



# Limnimétrie par réflectométrie GNSS à faible coût

■ Eduardo RODRIGUES - Michel KASSER

*La réflectométrie GNSS (ou GNSS-R) est une famille de techniques de traitement des signaux GNSS en développement depuis une vingtaine d'années. Cette technique consiste en une utilisation opportuniste des signaux GNSS réfléchis, plus communément appelés multi-trajets et généralement considérés comme des perturbations. En tirant parti de ces multi-trajets, il est possible de déterminer des attributs géométriques ou d'autres propriétés des surfaces réfléchissantes. Si l'on s'intéresse à l'aspect géométrique et si 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 sur les berges du lac de Neuchâtel. 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.*

## MOTS-CLÉS

GNSS, réflectométrie, altimétrie, limnimétrie, triples différences, interférométrie

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 [7] sous le nom de PARIS : *P*Assive *R*eflectometry and *I*nterferometry 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, diffusiométrie (*scatterometry*) et étude de l'activité troposphérique et ionosphérique. La diffusiométrie recherche à qualifier d'autres propriétés des surfaces de réflexion que les aspects géométriques : rugosité de la surface maritime [2], salinité de l'eau de mer [8], détection de glace [3], humidité des sols [8], détection de marées noires [6], etc. La principale technique utilisée dans cette approche est la carte de Retard-Doppler ou DDM (*Delay-Doppler Map*) [9]. L'étude de l'activité atmosphérique [10] est réalisée sur la base d'observations acquises depuis des satellites en orbite basse. Ces études visent à déterminer les retards troposphériques et ionosphériques provoqués lors d'une double traversée inclinée de l'atmosphère.

La problématique altimétrique est celle qui est traitée dans ce travail. L'examen de l'état de 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 retransché 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,

## Contexte et objectif de l'étude

Depuis l'Antiquité, l'Homme a cherché à maîtriser ses ressources en eau. Que ce soit pour l'utiliser ou pour s'en protéger, les hydrauliciens ont, au fil du temps, étudié et développé toute une série de techniques et de modèles physico-mathématiques. Pour ce qui est de l'hydraulique en nappe libre (rivières, lacs, mers, réservoirs, etc.), l'une des données essentielles à ce domaine d'étude est le niveau de l'eau. Il existe divers instruments permettant la mesure de cette variable : échelle limnimétrique, flotteur, sonde à pression, etc. Tous ces instruments permettent la réalisation de mesures relatives. Elles sont suffisantes dans certains cas, mais si des mesures "absolues" sont nécessaires, un rattachement par des méthodes topométriques devient indispensable.

En ce sens, le développement de l'altimétrie satellitaire a répondu à ce besoin de référencement absolu. Lorsque l'on évoque ce

domaine, il est inévitable de parler des systèmes de positionnement par satellite. Initialement conçus pour des applications militaires, ils ont rapidement été réemployés à des fins civiles. Des techniques de positionnement GNSS permettant d'obtenir des résultats de précision millimétrique ont ainsi été développées. Pour arriver à une telle qualité, il est nécessaire d'évaluer ou d'éliminer toute une série d'erreurs : erreur d'orbite, erreur d'horloge, délai ionosphérique et troposphérique, multi-trajets, etc.

Parmi les erreurs qui entachent une position déterminée par GNSS, les multi-trajets font partie de celles qui peuvent être utilisées de manière opportuniste. Les multi-trajets 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



► 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.

## Géométrie de l'altimétrie GNSS-R [4]

La loi sur la réflexion de Snell-Descartes nous dit que, dans le cas d'une réflexion spéculaire, les angles incidents et réfléchis d'un rayon reflété sont égaux en valeurs absolues. La géométrie des applications altimétriques GNSS-R est basée sur cette loi physique. L'angle d'incidence est dans ce cas donné par l'élévation  $\varepsilon$  du satellite émetteur E. Pour des applications terrestres, au vu de l'éloignement des satellites GNSS ( $d_{ER} \approx d_{ES} \gg d_{RS}$ ), on admet que les signaux direct et réfléchi sont parallèles entre eux.

Le signal réfléchi présente un trajet supplémentaire  $\delta$  comparativement au signal direct. Ce trajet supplémentaire peut être divisé en deux composantes, l'une incidente  $P_i$  (il faut tenir compte du signe) et l'autre réfléchie  $P_r$ , tel que :  $\delta = P_i + P_r$  (1)

En admettant une géométrie simplifiée (Terre plate), avec  $P_r = P_{r'}$  :

$$P_i + P_{r'} = 2h \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right) \quad (2)$$

$\delta$  peut ainsi être exprimé en fonction de la hauteur  $h$  et de l'élévation  $\varepsilon$  :

$$\delta = 2h \sin \varepsilon \quad (3)$$

Par conséquent, la hauteur  $h$  en fonction de  $\delta$  et  $\varepsilon$  est exprimée ainsi :

$$h = \frac{\delta}{2 \sin \varepsilon} \quad (4)$$

Dans le cadre de l'application visée par ce projet, le modèle géométrique simplifié est parfaitement adapté. L'effet de courbure terrestre est ici négligeable.

