Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement

Band: 112 (2014)

Heft: 8

Artikel: Limnimétrie par réflectométrie GNSS à faible coût

Autor: Rodrigues, E. / Kasser, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-389508

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Limnimétrie par réflectométrie GNSS à faible coût

La réflectométrie GNSS (ou GNSS-R) est une famille de techniques de traitement des signaux GNSS qui consistent en une utilisation opportuniste des signaux GNSS réfléchis, plus communément appelés multi-trajets et généralement considérés comme des perturbations. Ces applications permettent de déterminer des attributs géométriques ou d'autres propriétés des surfaces réfléchissantes. Si l'on s'intéresse à l'aspect géométrique et que la surface de réflexion est un plan d'eau, le récepteur GNSS devient alors un limnimètre. L'objectif de cette recherche était d'examiner dans quelle mesure ce principe de limnimétrie par GNSS-R pourrait être employé avec du matériel GNSS à faible coût. À cet effet, une expérience d'acquisition de données a été menée et un algorithme de traitement basé sur l'emploi des triples différences a été développé. Pour un plan d'eau calme et sous certaines conditions (durée d'observation, élévation des satellites), la technique mise en place fonctionne et permet d'obtenir des résultats de précision centimétrique.

Die Reflektometrie GNSS (oder GNSS-R) ist eine Familie von Techniken zur Aufbereitung von GNSS-Signalen, die in einer opportunistischen Verwendung der reflektierten GNSS-Signale bestehen, gemeinhin als Mehrfachsignale und im Allgemeinen als Störungen bezeichnet. Diese Anwendungen erlauben geometrische Attribute oder andere Eigenschaften reflektierender Oberflächen zu bestimmen. Wenn man sich für den geometrischen Aspekt interessiert und die reflektierende Oberfläche Wasser ist, wird der GNSS-Empfänger zum Limnimeter. Das Ziel dieser Studie war zu untersuchen, in welchem Masse dieses Prinzip der GNSS-R gestützten Limnimetrie mit kostengünstigem GNSS-Material angewendet werden könnte. Zu diesem Zweck wurde ein Versuch zur Datenerfassung durchgeführt und ein auf der Verwendung der Dreifachdifferenzen basierender Bearbeitungsalgorithmus entwickelt. Bei einer Wasseroberfläche und unter gewissen Bedingungen (Beobachtungsdauer, Elevation der Satelliten) funktioniert diese Technik und ergibt Resultate in Zentimetergenauigkeit.

La riflessometria GNSS (o GNSS-R) è una gamma di tecniche per l'elaborazione dei segnali GNSS. Queste tecniche consistono nell'uso mirato dei segnali GNSS riflessi, comunemente chiamati "multi tragitto" e solitamente considerati come delle perturbazioni. Queste applicazioni permettono di determinare degli attributi geometrici o altre proprietà delle superfici riflettenti. Se ci si interessa all'aspetto geometrico e se la superficie di riflessione è uno specchio d'acqua, il ricettore GNSS diventa allora un limnimetro. L'obiettivo di questa ricerca sta nell'esaminare fino a che punto questo principio di limnimetria tramite GNSS-R potrebbe essere utilizzato con del materiale GNSS a basso costo. A questo riguardo si è provveduto a effettuare un'esperienza di acquisizione di dati e si è sviluppato un algoritmo di elaborazione, basato sull'uso delle triple differenze. Con un piano di uno specchio d'acqua calmo e a determinate condizioni (durata d'osservazione, elevazione dei satelliti), la tecnica messa a punto funziona e permette di ottenere dei risultati con una precisione dell'ordine del centimetro.

E. Rodrigues, M. Kasser

Contexte et objectif de l'étude

En positionnement GNSS, les multi-trajets sont considérés comme des pertubations de la mesure. Ils résultent de la réflexion du signal sur une surface avant d'atteindre l'antenne du récepteur. En tirant parti de cet allongement du trajet émetteur-récepteur, on peut envisager de déterminer la position de réflecteurs environnants. L'utilisation de ces signaux est communément dénommée réflectométrie GNSS (GNSS-R). Si la surface réfléchissante est un plan d'eau, le GNSS-R peut alors constituer une méthode de détermination limnimétrique.

