis sur les cours d'eau et de fréquence de répétition peu élevée, ICESat n'est pas une alternative intéressante pour assurer la surveillance de la plus grande majorité des cours d'eau.

La mise en orbite d'ICESat-II est prévue pour 2015. D'ici là, la communauté de chercheurs pense savoir comment surmonter le handicap posé par la saturation en milieu spéculaire [Report from the ICESat-II Workshop, 2007]. Si ICESat-II conjugue précision et haute répétitivité, il pourrait être un instrument précieux pour le suivi altimétrique des niveaux d'eau, et pourquoi pas des cours d'eau.

6. Remerciements

Les auteurs remercient Frédéric Fabre (EADS) pour ses explications concernant le comportement du capteur lidar satellitaire GLAS, David Korn et Lisa Booker (NSIDC) pour les données et leurs conseils, Flavie Cernesson pour l'accès à l'annuaire hydrologique de la Suisse,. De plus les auteurs remercient « EauFrance », l'observatoire national français des cours d'eau pour l'accès aux bases de données hydrologiques.

7. Bibliographie

7.1. Publications

Alsdorf D.E. et Lettenmaier D.P. *Tracking fresh water from space*. *Science* 301, no. 5639 (2003).

Bhang K.J., Schwartz F.W., et Braun A. *Verification of the vertical error in C-band SRTM DEM using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, no. 1 (2007): 36-44.

Birkett C.M., 2000. *Synergistic remote sensing of Lake Chad : Variability of Basin Inundation*. *Remote Sensing of Environment*, 72, pp. 218-236.

Birkett C.M., Mertes L.A.K., Dunne T., Costa M., and Jasinski J., 2002. *Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry*. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20), doi:10.1029/2001JD000609.

Calmant S. et Seyler F. *Continental surface waters from satellite altimetry*. *Comptes Rendus - Geoscience* 338, no. 14-15 (2006): 1113-1122.

Chipman J.W. et Lillesand T.M. *Satellite-based assessment of the dynamics of new lakes in southern Egypt*. *International Journal of Remote Sensing* 28, no. 19 (2007): 4365-4379.

Coe M.T., and Birkett C.M., 2004. *Calculation of river discharge and prediction of lake height from satellite radar altimetry: Example for the Lake Chad basin*. *Water Resources Research* 40, no. 10, pp. 1-11.

Crétaux J.-F. et Birkett C. *Lake studies from satellite radar altimetry*. *Comptes Rendus - Geoscience* 338, no. 14-15 (2006): 1098-1112.

Morris C.S., and Gill S.K., 1994. *Evaluation of the TOPEX/Poseidon altimeter system over the Great lakes*. *Journal of Geophysical Research*, 99 (C12), pp. 24527-24539.

Urban T.J., Schutz B.E., et A.L. Neuenschwander, *A survey of ICESat coastal altimetry applications: Continental Coast, Open Ocean Island, and Inland River*. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 19, no. 1-2 (2008): 1-19.

Willmott C.J. *Some Comments of the Evaluation of Model Performance*. Bulletin American Meteorological Society, Vol. 11 (1982) : 1309-1313.

7.2. Documentations scientifiques et techniques

Report from the ICESat-II Workshop. 27-29 juin 2007 au Baltimore Washington International, Maryland. Plusieurs contributeurs dont C. Carabajal, T.J. Urban, B.E. Schutz et J. Zwally.

The National Snow and Ice Data Center, *GLAS Altimetry Product Usage Guidance*.
http://nsidc.org/data/docs/daac/glas_altimetry/pdf/NSIDC_AltUserGuide_Rel29.pdf

Haran T., The National Snow and Ice Data Center. *ICESat/GLAS and WGS-84 ellipsoid and geoid conversions*.
ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/icesat/tools/idl/ellipsoid/README_ellipsoid.txt, (2004)