## Signaux et antennes GNSS

Le but des lignes qui suivent est de rappeler quelques éléments utiles à la compréhension des principes de l'altimétrie par réflectométrie GNSS. Afin de simplifier le propos, seul le système GPS est évoqué.

Tous les GNSS émettent sur une plage de fréquences allant de 1.2 GHz à 1.6 GHz. GPS émet sur les fréquences  $L_1$  (1575.42 MHz),  $L_2$  (1227.60 MHz) et  $L_5$  (1176.45 MHz), et diffuse plusieurs

codes différents, dont le code C/A sur  $L_1$  pour les applications civiles et le code P (ou Y), à vocation militaire, modulé sur  $L_1$  et  $L_2$ . De par sa disponibilité civile, le code C/A est celui qui est utilisé dans les applications de GNSS-R. Il est constitué d'une séquence pseudo aléatoire (*Pseudo Random Noise* ou PRN) de 1023 bits cadencée à une fréquence de 1.023 MHz. À la vitesse de la lumière, pour qu'un récepteur puisse mesurer la pseudo-distance avec une précision de 3 m, la précision de son horloge doit être de 10 ns. On comprend intuitivement pourquoi l'altimétrie GNSS-R, au même titre que les autres applications de positionnement basées sur le code C/A, est limitée à une précision de plusieurs mètres.

Pour les applications basées sur la mesure de la phase ou sur la fréquence interférométrique, la fréquence  $L_1$  ( $\lambda = 19.03$  cm) est celle généralement utilisée. Il s'agit de la fréquence captée par les récepteurs courants. La réception des autres fréquences est généralement réservée au matériel haut de gamme.

La polarisation des ondes GNSS est circulaire droite (ou *RHCP Right Hand Circular Polarization*). Ce point est important car les antennes GNSS standard sont pratiquement toutes de ce type. Cette caractéristique est notamment utilisée pour diminuer les effets des multi-trajets. Un signal GNSS, réfléchi une fois, subit une inversion de polarisation, devenant ainsi de type circulaire gauche (*LHCP Left Hand Circular Polarization*). C'est le cas lors d'une réflexion sur une surface d'eau. Une antenne RHCP rejette donc les ondes LHCP, ou du moins en diminue la puissance, typiquement de 8 à 15 dB. Or, en réflectométrie GNSS, on cherche à utiliser ces signaux. C'est pourquoi pour les applications GNSS-R, les chercheurs utilisent aussi des antennes spéciales de type LHCP en complément d'antennes normales (RHCP), ou encore des antennes à polarisation linéaire : il s'agit donc d'antennes non classiques, et donc passablement onéreuses, qui impliquent en outre l'emploi de deux récepteurs différents, un pour l'onde directe et un pour l'onde réfléchie.

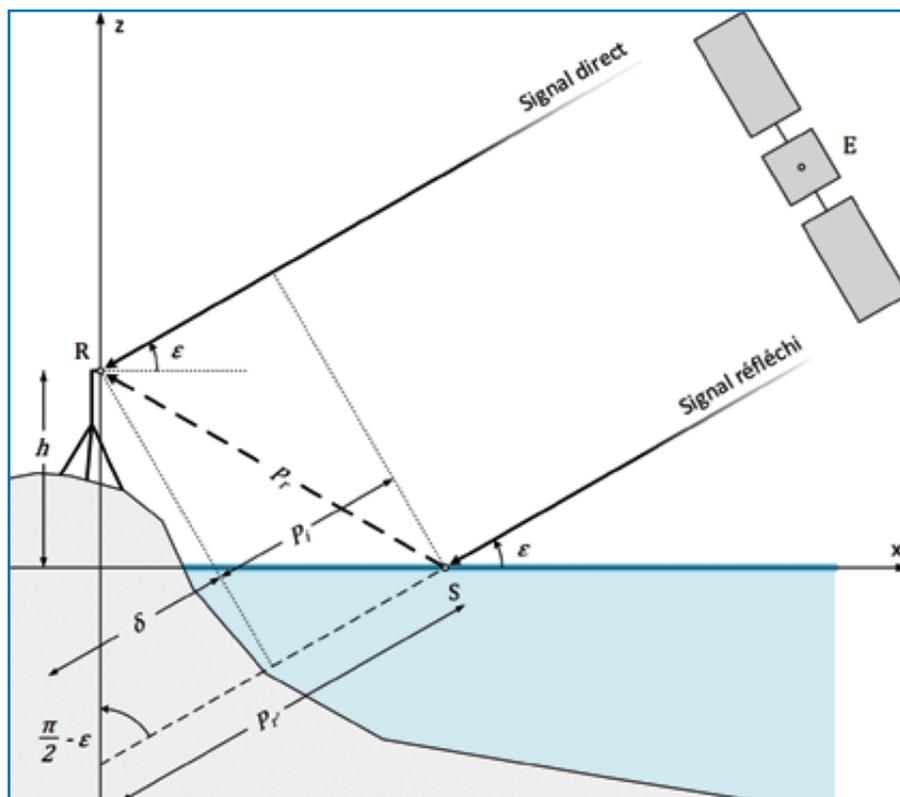


Figure 1. Géométrie simplifiée (Terre plate) d'une réflexion spéculaire de signal GNSS.