Le concept d'usage opportuniste des multi-trajets fut proposé pour la première fois en 1993 par M. Martín-Neira [4] sous le nom de PARIS: *PAssive Reflectometry and Interferometry System.* Ce principe a depuis lors été repris dans de nombreux travaux et le GNSS-R constitue aujourd'hui un secteur d'étude à part entière dans le monde du GNSS et de la télédétection. On distingue trois grandes classes de traitement GNSS-R: altimétrie, diffusométrie *(scatterometry)* et étude de l'activité atmosphérique.

La problématique altimétrique est celle qui est traitée dans ce travail. L'examen de l'état l'art montre que malgré le fait que le GNSS-R se développe depuis une vingtaine d'années, il n'en est pas moins resté retranché dans les laboratoires des hautes écoles et des agences spatiales. Le matériel utilisé est généralement de type haut de gamme et il tient plus souvent du prototype totalement dédié que du matériel conventionnel. Partant de ce constat, l'objectif de cette étude est d'examiner s'il est possible d'appliquer le principe de détermination limnimétrique par GNSS-R avec du matériel d'acquisition conventionnel à faible coût.

Principes et méthodes de l'altimétrie GNSS-R [2]

En considérant les signaux direct et réfléchi parallèles entre eux, on se retrouve dans une géométrie simple qui permet de mettre en évidence la relation liant la hauteur h, l'élévation ε du satellite et le trajet supplémentaire δ parcouru par le signal réfléchi:

$$\delta = 2h \sin \varepsilon$$

L'élévation ε étant connue, il est nécessaire de déterminer δ pour déterminer h. Pour réaliser cette opération, il existe notamment des techniques basées sur les méthodes de positionnement GNSS clas-

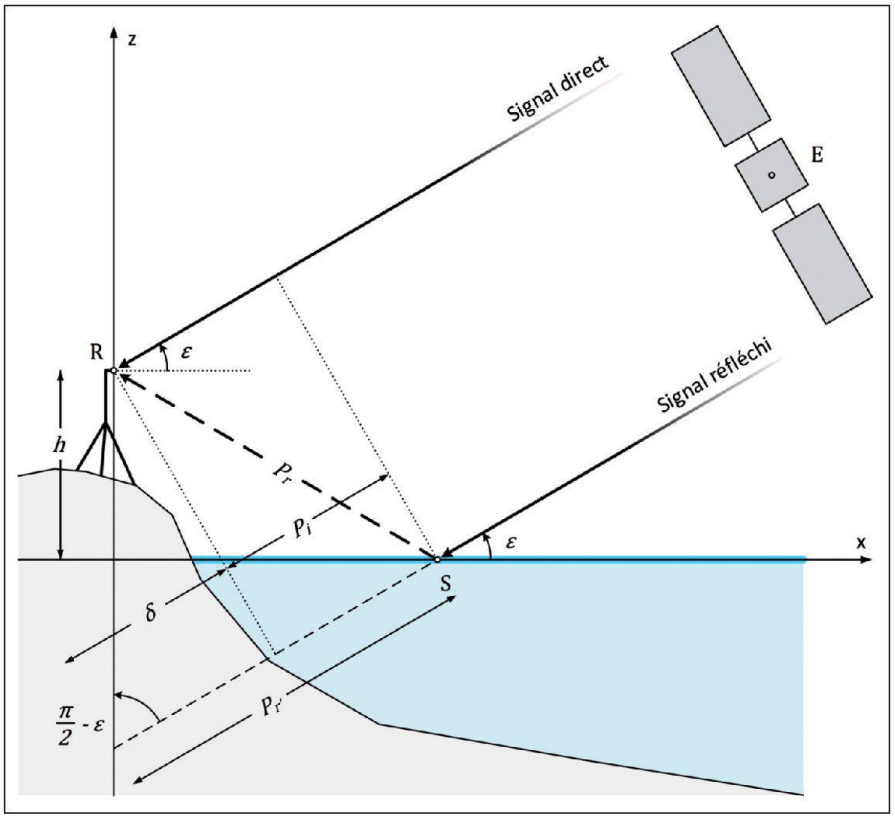

Fig. 1: Géométrie simplifiée (Terre plate) d'une réflexion spéculaire de signal GNSS.

