

## En quête de justesse

■ Bernard CATALA-COTTINI

*Veiller à l'exactitude des données mesurées, en particulier des profondeurs, doit être une des préoccupations majeures de l'hydrographe. Si la fidélité des mesures dépend essentiellement des qualités intrinsèques des différents équipements qui composent un système bathymétrique, leur justesse est très fortement liée à la connaissance de la géométrie de ce système et à la méthodologie mise en œuvre lors des sondages. Les incertitudes de mesure, en position et en profondeur, peuvent être estimées par des calculs théoriques, mais seuls des moyens de contrôle purement pratiques peuvent permettre de qualifier réellement une chaîne de mesure bathymétrique. Le présent article relate les différentes opérations effectuées dans cette optique, par une des équipes en charge de la bathymétrie au sein de Voies Navigables de France (VNF).*

### MOTS-CLÉS

Bathymétrie, dragage, sondeur multifaisceaux, justesse, surface de référence, barre de contrôle

du Midi, qui le prolonge au-delà de l'étang de Thau, accueille également de nombreux bateaux de tourisme, en saison.

Le Canal du Rhône à Sète, dans sa partie Ouest, est au cœur d'un système hydrologique complexe, formé par des étangs littoraux et des fleuves côtiers (Lez, Vidourle). De ce fait, il est soumis à une forte sédimentation et le maintien de son mouillage théorique de 3 m nécessite des opérations de dragage régulières. De 2013 à 2017, le volume moyen dragué annuellement a été de l'ordre de 80 000 m<sup>3</sup>, dont 58 % en régie et 42 % par entreprise, avec 59 % par dragage hydraulique et 41 % par dragage mécanique.

### Présentation de la Cellule Bathymétrie de Palavas

Le terrain d'action de la Cellule Bathymétrie de Palavas s'étend sur 180 km de voies d'eau (figure 1) :

- Le Canal du Rhône à Sète : sa branche principale, de l'écluse de Saint-Gilles au port de Sète, et ses branches secondaires.

### Introduction

Voies Navigables de France (VNF) est un établissement public à caractère administratif, chargé de gérer la majeure partie du réseau des voies navigables de France, soit 6 700 km de fleuves, rivières et canaux. VNF, dont le siège est à Béthune (Pas-de-Calais), est organisé en sept directions territoriales, regroupant 4 300 agents.

La Direction Territoriale Rhône Saône (DTRS), dont le siège est à Lyon, dispose de deux cellules en charge de la bathymétrie, dont l'une, au Sud du service, au sein de la Subdivision de Frontignan (Hérault). Opérationnelle

depuis 2006, elle est basée au Centre d'Exploitation de Palavas-les-Flots, dont l'activité principale est le dragage du Canal du Rhône à Sète, réalisé en régie, à l'aide d'une drague aspiratrice (dragage hydraulique) et d'une pelle sur ponton (dragage mécanique), couplé à un chaland à clapets.

Comme son nom l'indique, le Canal du Rhône à Sète relie le port de Sète à l'hinterland rhodanien. Il est emprunté par une flotte de bateaux de commerce d'une douzaine d'unités, chargeant en moyenne 1 100 tonnes. Le trafic annuel de marchandises est de l'ordre de 300 000 tonnes. Le Canal du Rhône à Sète, à ne pas confondre avec le Canal



Figure 1. Terrain d'action de la Cellule Bathymétrie



Photo 1. Le Bourgidou



Photo 2. Le Corobathe



- Le Petit Rhône : du Grand Rhône (défluent d'Arles) à son embouchure en mer.
- Le Grand Rhône : des quais, notamment à Avignon, Arles et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

La Cellule Bathymétrie dispose de 2 moyens nautiques :

- Le "Bourgidou" (photo 1) : moyen nautique principal.
- Le "Corobathe" (photo 2) : moyen nautique complémentaire, transportable sur remorque, pour interventions lointaines et/ou en faibles profondeurs.

L'équipement hydrographique spécifique, à poste fixe, du Bourgidou comprend :

- Un sondeur multifaisceaux R2sonic 2020 (depuis 2014).
- Un célérimètre de coque Valeport miniSVS.
- Une centrale d'attitude SMC IMU-108.
- Un gyrocompas VTSS SG Brown Meridian.

Le Corobathe est lui équipé d'un sondeur monofaisceau Marine Electronics 11001, sur perche.

Les équipements communs aux deux bateaux sont les suivants :

- Un système de positionnement GNSS NRTK Spectra Precision SP90m (depuis 2018, en remplacement d'un Leica GX1230GG), avec abonnement au réseau Orphéon.
- Un profileur de célérité Valeport miniSVP.
- Un limnimètre enregistreur mobile OTT Orpheus Mini.
- Un PC portable durci GETAC X500G2.
- Le logiciel d'acquisition et de traitement Hypack-Hysweep.
- Un sonar latéral Starfish 990F, mis en œuvre ponctuellement.

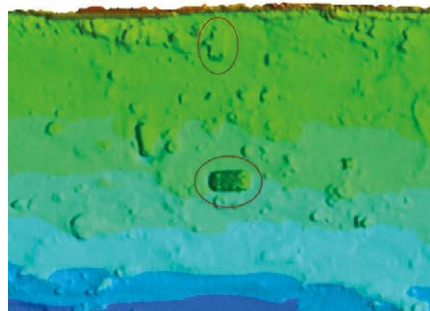


Figure 2. Épaves de voiture détectées au sondeur multifaisceaux

Les travaux bathymétriques dont la Cellule bathymétrie a la charge sont :

- Des bathymétries générales, qui permettent de suivre l'évolution des fonds et d'établir le programme des dragages.
- Les contrôles bathymétriques des chantiers de dragage, qu'ils soient effectués en régie ou par entreprise, et des travaux de modernisation du Canal du Rhône à Sète.
- La détection d'obstructions : épaves de voiture (figure 2), de bateau, ou autres objets, au sondeur multifaisceaux et au sonar latéral.