## Méthodes d'altimétrie GNSS-R [4]

Les méthodes GNSS-R de détermination altimétrique sont divisées en trois groupes :

- traitement sur la mesure de code C/A
- traitement sur la mesure de phase
- traitement sur la fréquence interférométrique

Pour les deux premières méthodes, l'idée est de déterminer le trajet supplémentaire  $\delta$  afin de calculer  $h$  selon la relation. Dans le cadre de l'application visée par ce projet, le modèle géométrique simplifié est parfaitement adapté. L'effet de courbure terrestre est ici négligeable. Le traitement sur la mesure du code C/A est réalisé avec la même méthode que la détermination de la pseudo-distance, c'est-à-dire la corrélation du signal reçu par rapport à une réplique du code PRN généré par le récepteur. Le signal direct donne un premier pic de corrélation à un instant  $t_0$ . Lorsque le signal réfléchi parvient au récepteur, un second pic de corrélation apparaît avec un certain retard à un instant  $t_r$ . En multipliant ce retard temporel par la vitesse de propagation de l'onde porteuse (ici la vitesse de la lumière  $c$ ), on obtient le trajet supplémentaire  $\delta$  :

$$\delta = c(t_r - t_0) \quad (5)$$

Le positionnement GNSS par mesure de phase consiste à déterminer la distance émetteur-récepteur en mesurant le déphasage  $\varphi$  de l'onde porteuse et en fixant le nombre de cycles entiers parcourus (ambiguïté  $N$ ). En altimétrie GNSS-R, le principe reste le même, hormis le fait que le travail est réalisé en double, une première fois pour le signal direct ( $\varphi_d$  et  $N_d$ ) et une seconde pour le signal réfléchi ( $\varphi_r$  et  $N_r$ ). La détermination du trajet supplémentaire  $\delta$  revient à calculer la différence entre les deux parcours de l'onde soit :

$$\delta = \lambda(\varphi_r + N_r) - \lambda(\varphi_d + N_d) \quad (6)$$

La précision altimétrique du traitement sur la phase est subdécimétrique. Les méthodes sur le code C/A et sur la phase nécessitent l'emploi de deux antennes (LHCP et RHCP) pour distinguer les signaux directs et réfléchis.

La troisième méthode tire avantage du phénomène d'interférences. Au

point de réception, les signaux direct et réfléchi se superposent. Comme ils sont cohérents et que la longueur du trajet supplémentaire  $\delta$  est un multiple de leur demi-longueur d'onde  $\lambda$ , on peut observer des interférences constructives ou destructives. Selon la relation remplacer par (3),  $\delta$  est fonction de l'élévation  $\varepsilon$  du satellite. Comme la position du satellite évolue constamment,  $\delta$  varie en fonction du temps et on peut observer une variation de l'amplitude du signal reçu. Lorsque  $\delta = n\lambda$ , on observe une amplitude maximale, donc une interférence constructive. Lorsque  $\delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$  on observe une amplitude minimale (elle serait même nulle si les deux signaux avaient la même amplitude), donc une interférence destructive. Par une analyse spectrale du signal reçu, on peut déterminer la fréquence interférométrique  $f_i$  au sein du signal. Cette dernière permet de calculer la hauteur  $h$  avec la relation suivante :

$$h = \frac{\lambda f_i}{2 \cos \varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt}} \quad (7)$$

Avec cette méthode, la précision de  $h$  dépend de la hauteur du récepteur. Plus elle est élevée, plus la précision du résultat est faible (et inversement).

## Méthode appliquée

Dans le cas de ce travail, les méthodes de traitement sur le code C/A et sur la phase ne sont pas envisageables. Un premier point en défaveur de la méthode sur le code C/A est sa faible précision. Mais le fait que deux antennes soient nécessaires est la principale raison de cette rapide mise au ban. Pour ce qui est de la technique de traitement sur la fréquence interférométrique, cette méthode n'est ici pas directement utilisable. La mesure de  $f_i$  nécessite un matériel spécifique permettant un enregistrement brut et continu du signal radio des GNSS. Cela sort clairement du cadre défini, car l'utilisation de matériels conventionnels est un aspect important de l'étude.

### ■ Hypothèses initiales

Le sens de polarisation circulaire d'une antenne GNSS entraîne le rejet, ou tout du moins la diminution de l'effet,

des ondes ayant subi une inversion de polarisation (onde réfléchie une fois). L'effet de ces ondes n'étant jamais totalement éliminé, on fait ici l'hypothèse que 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 GPS 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 paraît le plus adéquat. Bien que son bruit soit plus élevé que celui des doubles différences, l'omniprésence du risque de sauts de cycle dans le cas traité lui donne la préférence. 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. Sur la base de toutes ces considérations, le travail 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.