siques (code C/A et phase). Mais ces procédés demandent l'emploi de deux antennes GNSS pour séparer clairement les signaux directs et réfléchis. Ceci est dû au fait que le signal direct a une polarisation circulaire droite (ou *RHCP)* et celle du signal réfléchi est exactement inversée lorsque la réflexion est parfaite (polarisation circulaire gauche ou *LHCP).* Chacune des deux antennes reçoit exclusivement la polarisation correspondante. On mesure ainsi le parcours satellite-récepteur pour chacun des signaux (directs et réfléchis) et la différence donne δ. L'objectif du présent travail étant d'utiliser du matériel conventionnel, ce type d'approche n'a pas été retenu.

Une autre approche est basée sur la fréquence interférométrique. Les signaux directs et réfléchis étant cohérents, on peut observer la formation d'interférences au point de réception. En mesurant la fréquence de ce signal interférométrique, on peut calculer la hauteur. Cette approche est très intéressante car elle demande l'emploi d'une seule antenne. Elle n'a toutefois pas été retenue car un matériel d'acquisition spécifique est nécessaire pour son application. Néanmoins, le principe de signal interférométrique a été utilisé dans la méthode développée dans le cadre de ce projet.

Méthode appliquée et concept

L'idée initiale de ce projet se base sur le fait qu'une antenne GNSS, quelle que soit sa qualité, ne rejette jamais totalement les multi-trajets. Elle en diminue simplement l'intensité de quelques dB mais l'effet est toujours présent. Ainsi, lorsqu'un récepteur GNSS est situé à proximité d'une surface particulièrement réfléchissante, dans notre cas un plan d'eau, les mesures de phase sont perturbées en permanence par les ondes réfléchies. On doit donc être en mesure d'observer des interférences. Le problème bien connu des observations GNSS sur la phase est qu'elles sont perturbées par bien d'autres phénomènes : erreurs d'horloge des satellites et des récepteurs, erreurs d'orbite, effets ionosphériques et troposphériques, sauts de cycle. Un traitement différentiel de la phase permet de se débarrasser de toutes ces influences. Du fait du retrait de toutes ces erreurs, les triples différences sont le produit de traitement différentiel qui est le plus adéquat. En calculant les résidus de ces triples différences *(TD_{res}),* on se retrouve en présence d'un nouveau signal qui contient lui-même les signaux des deux satellites utilisés pour sa construction. Le travail réalisé dans cette étude est basé sur le fait que les résidus des triples différences d'une paire de satellites donnée contiennent les signaux interférométriques générés par l'interaction entre les ondes directes et réfléchies de chaque satellite.

Dans notre cadre, la voie du traitement par recherche de la fréquence interférométrique semble être la plus adaptée. Mais il s'agit d'un signal extrêmement faible, et par conséquent difficile à mesurer. Le concept imaginé pour ce travail prend le problème à l'envers. Au lieu de chercher à mesurer précisément la fréquence interférométrique du signal, une série de signaux interférométriques théoriques est générée pour des valeurs possibles de la hauteur de l'antenne par rapport au plan d'eau. Ils sont calculés selon un pas régulier (ici tous les 10 cm), en fonction de l'élévation du satellite observé (satellite maître) et pour une durée déterminée (par exemple 30 min) à un instant donné. Les résidus des triples différences sont calculés sur la même période entre le satellite maître et un satellite pivot. Ils sont comparés par corrélation croisée à chacun des signaux théoriques. Le signal théorique présentant le coefficient de corrélation maximal est identifié comme étant le plus proche de la réalité. Puis, en prenant quelques résultats au voisinage de ce dernier, on affine le résultat à l'aide d'une succession de régressions polynomiales du 2ème degré. La hauteur h peut ainsi être finement déterminée. Pour tester cette stratégie de traitement, un algorithme a été développé. Il a été testé

Fig. 2: Installation de la campagne d'acquisition du 22 novembre 2013. On remarque l'antenne, fixée avec son axe horizontal pointant vers le lac.

avec succès sur les données d'une campagne d'acquisition concrète.