La Cellule Bathymétrie réalise également des travaux topographiques, en lien avec la bathymétrie, le dragage et les travaux de modernisation du Canal du Rhône à Sète.

## Petit rappel de métrologie

La **fidélité** (*precision* en anglais) correspond à l'écart entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées (définition issue du vocabu-

laire international de métrologie / réf. [1]). Évaluation possible par l'écart-type ( $\sigma$ ), relatif à la moyenne des valeurs mesurées.

La **justesse** (*trueness* en anglais) qualifie l'écart entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence (définition VIM / réf. [1]). C'est l'aptitude d'un instrument à fournir des indications exemptes d'erreurs systématiques. Évaluation possible par l'écart moyen, ou biais.

L'**exactitude** (*accuracy* en anglais) définit l'écart entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande (définition VIM / réf. [1]). Elle traduit à la fois la justesse et la fidélité. Évaluation possible par l'écart moyen quadratique (EMQ), relatif à la valeur vraie.

Ces notions, évoquées dans cet article, peuvent être représentées graphiquement comme sur la figure 3.

## A l'origine de l'enquête

La Cellule Bathymétrie dispose d'une surface de référence qui correspond à un tronçon du radier de l'écluse de Saint-Gilles, long de 69 m et large de 12 m, levé, en interne, à l'occasion d'un chômage de l'écluse, en 2013, et dont la détermination est détaillée plus loin. La comparaison des levés bathymétriques successifs de cette surface de référence, au sondeur multifaisceaux, avec son levé topographique, met en évidence que **les bathymétries multifaisceaux sont systématiquement plus profondes que la référence, d'un écart moyen de 3 cm (tableau 1).**

Les différences altimétriques entre un de ces levés bathymétriques de la surface de référence (7 juin 2017), au sondeur multifaisceaux, et son levé topographique, sont visualisées sur la figure 4. Par ailleurs, la comparaison de levés de secteurs sondés à la fois au multifaisceaux et au monofaisceau, bien que partiellement pertinente, montre que les premiers sont systématiquement plus profonds que les seconds, d'un écart moyen de 4 cm (tableau 2), alors même que le levé de la surface de référence, au sondeur monofaisceau, ne présente pas de biais (tableau 3).

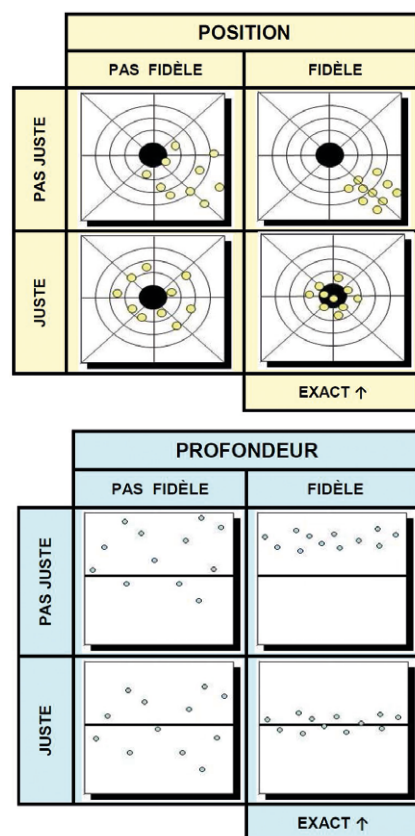


Figure 3. Justesse, fidélité et exactitude



| Bathymétrie multifaisceaux du radier (en 4 passes) |       |                                 |                        |  |        | Justesse                 |             |       | Fidélité         |     | Exactitude |
|--|-------|---------------------------------|------------------------|--|--------|--------------------------|-------------|-------|------------------|-----|------------|
| Date   | Sas   |                                 | Immersion<br>sondeur m | Points   |        | Écart Z SMF – Z topo. cm |             |       | Écart<br>type cm | %   | EMQ cm     |
|  | Etat  | Niveau d'eau m /<br>0 NGF-IGN69 |                        | Type   | Nombre | min.                     | max.        | moyen |                  |     |            |
| 10/06/2015   | vide  | 0,22                            | 0,64                   | points<br>moyens /<br>matrice 0.50 m                     | 3781   | -5                       | 11          | -2,3  | 1,5              | 87% | 2,8        |
| 02/08/2016   | plein | 0,45                            | 0,64                   | points moyens<br>(500 points ~ /<br>m²) / matrice 1<br>m | 1040   | -6                       | 8           | -4,2  | 1,2              | 95% | 4,3        |
| 07/12/2016   | plein | 0,48                            | 0,64                   |  | 971    | -7                       | 6           | -3,1  | 1,1              | 72% | 3,3        |
| 07/06/2017   | vide  | 0,18                            | 0,65                   |  | 1019   | -6                       | -1          | -3,7  | 0,8              | 83% | 3,8        |
| 05/09/2017   | vide  | 0,23                            | 0,64                   |  | 1027   | -4                       | 1           | -2,1  | 0,8              | 52% | 2,2        |
|  |       |                                 |                        |  |        |                          | Écart moyen | -3,1  |                  |     |            |

Tableau 1. Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence

Tableau 1. Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence

| Site                 | Bathymétrie SMF       |   | Bathymétrie monofaisceau |   | Nombre<br>points | Écart Z SMF – Z mono. cm |             |       | Écart<br>type cm | %   |
|----------------------|-----------------------|---|--------------------------|---|------------------|--------------------------|-------------|-------|------------------|-----|
|                      | Date                  | Données                                 | Date                     | Données   |                  | min.                     | max.        | moyen |                  |     |
| Fosse de Frontignan  | 18/02/2016            | points<br>moyens /<br>matrice 0.50<br>m | 19/02/2016               | points non<br>interpolés / profils<br>espacés de 2 m            | 53496            | -58                      | 29          | -5,3  | 6,7              | 74% |
| Carrefour de Caramus | 06/10 →<br>25/11/2016 |   | 28/11/2016               | points interpolés à<br>1 m / tin / profils<br>espacés de 10 m   | 15558            | -54                      | 33          | -4,5  | 8,3              | 78% |
| Carnon               | 06/01/2017            |   | 09/01/2017               | points interpolés à<br>0.50 m / tin / profils<br>espacés de 5 m | 12404            | -34                      | 10          | -3,0  | 4,4              | 74% |
| Fosse de Frontignan  | 31/01/2017            |   | 30/01/2017               | points non<br>interpolés / profils<br>espacés de 2 m            | 44479            | -42                      | 27          | -4,9  | 5,0              | 75% |
|                      |                       |   |                          |   |                  |                          | Écart moyen | -4,4  |                  |     |