### ■ Concept

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 donc 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 autour d'une valeur approchée 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. En prenant quelques valeurs autour de ce maximum et en y appliquant une régression polynomiale du 2<sup>e</sup> degré, la valeur du coefficient de corrélation maximal est ainsi affinée. L'opération est répétée sur les résultats de corrélation des signaux simulés de quelques hauteurs voisines de celle présentant le maximum. En prenant les deux hauteurs voisines inférieures et les deux supérieures, cinq coefficients de corrélation sont obtenus au total. Les cinq hauteurs liées à ces coefficients de corrélation doivent théoriquement entourer la hauteur réelle. En calculant une régression polynomiale du 2<sup>e</sup> degré sur ces coefficients de corrélation, le sommet de la parabole donne finalement la hauteur recherchée.

**Modèle mathématique**

Soit  $h_a \in \mathbb{N}^*$  une valeur approchée de la hauteur d'eau. Sur la base de  $h_a$ , une suite de hauteurs théoriques  $h_n$  est définie telle que :

$$h_n = h_a - k + \frac{(n-1)}{10} \quad (8)$$

où  $h_a - k \leq h_n \leq h_a + k$ ,  $k < h_a$  et  $k \in \mathbb{N}^*$

La relation par conséquent, la hauteur  $h$  en fonction de  $d$  et  $e$  est exprimée ainsi : définit le lien entre  $\delta$ ,  $\varepsilon$  et  $h$ . En divisant cette relation par  $\lambda$ , on obtient la fraction de  $\lambda$  contenue dans  $\delta$ . En calculant le sinus de cette valeur multipliée par  $2\pi$  et cela pour l'élévation  $\varepsilon$  d'un satellite mesurée à chaque époque  $i$ , on décrit une suite discrète représentant un signal interférométrique simulé  $S_{sim}$ . Ainsi pour chaque hauteur  $h_n$ ,  $S_{sim_n}$  est donné par la relation suivante :

$$S_{sim_n} = \sin\left(\frac{2h_n \sin \varepsilon_i}{\lambda} 2\pi\right) \quad (9)$$

Pour un nombre  $M$  d'époques  $i$  et pour les  $n$   $S_{sim}$  calculés, une corrélation croisée (sans normalisation) est calculée entre chaque  $S_{sim}$  et  $TD_{res}$ . La fonction de corrélation (discrète) utilisée est la suivante :

$$\hat{R}_{TD_{res}S_{sim_n}}(m) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{M-m-1} TD_{res,i+m} S_{sim_n,i} & , m \geq 0 \\ \hat{R}_{TD_{res}S_{sim_n}}^*(-m) & , m < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Les résultats de ces multiples corrélations croisées sont des vecteurs de longueur  $2M-1$  dont les valeurs sont les coefficients de corrélation

$$C_n(m) = \hat{R}_{TD_{res}S_{sim_n}}(m - M) \quad m = 1, 2, \dots, 2M - 1 \quad (11)$$

Le coefficient de corrélation maximum  $C_{max}$  identifie quel  $S_{sim_n}$  corrèle le mieux avec  $TD_{res}$  et de surcroît quelle  $h_n$  est la plus proche de la hauteur réelle. On les appellera  $S_{sim_{max}}$  et  $h_{max}$ . La fonction  $S_{sim}$  sur laquelle est appliquée la fonction de corrélation étant une sorte de sinusoïdale, le résultat de la corrélation est également une ondulation dont l'amplitude varie en fonction de l'intensité du lien existant entre les deux variables testées. Le sommet de chaque ondulation étant proche d'une fonction parabolique, on affine le calcul de  $C_{max}$  en faisant une régression

polynomiale du 2<sup>e</sup> degré sur quelques valeurs voisines :

$$p(C) = p_1 C^2 + p_2 C + p_3 \quad (12)$$

En utilisant les coefficients  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  et en admettant que

$$\sqrt{p_2^2 - 4p_1 p_3} \geq 0 \text{ et } p_1 < 0,$$

la fonction  $p(C)$  possède un maximum réel :

$$C_{max} = -\frac{p_2^2 - 4p_1 p_3}{4p_1} \quad (13)$$

L'opération de recherche et d'affinage du coefficient de corrélation maximum est répétée pour  $h_{max-2}$ ,  $h_{max-1}$ ,  $h_{max+1}$ , et  $h_{max+2}$ . On obtient ainsi une série de valeurs de coefficient de corrélation

$y = \{C_{max-2}, C_{max-1}, C_{max}, C_{max+1}, C_{max+2}\}$  ayant pour abscisse les hauteurs  $x = \{h_{max-2}, h_{max-1}, h_{max+1}, h_{max}, h_{max+2}\}$ . En y appliquant une régression polynomiale du 2<sup>e</sup> degré :

$$p(x) = p_1 x^2 + p_2 x + p_3 \quad (14)$$

l'abscisse du maximum nous donne alors directement la hauteur réelle cherchée :