Campagne d'acquisition

Afin d'obtenir des observations permettant de tester le concept, une campagne d'acquisition a été entreprise sur les berges du Lac de Neuchâtel, au port de Grandson. Ce lieu, facile d'accès, répond parfaitement aux conditions-cadres exigées par l'application visée. Le plan d'eau doit être suffisamment grand et dégagé de toute obstruction pour s'assurer qu'un maximum de signaux réfléchis soit capté par l'antenne GNSS. De plus, le lac doit être altimétriquement stable (pas de variation) durant la période de mesure. La seconde condition est l'orientation. Les configurations des constellations GNSS présentent, sous nos latitudes, une densité de satellites plus élevée au sud. Il faut donc que le plan d'eau observé soit situé au sud du site d'acquisition. Un décalage vers l'est ou l'ouest reste possible, mais une orientation au nord est à proscrire. Le matériel utilisé pour l'acquisition est un kit GPS *low-cost* autonome constitué d'une puce u-blox LEA-6T (uniquement GPS L1, avec mesure de phase) et d'un module d'enregistrement sur carte SD. L'antenne utilisée est une Tallysman Wireless TW3430. Cette antenne a été fixée avec son axe à l'horizontale, position qui n'est donc pas habituelle, et qui par exemple empêche de recevoir correctement des satellites localisés à l'arrière de la direction visée. Le traitement développé étant basé sur les triples différences, une station de référence GNSS a bien entendu été nécessaire. La Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) étant située à 3 km du site d'observation, son antenne de référence permanente a été mise à profit.

L'acquisition des données de cette expérience a été réalisée le 22 novembre 2013 de 12h51 à 15h41 (GPST). L'équipement a enregistré des observations GPS L_1 à une fréquence de 1 Hz. Le jour de cette acquisition a été choisi en fonction de l'agitation de la surface lacustre. Elle devait être faible afin de pouvoir mesurer une hauteur de référence le plus précisément possible.

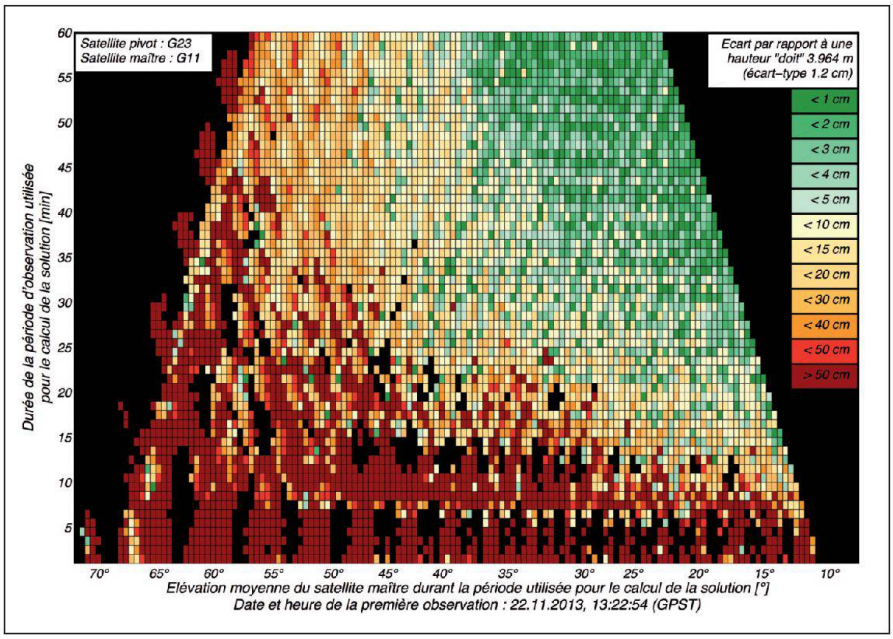

Fig. 3: Qualité des solutions (une par minute) en fonction de l'élévation du satellite maître et de la durée d'observation utilisée. Solutions pour satellite maître G11 et pivot G23.