Tableau 2. Comparaison de levés bathymétriques multifaisceaux et monofaisceau

Tableau 2. Comparaison de levés bathymétriques multifaisceaux et monofaisceau

| Bathymétrie monofaisceau du radier (en 10 profils en long) |       |                              |                     |  |        |                            | Justesse | Fidélité |               | Exactitude |        |
|--|-------|------------------------------|---------------------|--|--------|----------------------------|----------|----------|---------------|------------|--------|
| Date   | Sas   |                              | Immersion sondeur m | Points   |        | Écart Z mono. – Z topo. cm |          |          | Écart type cm | %          | EMQ cm |
|  | Etat  | Niveau d'eau m / 0 NGF-IGN69 |                     | Type   | Nombre | min.                       | max.     | moyen    |               |            |        |
| 08/08/2014   | plein | 0,78                         | 0,12                | points non interpolés / profils espacés de 1 m | 2262   | -9                         | 3        | -0,4     | 1,0           | 71%        | 1,1    |

Tableau 3. Levé bathymétrique monofaisceau de la surface de référence

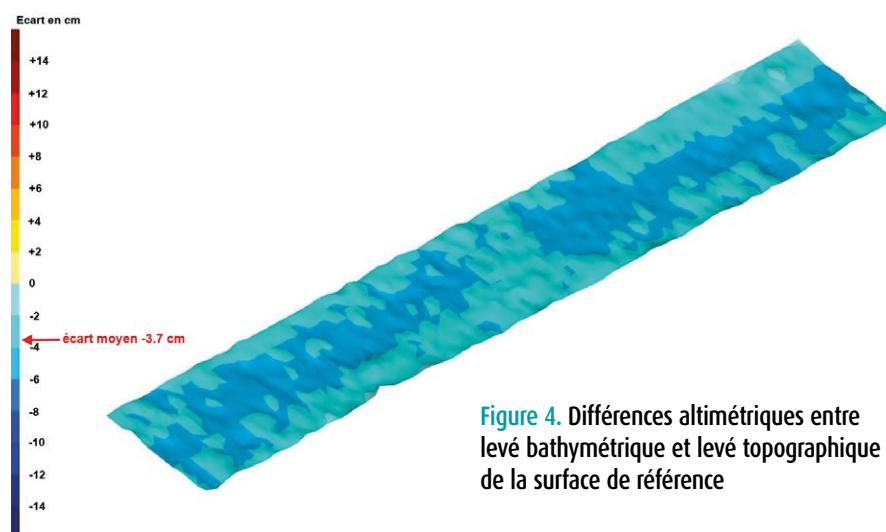


Figure 4. Différences altimétriques entre levé bathymétrique et levé topographique de la surface de référence

ceux du Bourgidou, de 3 cm environ.

Un tel défaut de justesse n'est pas anodin, au regard des volumes de dragage induits et des montants financiers en jeu.

Même si ce décalage s'annule dans un différentiel brut entre 2 bathymétries réalisées par la Cellule Bathymétrie, typiquement avant et après les travaux, il n'en va pas de même pour une comparaison faite avec une bathymétrie qui serait réalisée par un intervenant extérieur et/ou faisant intervenir un chenal théorique.

Prenons l'exemple concret du dragage par une entreprise, au ponton-pelle, d'une portion du canal, longue de 1850 m, ayant pour objectif de reconstituer le chenal théorique, composé d'un plafond large de 12 m, à la profondeur de -3.20 m, et de 2 talus latéraux de pente 3/1. Le volume dragué facturable correspond à la différence des levés avant et après

En outre, lors d'une comparaison entre vedettes bathymétriques organisée par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône), en 2015, les résultats obtenus avec le système de mesure monofais-

ceau du Corobathe ont été tout à fait comparables aux résultats CNR.

Ces différents constats tendent à confirmer un défaut de justesse en profondeur du système bathymétrique multifais-