$$h = -\frac{p_2}{2p_1} \quad (15)$$

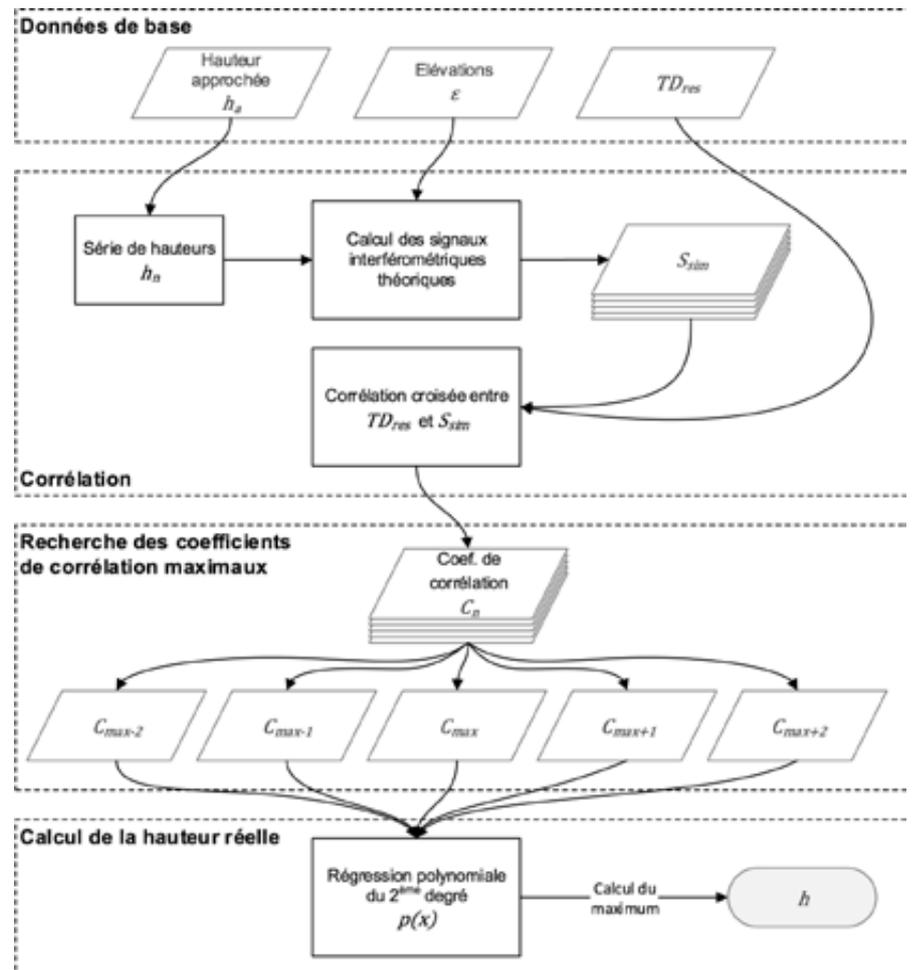


Figure 2. Schéma du concept de calcul de la hauteur par corrélation croisée de triples différences et de signaux interférométriques théoriques.



## 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  $L_1$ , 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 ( $3.99 \text{ m} \pm 2 \text{ cm}$ ).