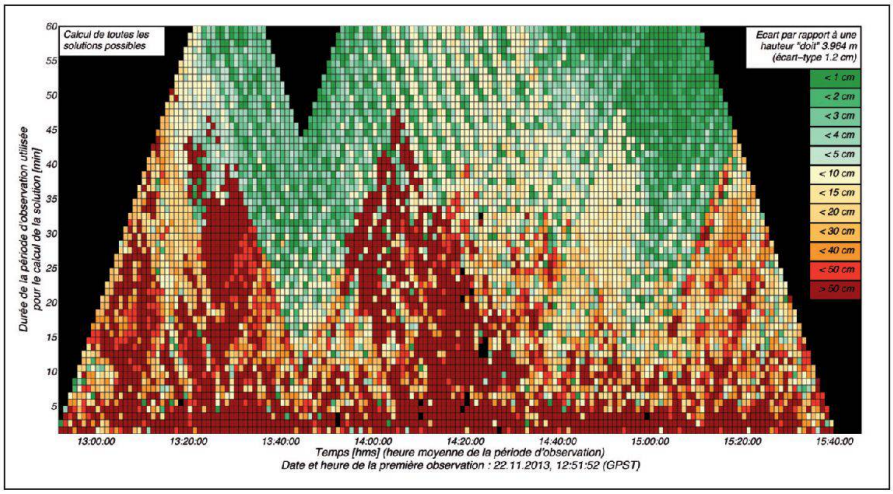

Fig. 4: Qualité de toutes les solutions calculées sur l'ensemble des données mesurées en foction de la durée d'observation utilisée. Une solution par minute est calculée. Le résultat est une moyenne lorsqu'il y a plus d'une détermination individuelle.

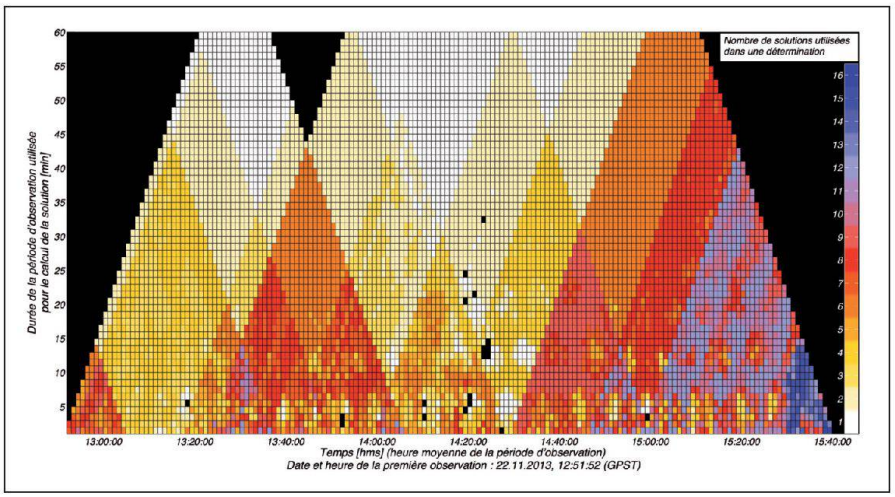

Fig. 5: Nombre de déterminations individuelles utilisées pour chaque solution.