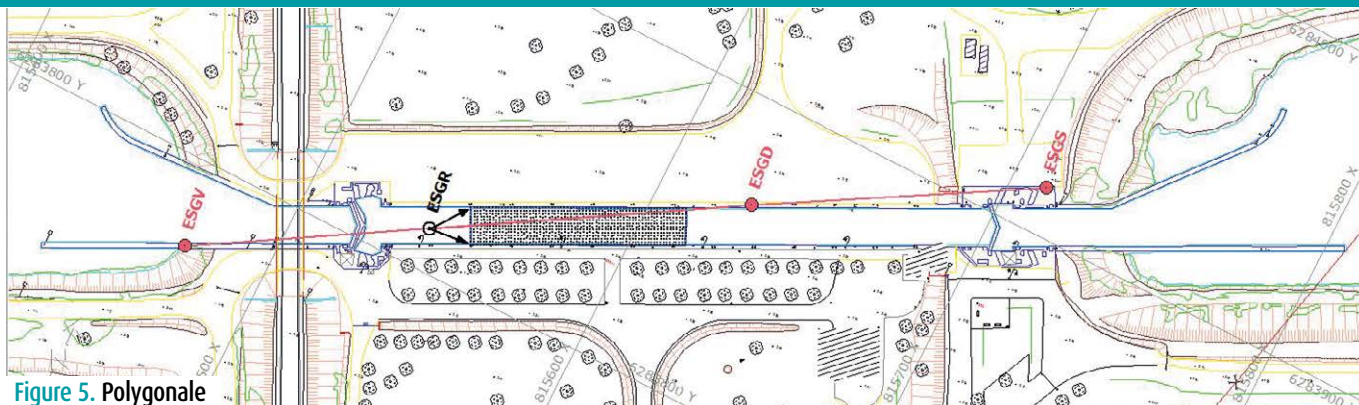


Figure 5. Polygone

travaux, mais limité au chenal théorique. Ce volume dragué est de 11 540 m<sup>3</sup>. Une diminution de 3 cm des profondeurs des 2 sondages avant et après travaux, corrigeant ce défaut de justesse, induit une augmentation du volume dragué facturable de 460 m<sup>3</sup>, soit 4 % du volume total. Sachant que le coût moyen d'un m<sup>3</sup> dragué au ponton-pelle, par entreprise, est de 25 € environ, la différence comptable est de 11 500 €.

Quoi qu'il en soit, il importe de respecter la référence altimétrique associée aux données et annoncée sur les plans bathymétriques, en s'affranchissant de tout systématisme dans les mesures. C'est un des rôles primordiaux de l'hydrographe.

Reste à trouver la, ou les, cause(s) de ce défaut de justesse !

En premier lieu, il convient de :

- Détailler les travaux topographiques de détermination de la surface de référence.
- Préciser certains paramètres de la mesure de la profondeur.

## Détermination topographique de la surface de référence

Comme indiqué auparavant, cette surface de référence correspond à un tronçon du radier de l'écluse de Saint-Gilles, longue de 200 m et large de 12 m, qui a été construite en 1973 pour assurer le passage entre le Petit Rhône et le Canal du Rhône à Sète proprement dit. Les travaux topographiques ont été conduits en mars 2013 lors d'un chômage de l'écluse, période de maintenance de l'ouvrage nécessitant la vidange du sas et induisant la mise à sec du radier. L'objectif de ces travaux était de disposer d'un semis de points régulièrement répartis sur un tronçon du radier, en l'occurrence long de 69 m,



Photo 3. Détermination du point de station ESGD par GNSS NRTK moyenné parfaitement connus en planimétrie, en projection Lambert 93, et en altimétrie, en altitudes NGF-IGN69.

Pour atteindre cet objectif, une polygone composée de quatre points de station a été mise en place (figure 5). Pour déterminer cette polygone en planimétrie :

- Les points de station ESGS, ESGD et ESGV ont été déterminés par GNSS NRTK moyenné (photo 3), et contrôlés au tachéomètre électronique (Leica TCR403). Pour information, sur les mesures faites sur le point de station ESGD, les écarts-types ont été de 5 mm en X(E) et 8 mm en Y(N).

- Le point de station ESGR, placé sur le radier de l'écluse, a été déterminé depuis le point de station ESGD, au tachéomètre électronique.

Et pour la déterminer en altimétrie :

- Un contrôle de stabilité des 4 repères de nivellement de l'IGN les plus proches de l'écluse avait été effectué par nivellement direct, en 2009 et 2011 (figure 6). Les fermetures mesurées ont été de :
  - 2 mm sur la boucle 5-8-4-5, longue de 6.2 km.
  - 2 mm sur le cheminement 3-8, long de 3.5 km.
- Ces contrôles ont mis en évidence des affaissements sur les 2 repères placés sur des ponts :



Photo 4. Nivellement du point de station ESGR

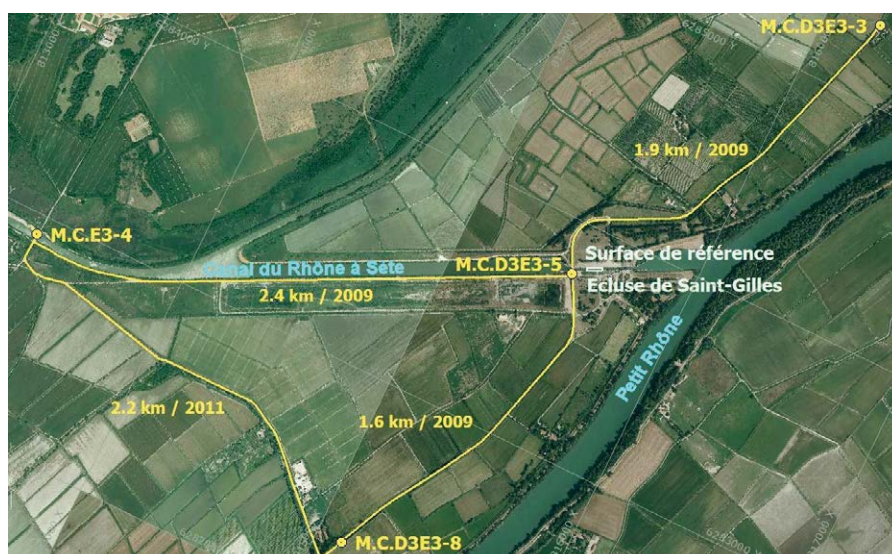
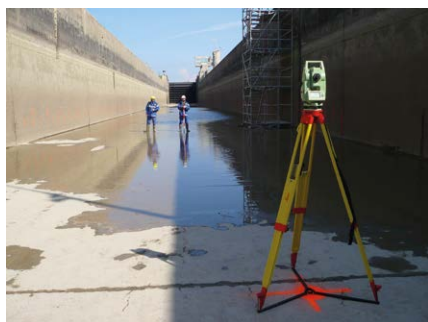


Figure 6. Contrôle de stabilité des repères de nivellement





**Photo 5.** Levé tachéométrique du semis de points



- 50 mm sur le repère M.C.D3E3-5 du pont de l'écluse de Saint-Gilles.
- 25 mm sur le repère M.C.E3-4 du pont d'Espeyran.

Les altitudes de ces deux repères ont été modifiées par l'IGN en 2012, sur la foi des mesures de la Cellule Bathymétrie.