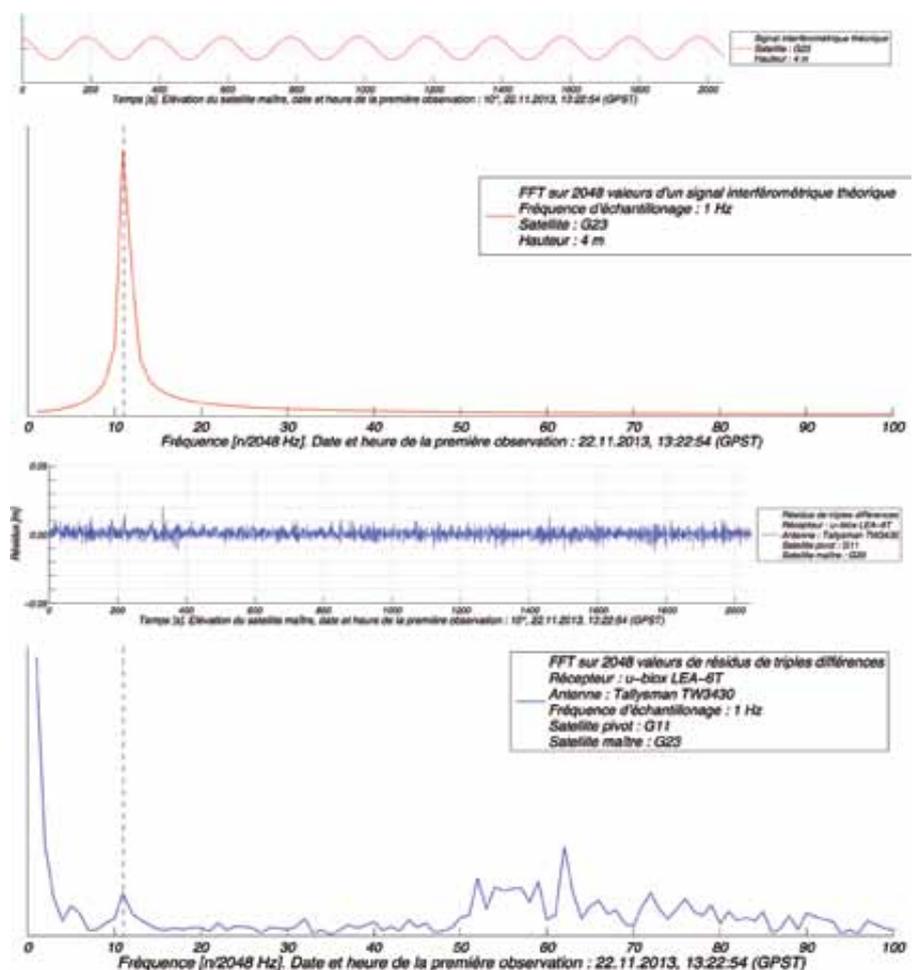


**Figure 3.** Installation de la campagne d'acquisition du 22 novembre 2013. On remarque l'antenne, fixée avec son axe horizontal pointant vers le lac.

## Vérification des hypothèses

Les résidus des triples différences d'une paire de satellites donnée doivent donc théoriquement contenir les signaux interférométriques générés par l'interaction entre les ondes directes et réfléchies de chaque satellite. Avant d'engager un traitement approfondi des données, nous avons vérifié ce point par analyse spectrale. Par ailleurs, les signaux recherchés ont des fréquences très basses ( $T > 100 \text{ s}$ ). Les données acquises étant échantillonnées à 1 Hz, la condition d'échantillonnage de Nyquist-Shannon est largement remplie.

Pour commencer l'analyse spectrale, il est nécessaire de connaître la fréquence interférométrique théorique. Comme celle-ci varie en permanence, le plus



**Figure 4.** 1- Signal interférométrique théorique utilisé pour la FFT. 2- FFT sur 2048 valeurs de signal interférométrique théorique pour la détermination de la fréquence fondamentale théorique (zoom sur les 100 premières valeurs de la FFT). 3- Série de résidus de triples différences utilisée pour la FFT. 4- FFT sur 2048 valeurs de résidus de triples différences réellement mesurées pour la recherche de la fréquence fondamentale théorique (zoom sur les 100 premières valeurs de la FFT).

simple est d'utiliser un  $S_{sim}$  et de le passer dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une transformée de Fourier discrète (TFD voire *FFT* pour un nombre d'échantillons égal à une puissance de 2). La hauteur utilisée pour le  $S_{sim}$  est la hauteur de référence mesurée *in situ*, soit 3.99 m. Le signal recherché est ainsi mis en évidence (cf. figure 4-2).

Ce signal étant déterminé, il faut le rechercher dans les  $TD_{res}$ . Pour cela, une *FFT* est appliquée aux  $TD_{res}$  associées au  $S_{sim}$  utilisé précédemment. Il faut alors examiner si un pic se dégage sur la zone de fréquences de  $S_{sim}$ . Comme on peut le voir sur la figure 4-4, c'est effectivement le cas. Bien qu'il soit de faible intensité, il est bel et bien présent. L'opération a été réalisée sur plusieurs jeux de données et cette zone de fréquences est systématiquement retrouvée. Par conséquent, cette analyse valide les hypothèses initiales.

## Analyse des résultats

### ■ Paramètres contraignants

Les analyses de résultats montrent que l'élévation du satellite maître est un facteur particulièrement limitatif dans le bon fonctionnement du calcul, ce qui à la base semble assez logique. Néanmoins les résultats commencent à diverger aux alentours d'une élévation de 40°. Il s'agit de l'élévation moyenne du satellite durant la période d'observation, d'où une limite fixée à 55° pour les observations. 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

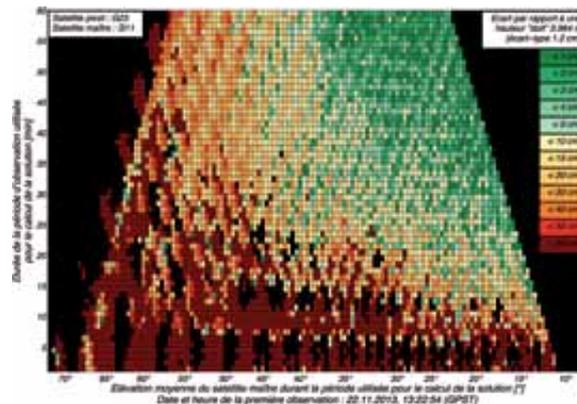


Figure 5. Qualité des solutions (une par minute) en fonction de l'élévation du satellite maître et de la durée d'observation utilisée. Solutions pour satellite maître G11 et pivot G23.

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. figure 5).

### ■ Résultats finaux et performances

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 et les résultats sont analysés selon trois critères :

- Précision : comparaison à une valeur de référence.