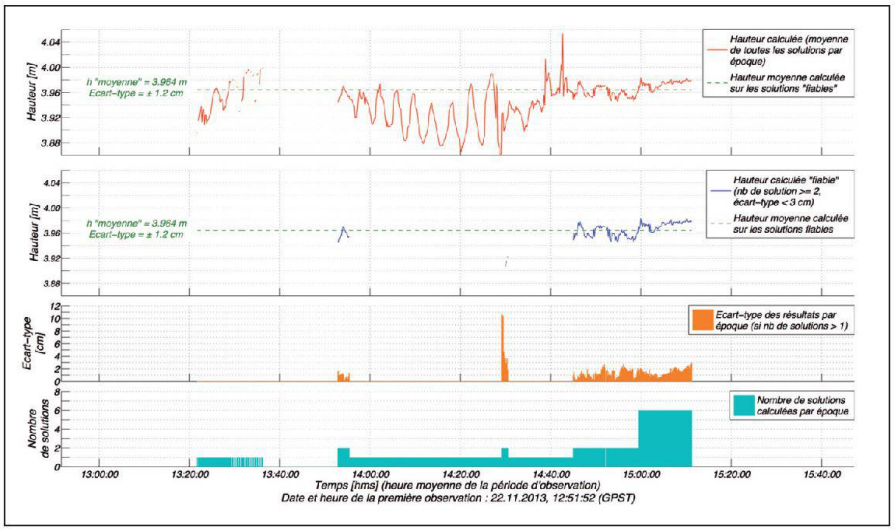

Fig. 6: Calcul des hauteurs d'eau. Calcul d'une solution toutes les 10 s pour une durée d'observation de 60 min et sur l'ensemble des données. 1 - Toutes les solutions, 2 - Solutions fiables (min. 2 déterminations et écart-type < 3 cm), 3 - Ecart-type (min. 2 solutions), 4 - Nombre de solutions calculées par époque.

Analyse des résultats

Les analyses de résultats individuels (un seul satellite) montrent que l'élévation du satellite maître est un facteur particulièrement limitatif dans le bon fonctionnement du calcul. Les résultats commencent à diverger aux alentours d'une élévation de 40° (élévation moyenne du satellite durant la période d'observation). Ce phénomène est difficilement explicable, car vis-à-vis des ondes électromagnétiques, l'eau agit comme un miroir. On ne devrait donc pas assister à ce genre de perturbations. Cette problématique n'étant pas le sujet de l'étude, il faut se contenter de ce simple constat. On peut tout de même émettre quelques hypothèses quant aux raisons de ces limitations angulaires: qualité de l'antenne, inclinaison et hauteur de l'antenne pas optimales, effets de l'ondulation du plan d'eau (vagues).

Les essais montrent également que la durée d'observation utilisée est un autre facteur limitatif. Les tests réalisés avec une durée de 60 min donnent de très bons résultats. Cette durée peut être diminuée jusqu'à 30 min d'intégration. En-dessous, l'algorithme diverge et les résultats deviennent assez aléatoires. En faisant une analyse combinée des contraintes géométriques et temporelles, on constate qu'il existe une forte interaction entre les deux variables. En effet, plus l'élévation est basse, plus le temps d'intégration nécessaire au calcul d'une bonne solution est faible, et inversement. (cf. Fig. 3).

De par la forte interaction entre élévation et durée d'intégration, aucune durée optimale ne peut être définie. Il est dès lors nécessaire d'analyser les résultats dans leur globalité. L'algorithme est donc appliqué à l'ensemble des observations afin de juger les résultats selon trois critères :

- Précision: comparaison à une valeur de référence.
- Fiabilité: minimum de deux déterminations (par époque) répondant à un critère de précision fixé (écart-type plafond).
- Continuité: taux de réussite ou d'échec dans le calcul de résultats fiables.

Sans surprises, les solutions calculées avec les plus longues durées d'observation ont la meilleure précision. En contrepartie, bien évidemment beaucoup moins de solutions individuelles sont calculées. Cela entraîne une diminution du nombre de solutions fiables et de surcroît un affaiblissement de la continuité. La Fig. 6-2 montre bien qu'avec une longue durée d'intégration et écart-type plafond de 3 cm, le taux de réussite est très faible. La Fig. 7 expose l'effet sur le taux de réussite lorsque l'on fait varier ces paramètres. La Fig. 8 présente la dispersion (écart-type) des séries de résultats calculées selon les paramètres appliqués. Le choix de ces dernières dépend donc du besoin: précision ou continuité.

Conclusion et perspectives

La méthode employée est originale, car comme il n'est pas possible de mesurer directement l'allongement du signal réfléchi, c'est de façon indirecte que la solution a été trouvée: la corrélation croisée entre les triples différences et des signaux interférométriques théoriques. L'algorith-

me élaboré est particulièrement efficace, car malgré une complexité apparente due à un grand nombre d'opérations successives, il n'utilise que des moyens mathématiques relativement simples (corrélation croisée, régression polynomiale). L'intérêt du système mis au point réside dans l'enchaînement de toutes ces tâches calculatoires qui sont totalement automatisables.