- Le point de station ESGR, sur le radier, a été nivelé depuis le repère M.C.D3E3-5 (photo 4), en cheminement aller-retour (fermeture de 1 mm). Le nivellement a été "descendu" au fond du sas via l'échelle limnimétrique fixée, en amont du sas, contre le bajoyer rive droite, haut d'environ 7.50 m.

Les points du semis ont ensuite été levés par rayonnement depuis le point de station ESGR, au tachéomètre électronique (photo 5). Un levé au scanner laser, qui serait positionné en hauteur, au bord du sas, n'a pas été envisagé, du fait de la présence résiduelle d'eau sur le radier. C'est un maillage quasi régulier de 910 points, espacés d'environ 1 m, qui a été levé, par rangées de 13 points (70 rangées au total). Les positions des rangées ont été repérées à la peinture sur les bajoyers, en s'appuyant sur les limites des dalles de 13 m. Sur chaque rangée, les points à lever ont été placés au fur et à mesure, tous les

mètres, à l'aide d'un outil spécifique fabriqué en interne.

Il ressort de ce levé que le radier de l'écluse n'est pas plan : sur le tronçon levé, la variation d'altitude est d'une dizaine de centimètres (figure 7).

Les incertitudes de mesure sur les points du semis sont estimées à :

- $\pm 2$  à 3 cm en planimétrie,
- Meilleure que  $\pm 1$  cm en altimétrie.

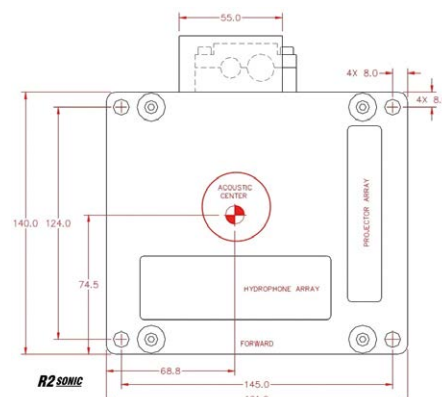
## Mesure de la profondeur : immersion du sondeur

Le sondeur multifaisceaux R2sonic 2020 du Bourgidou est fixé dans un puits, sur une plaque coulissante. Son ouverture angulaire maximale étant de  $130^\circ$ , il est incliné de  $20^\circ$  vers tribord (photo 6), afin de permettre l'insonification des berges immergées. Son immersion est la somme de la lecture sur l'échelle du puits (tirant d'eau), normalement 0.515 m à quai, et de la distance entre le zéro de cette échelle et le centre acoustique du sondeur, soit 0.125 m, mesurée par nivellement direct, le bateau étant à terre, posé sur des tréteaux.

La position du centre acoustique du sondeur est indiquée par R2sonic sur



**Photo 6.** Montage du sondeur 2020 à bord du Bourgidou. Vue prise sous la coque, vers le haut et l'arrière du bateau



**Figure 8.** Centre acoustique du sondeur 2020

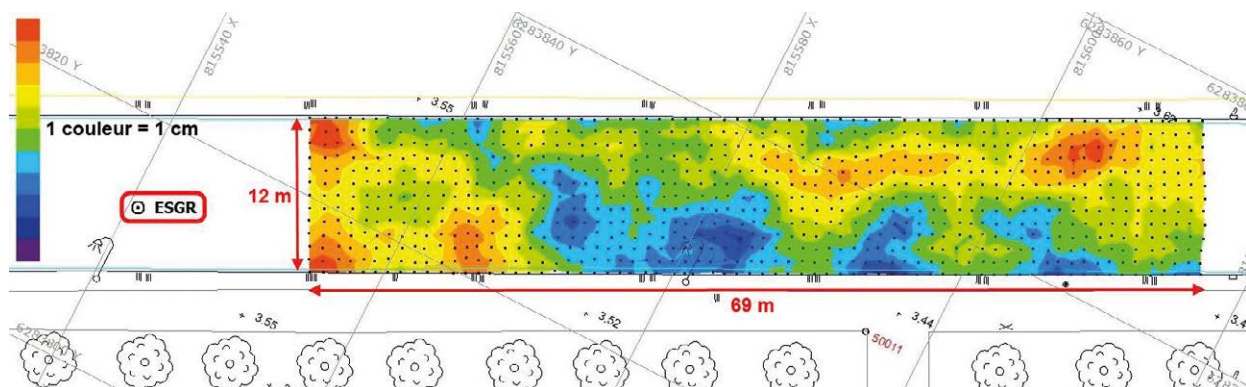
un schéma (figure 8). En profondeur, il se situe au niveau des membranes, soit 2.5 mm plus haut que la base du sondeur.

## Mesure de la profondeur : réduction des sondes

Sur le canal, les profondeurs acquises sont rapportées au niveau de référence ("réduites") de façon conventionnelle, à l'aide de mesures directes du niveau de l'eau, qui sont :

- Enregistrées en continu par un limnimètre mobile à capteur de pression (OTT Orpheus Mini), le temps du sondage.
- Recalées à l'aide de mesures ponctuelles faites sur des échelles limnimétriques ou des points surplombant la surface de l'eau, dûment déterminés en altimétrie.