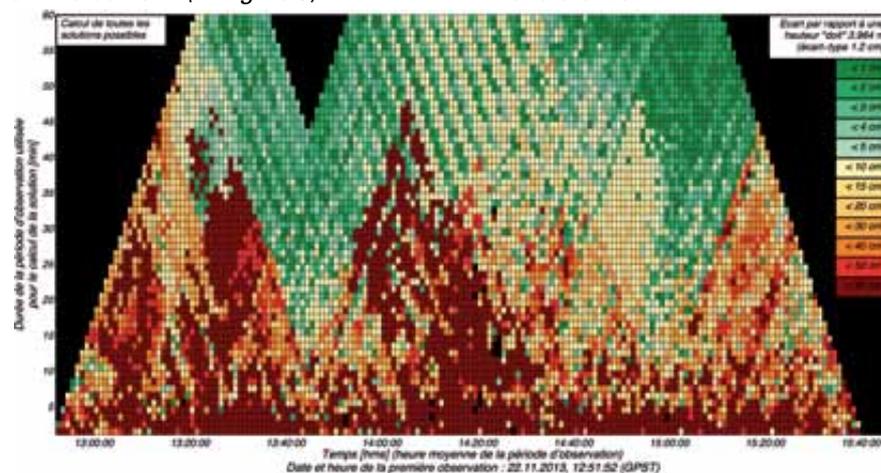


Figure 6. Qualité de toutes les solutions calculées sur l'ensemble des données mesurées en fonction de la durée d'observation utilisée. Une solution par minute est calculée. Le résultat est une moyenne lorsqu'il y a plus d'une détermination individuelle.

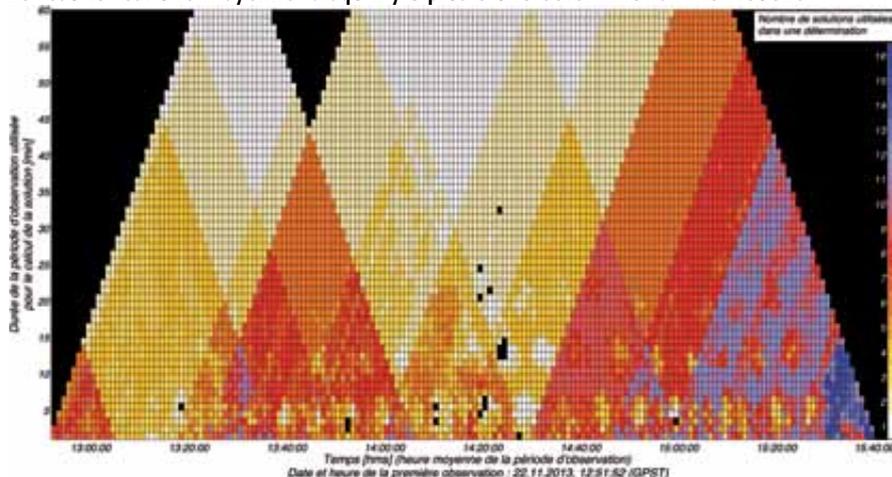


Figure 7. Nombre de déterminations individuelles utilisées pour chaque solution.

- 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 sont calculées. Cela entraîne une diminution du nombre de solutions fiables et de surcroît un affaiblissement de la continuité. La *figure 8-2* montre bien qu'avec une longue durée d'intégration et écart-type plafond de 3 cm, le taux de réussite est très faible. La *figure 9*

expose l'effet sur le taux de réussite lorsqu'on fait varier ces contraintes. La *figure 10* présente la dispersion (écart-type) des séries de résultats calculées selon les contraintes appliquées. Le choix de ces dernières dépend donc du besoin : précision ou continuité.

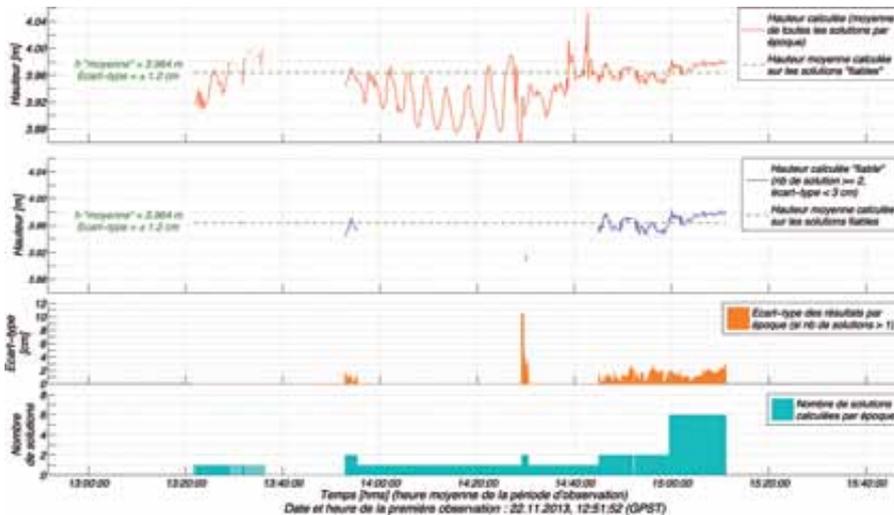
## Conclusion et perspectives

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'algorithme 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.