L'expérimentation menée sur des données acquises en situation réelle montre qu'il est possible d'obtenir une hauteur d'eau de précision centimétrique. Toutefois, les essais font apparaître qu'un tel résultat ne peut être atteint qu'avec des conditions préalables relativement contraignantes. Cela diminue les performances du système en matière de continuité. En effet, l'expérimentation ayant été menée uniquement sur la constellation GPS, il n'est pas rare de se retrouver dans une situation où aucune solution fiable n'est calculable. Ce défaut devrait être gommé avec une extension du concept aux autres constellations GNSS (Glonass, Galileo, BeiDou), les matériels pour ce faire étant déjà accessibles.

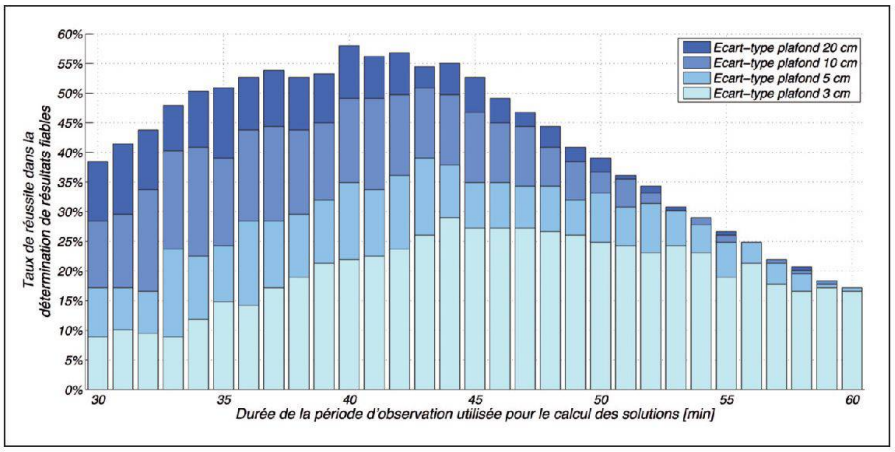

Fig. 7: Taux de réussite lors du calcul de hauteurs d'eau fiables. Il s'agit du nombre d'époques où une solution fiable est calculée par rapport au nombre total d'époques de mesure. Le taux est calculée en fonction de la durée d'observation utilisée et pour quatre plafonds d'écart-type (3 cm, 5 cm, 10 cm et 20 cm) définissant la fiabilité. Date et heure des observastions: 22.11.2013 de 12h51 à 15h41 (GPST).

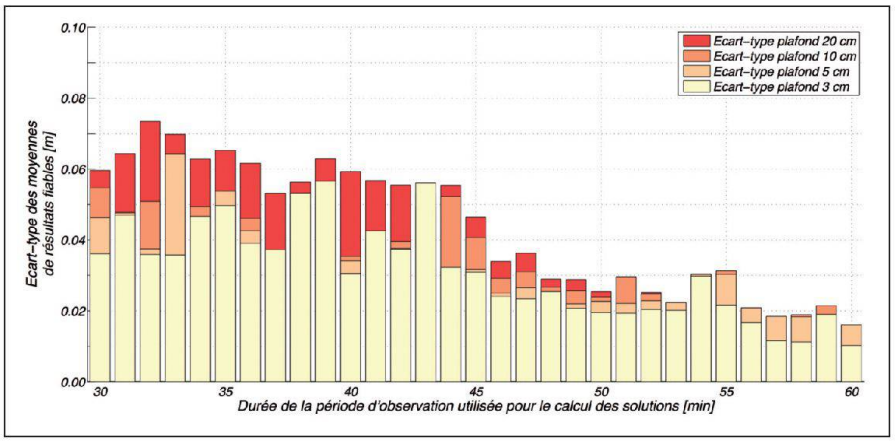

Fig. 8: Ecart-type de la moyenne de toutes les solutions de hauteurs fiables. Chaque écart-type est calculé pour une moyenne calculée en fonction de la durée d'observation utilisée et pour quatre plafonds d'écart-type (3 cm, 5 cm, 10 cm et 20 cm) définissant la fiabilité. Date et heure des observations: 22.11.2013 de 12h51 à 14h41 (GPST).