La méthode de réduction des sondes par mesure RTK, qui permet de passer directement de l'altitude de l'antenne GNSS à celle du fond, en s'affranchissant de la surface de l'eau, n'est employée par la Cellule Bathymétrie qu'en présence d'une pente hydraulique conséquente, sur le Rhône. La méthode de réduction des sondes par mesure directe du



**Figure 7.** Variation altimétrique de la surface de référence

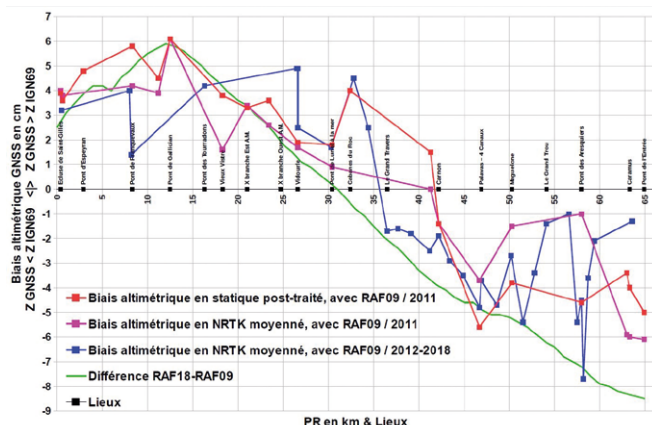


Figure 9. Biais altimétrique de la grille RAF09 & Différence RAF18-RAF09

niveau de l'eau présente l'intérêt d'éviter les défauts inhérents à la méthode par mesure RTK :

- Les dérives temporelles du Z, observées avec le système GNSS NRTK-Orphéon dans la zone de travail de la Cellule Bathymétrie. Il a été constaté, en station sur un point fixe, que l'amplitude de ces dérives pouvait atteindre 10 cm sur une période d'observation d'une heure.
- Le biais variable de la grille de conversion RAF09 : entre +6 cm et -6 cm environ, observé sur la branche principale du Canal du Rhône à Sète (figure 9). Ce biais a été mis en évidence en 2011 (réf. [2]) et confirmé par la suite, sachant qu'il apparaît que cette situation s'améliorera avec l'utilisation de la grille RAF18.

## Mesure de la profondeur : gestion dynamique du tirant d'eau

La réduction conventionnelle des sondes implique de connaître la variation du tirant d'eau du bateau, et donc de l'immersion du sondeur, en fonction de sa vitesse. En l'occurrence, le Bourgidou s'enfonce avec la vitesse. Une courbe d'enfoncement a été déterminée en 2011, à l'aide de mesures GNSS NRTK, et confirmée en 2017 (figure 10). Ainsi, à la vitesse moyenne de sondage, autour de 7 km/h, l'immersion du sondeur augmente de 4 à 5 cm.

## Les investigations

Un ingénieur de la société CADDEN, fournisseur de la majeure partie du système bathymétrique du Bourgidou,

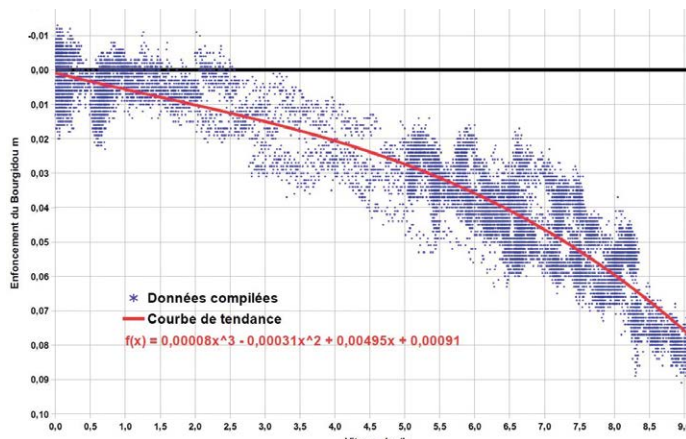


Figure 10. Enfoncement dynamique du Bourgidou

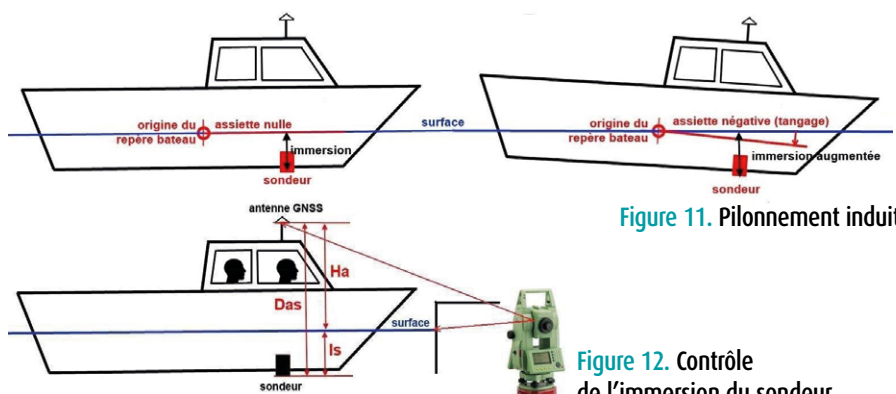


Figure 11. Pilonnement induit

a émis l'hypothèse que si le bateau "piquait du nez" en prenant de la vitesse, l'enfoncement du sondeur calculé par le logiciel, en appliquant cette assiette négative au bras de levier depuis le centre de rotation du bateau (ce qu'on appelle le "pilonnement induit"), se cumulerait avec son pur enfoncement vertical, issu de la table de gestion dynamique du tirant d'eau (Figure 11).

A priori, cette hypothèse, judicieuse, ne tient pas pour le Bourgidou : les bras de levier étant très faibles, le pilonnement induit est quasi nul, et l'enfoncement dynamique, mesuré au niveau de l'antenne GNSS, correspond effectivement à celui du sondeur.

Effectivement, ne connaissant pas le centre de rotation réel du bateau, l'origine du repère du Bourgidou a été définie de la façon suivante :

- Latéralement : dans l'axe du bateau.
- Longitudinalement : à l'antenne du système de positionnement GNSS.
- Verticalement : à la surface de l'eau.

Par rapport à cette origine (mesures effectuées au tachéomètre électronique, bateau à terre) :

- L'antenne GNSS est située 2.8 cm à tribord.

- Le centre acoustique du sondeur est situé 0.7 cm à l'arrière et 4.2 cm à tribord, soit quasiment à l'aplomb de l'antenne GNSS.

Néanmoins, des vérifications et des tests, au nombre de 4, ont été effectués :

1. Le contrôle de l'immersion du sondeur (figure 12), le bateau étant à quai avec 2 personnes à bord, à leur poste de travail, et le réservoir de carburant à moitié plein. L'immersion :  $I_s$ , est le résultat de la soustraction de la distance du point de référence de l'antenne GNSS (ARP) à la surface de l'eau :  $H_a$ , mesurée au tachéomètre électronique, à la distance de cette antenne au sondeur :  $D_{as}$ , parfaitement connue (mesurée à l'installation du système, bateau à terre).