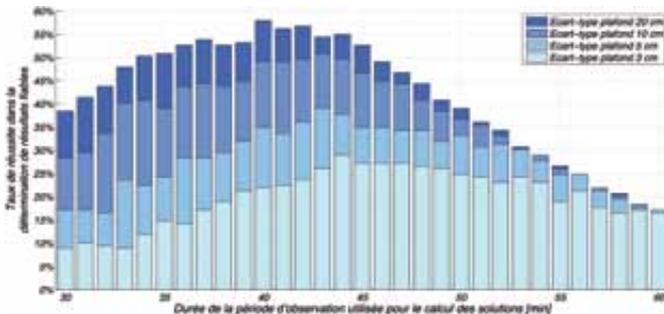
L'expérimentation menée sur des données acquises en situation réelle montre qu'il est possible d'obtenir une hauteur d'eau de précision centimétrique. Toutefois, les essais font apparaître qu'un tel résultat ne peut être atteint qu'avec des conditions préalables relativement contraignantes. Cela diminue 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.

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.

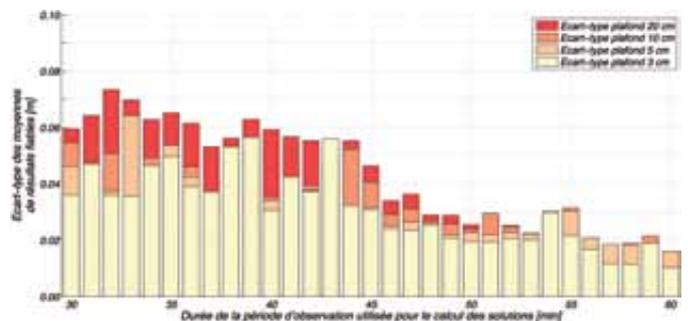
Le raisonnement est inversé pour l'hémisphère sud. Pour ce qui est de la taille du plan d'eau, avec une hauteur de 5 m, un dégagement de 30 m est nécessaire.



**Figure 8.** 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 - Écart-type (min. 2 solutions), 4 - Nombre de solutions calculées par époque.



**Figure 9.** 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 calculé 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 15h41 (GPST).



**Figure 10.** Écart-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 15h41 (GPST).

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.

Un premier avantage en sa faveur est son faible coût. Il reste donc parfaitement concurrentiel face aux systèmes traditionnels. Le faible entretien que demande un limnimètre GNSS est un autre argument à son avantage. En effet, une fois en place, il fonctionne de manière autonome et connaît peu de perturbations externes. Les capteurs classiques demandent également plus d'entretien : problèmes de dépôts sédimentaires sur les capteurs subaquatiques, accrochage d'algues sur les flotteurs, etc. Contrairement à certains systèmes qui demandent une infrastructure relativement lourde (génie civil, boîtiers de protection, etc.), un limnimètre GNSS à faible coût est simplement et rapidement mis en place. Finalement, l'avantage le plus important de ce procédé est son géoréférencement absolu. Le récepteur GNSS est ici utilisé de manière détournée et opportuniste, mais il conserve tout de même sa première fonction : un système de positionnement global. Le calcul de sa position, couplé à la méthode élaborée, permet de directement connaître la cote absolue du plan d'eau observé. Le premier argument présenté ci-dessus est le faible coût du matériel. On pourrait croire que le terme *low-cost* est ici employé uniquement vis-à-vis de ce point. Il n'en est rien. C'est le quatuor coût, entretien, installation et géoréférencement absolu qui 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 événements.

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. ●

## Contacts

**Eduardo RODRIGUES**  
eduardo.rodrigues@bourgeoisrudaz.ch

**Michel KASSER**  
michel.kasser@heig-vd.ch

## 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] **Clarizia M. P. et al.**, "Analysis of GNSS-R delay-doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean", *Geophysical Research Letters*, Vol.36, n°2, 2009
- [3] **Gleason S.**, *Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit*, Th. doct., University of Surrey, Guildford, Royaume-Uni, 2006
- [4] **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

[5] **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

[6] **Li C., Huang W.**, "Simulating GNSS-R delay-doppler map of oil slicked sea surfaces under general scenarios", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 48, p. 61-76, 2013

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

[8] **Rodríguez Álvarez N.**, *Contributions to earth observations using GNSS-R opportunity signals*, Th. doct., Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelone, Espagne, 2011

[9] **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

[10] **Ruffini G. et al.**, "Using GNSS reflections for ionospheric studies", *Space Weather Workshop : Looking Towards a European Space Weather Programme*, 2001

## ABSTRACT

**Key Words:** GNSS, reflectometry, altimetry, limnometry, triple differences, interferometry

GNSS reflectometry (or GNSS-R) is a family of techniques in development for twenty years for GNSS signals processing. This technique consists of an opportunistic use of GNSS reflected signals, more commonly called multi-paths and often considered as disturbances. By taking advantage of these multi-paths, it is possible to determine geometric attributes or other properties of the reflective surfaces. If one is interested in the geometrical aspect and if the reflective surface is water, then the GNSS receiver becomes a limnimeter. The goal of this project is to examine to what extent this GNSS-R gauging principle can be used with low-cost GNSS equipment. For this purpose, a data acquisition experiment is carried out on the shores of Neuchâtel's Lake. An algorithm based on the use of triple differences is proposed. Under calm water conditions and given certain constraints (observation's duration, satellite elevation), the developed technique works and provides results with centimetric accuracy.