Les principales limites du système sont liées aux obstructions et à la taille du plan d'eau observé. Pour les obstructions, un cas évident est, sous nos latitudes, celui des versants nord des zones montagneuses (le raisonnement est inversé pour l'hémisphère sud). Pour ce qui est de la taille du plan d'eau, avec une hauteur de 5 m, un dégagement de 30 m est nécessaire.

Avant de devenir opérationnelle, l'expérience doit être répétée et le procédé doit être testé dans d'autres configurations afin de déterminer plus complètement son domaine de validité: hauteur et inclinaison de l'antenne, agitation et variation du niveau du plan d'eau. Il existe également un certain potentiel d'amélioration de l'algorithme: amélioration de la fiabilité et de la continuité par l'application de méthodes robustes ou par l'intégration de méthodes prédictives (par exemple filtre de Kalman). Lorsqu'il sera opérationnel, ce concept aura de sérieux atouts à faire valoir face aux limnimètres traditionnels. Vis-à-vis de ces derniers, il présente quatre avantages: coût peu élevé, besoin d'entretien faible, rapidité de mise en place sur structure existantes et géoréférencement «gratuit». Ce quatuor d'avantages en fait radicalement une méthode très économique

On imagine parfaitement l'utilisation d'un tel système dans des applications classiques: réservoirs, lacs, rivières. Une application particulièrement intéressante peut être son utilisation comme limnimètre d'urgence en cas d'inondations. La surface terrestre étant très bien décrite par des modèles numériques, une connaissance rapide et géoréférencée de la cote de l'inondation peut permettre d'avoir rapidement un aperçu détaillé de l'ampleur du phénomène. Ceci peut aider à une meilleure organisation des mesures d'urgence afin de limiter l'impact de tels évènements.

Parmi les développements futurs envisageables basés sur cette nouvelle méthodologie, on pourrait aussi tenter de rechercher le signal interférométrique dans

les mesures GPS issues des stations permanentes installées, souvent depuis plus de 20 ans, sur des marégraphes ayant une grande importance géophysique (p. ex. en France : Marseille, Brest, …). Ceci pourrait valider rétroactivement la qualité du rattachement altimétrique de l'antenne GPS au marégraphe historique, maillon particulièrement sensible de cette métrologie qui a pris une importance majeure dans l'expertise menée actuellement sur le réchauffement global et la hausse du niveau des mers.

Références bibliographiques:

[1] Alonso Arroyo A., *Water surface monitoring using GNSS-R opportunity signals,* M.A., Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions, Barcelone, Espagne, 2012.

[2] Helm A., *Ground-based GPS altimetry with the L1 OpenGPS receiver using carrier phase-delay observations of reflected GPS signals,* Th. doct., Fakultät VI Planen Bauen Umwelt, Technische Universität, Berlin, 2008.

[3] Larson K. M., Löfgren J. S., Haas R., «Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver», *Advances in Space Research,* Vol. 51, n°8, p.1301–1310, 2013.

[4] Martín-Neira M., «A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry», *ESA Journal,* Vol.17, p. 331–355, 1993.

[5] Roussel N., *Modélisation des trajets des signaux GNSS réfléchis à la surface de la Terre et comparaison des résultats avec des données acquises au cours de campagnes de mesures,* Mém. fin ét., Institut national des sciences appliquées, Strasbourg, France, 2012.

Eduardo Rodrigues
Ing. MSc HES-SO en Ingénierie du territoire
Bourgeois & Rudaz SA
Grande Rue 9
CH-1337 Vallorbe
eduardo.rodrigues@bourgeoisrudaz.ch

Michel Kasser
Professeur
HEIG-VD, Institut G2C
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
michel.kasser@heig-vd.ch