⇒ La différence entre l'immersion mesurée et celle qui est saisie dans le logiciel Hypack-Hysweep (0.64 m) n'est que de 1 mm.

2. Le basculement, pendant le sondage, de la valeur de l'inclinaison du sondeur dans le logiciel de R2sonic, de  $-20^\circ$  à  $0^\circ$ , et vice versa.

⇒ En toute logique, l'inclinaison du



| Bathymétrie 1 |                 | Bathymétrie 2 |                 | Nombre points | Écart Z1 - Z2 cm |      |       | Écart type cm | %     |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|------|-------|---------------|-------|
| Vitesse       | Réduction Z     | Vitesse       | Réduction Z     |               | min.             | max. | moyen |               |       |
| 7 à 9 km/h    | Conventionnelle | 1 à 4 km/h    | Conventionnelle | 19572         | -7               | 8    | 1,4   | 1,2           | 65,2% |
| 7 à 9 km/h    | RTK             | 1 à 4 km/h    | RTK             | 19573         | -7               | 6    | 0,0   | 1,4           | 74,3% |
| 7 à 9 km/h    | RTK             | 7 à 9 km/h    | Conventionnelle | 22508         | 0                | 5    | 2,8   | 0,9           | 67,3% |
| 1 à 4 km/h    | RTK             | 1 à 4 km/h    | Conventionnelle | 20121         | 2                | 6    | 4,2   | 0,6           | 59,3% |

**Tableau 4.** Écarts en profondeur selon différentes vitesses et méthodes de réduction des sondes



fond change sur l'affichage du logiciel de R2sonic, mais rien ne change dans Hypack-Hysweep.

3. Le traitement d'un petit sondage (de 52 000 points) en le corrigeant ou non du pilonnement induit.

⇒ Le fond "sans correction" est plus profond que le fond "avec correction", mais d'un écart moyen qui n'est pas significatif (1 mm).

4. Ensuite, la réalisation de sondages d'une petite zone du canal à des vitesses différentes et traités selon les deux méthodes de réduction des sondes : conventionnelle et par "marée (niveau) RTK" (tableau 4).

⇒ Pour une réduction des sondes conventionnelle, la bathymétrie à vitesse rapide est plus profonde que la bathymétrie à vitesse lente, mais d'un écart qui n'est que légèrement supérieur à 1 cm, vraisemblablement dû à l'imprécision, toute relative, de la table d'enfoncement dynamique, mais surtout à la présence de courant dans le canal.  
⇒ Pour une réduction des sondes à l'aide du NRTK, l'écart moyen entre

les bathymétries à vitesse rapide et à vitesse lente est nul.

⇒ Les bathymétries réduites à l'aide du NRTK sont plus profondes que les bathymétries réduites de façon conventionnelle, d'environ 3 à 4 cm, écart qui correspond au biais de la grille RAF09 à cet endroit (PR57.6 du canal, cf. figure 9).

**Ces opérations ne permettent pas d'expliquer l'existence du défaut de justesse.**

Enfin, l'opération suivante a consisté à contrôler la profondeur à la barre.

## Barre de contrôle de la profondeur : caractéristiques et mise en œuvre

Cette barre a été conçue et fabriquée en interne, au Centre d'Exploitation de Palavas. Elle est constituée (photos 7 et 8) :

- D'une plaque en aluminium de 2.70 m de long (2.40 m utile), de 19 cm de large et 5 mm d'épaisseur, rigidifiée par 2 cornières soudées en dessous.
- De 2 rondins de maintien, hauts de 3.50 m, en 2 parties, de 4 cm de diamètre, amovibles et vissables sur la plaque. Des marques de profondeur ont été gravées sur ces rondins à 2.00 m, 2.50 m et 2.70 m.

Son poids total est de 35 kg.

Étant donné son poids et son encombre-



**Photo 9.** Mise en œuvre de la barre de contrôle de la profondeur



**Photo 10.** Dispositif de maintien de la barre de contrôle de la profondeur

ment, la mise à l'eau et la récupération de la barre nécessitent 3 personnes (photo 9).

La barre est maintenue à la profondeur désirée et sous le sondeur, à l'aide d'un dispositif mécanique placé de chaque côté du bateau (photo 10).

## Contrôle de la profondeur à la barre : méthodologie

Deux opérations de contrôle de la profondeur à la barre ont été effectuées, à l'intérieur du sas de l'écluse de Saint-Gilles (photo 11), fermé pour l'occasion, et donc sur un plan d'eau parfaitement calme, en septembre puis en décembre 2017.

A chaque opération :

- Le contrôle est effectué sur la barre immergée à 2.00 m et à 2.50 m.
- La profondeur de la barre, réglée de chaque côté du bateau, est contrôlée en son milieu, à travers le puits du sondeur, à l'aide d'une pige rigide, afin de vérifier que la barre ne présente pas une forme de chaînette.
- L'immersion du (centre acoustique du) sondeur est égale à la lecture sur l'échelle du puits à laquelle on ajoute 0.125 m (cf. photo 6). Cette immersion est légèrement supérieure à la normale du fait de la présence de 2 personnes à l'avant du bateau.
- L'ouverture du sondeur est réglée à 50° et son inclinaison paramétrée à



**Photo 7.** Barre de contrôle de la profondeur



**Photo 8.** Détails de la barre de contrôle de la profondeur



Photo 11. Contrôle de la profondeur à la barre

20°, éclairant ainsi 1.70 m de barre à 2.50 m et 1.25 m à 2.00 m (en tenant compte de l'immersion du sondeur).  
– Pour chaque profondeur de contrôle, un profil de célérité du son dans l'eau (figure 13) est mesuré et intégré dans le logiciel d'acquisition Hypack-Hysweep, juste avant les enregistrements de données "barcheck". Dans ces conditions, on peut estimer

que la profondeur de la barre, d'une part, et l'immersion du sondeur, d'autre part, sont connues à  $\pm 0.5$  cm.

## Contrôle de profondeur à la barre du 5 septembre 2017

La moyenne des enregistrements "barcheck" effectués à l'aide du logiciel Hypack-Hysweep est de :

- 2.032 m sur la barre immergée à 2.00 m, soit un écart de 3.2 cm, avec un écart-type de 2.9 cm sur 2 333 mesures (figure 14).
- 2.537 m sur la barre immergée à 2.50 m, soit un écart de 3.7 cm, avec un écart-type de 2.5 cm sur 2 443 mesures (figure 15).

Ces valeurs d'écart-type, qui peuvent paraître élevées aux yeux d'un topographe, correspondent au bruit des mesures effectuées par le sondeur multifaisceaux, issues de signaux acoustiques qui traversent l'eau. En sachant que le traitement d'un sondage bathymétrique a pour finalité première

l'élaboration d'un maillage de points, en général moyens (c'est le cas en dragage), dont le nombre est considérablement réduit par rapport à celui des données brutes, qui se présentent sous la forme d'un "matelas" de sondes.

## Conséquence des investigations

**Le contrôle à la barre du 5 septembre 2017 confirme le défaut de justesse en profondeur du système, de 3 cm environ. En conséquence, décision est prise de réduire, dans le logiciel d'acquisition, la valeur d'immersion du sondeur de 3 cm.** Suite à cette réduction, les 2 nouveaux levés bathymétriques de la surface de référence coïncident avec son levé topographique (tableau 5). Faisant suite à une mise à jour des logiciels internes du boîtier et de la tête du sondeur, une seconde opération de contrôle à la barre a été effectuée le 14 décembre 2017.

## Contrôle de profondeur à la barre du 14 décembre 2017

La moyenne des enregistrements "barcheck" effectués à l'aide du logiciel Hypack-Hysweep est de :

- 2.000 m sur la barre immergée à 2.00 m, soit un écart nul, avec un écart-type de 2.4 cm sur 2 307 mesures (figure 16).
- 2.496 m sur la barre immergée à 2.50 m, soit un écart de -0.4 cm, avec un écart-type de 3.6 cm sur 2 157 mesures (figure 17).

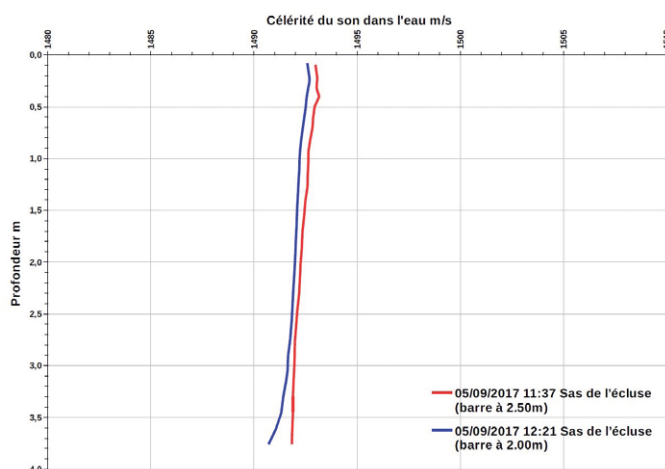


Figure 13. Profils de célérité du son dans l'eau du 5 septembre 2017

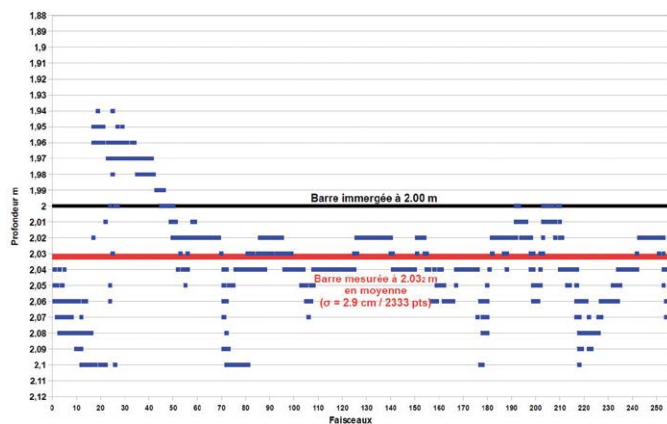


Figure 14. 5 septembre 2017 – Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.00 m

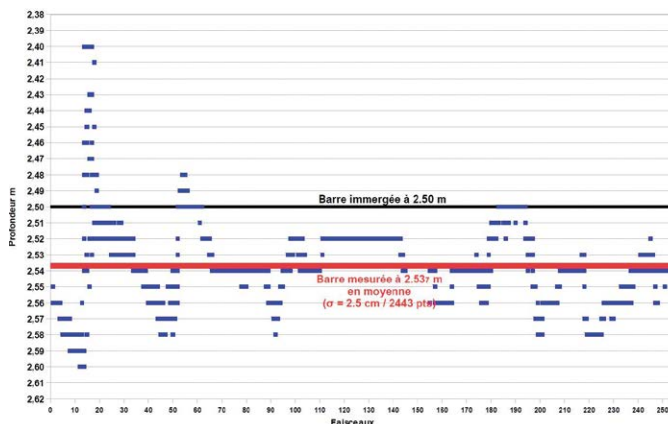


Figure 15. 5 septembre 2017 – Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.50 m



| Bathymétrie multifaisceaux du radier (en 4 passes) |       |                              |                     |   |        | Justesse                 |      |       | Fidélité      |     | Exactitude |
|--|-------|------------------------------|---------------------|---|--------|--------------------------|------|-------|---------------|-----|------------|
| Date   | Sas   | Niveau d'eau m / 0 NGF-IGN69 | Immersion sondeur m | Points  |        | Ecart Z SMF - Z topo. cm |      |       | Ecart type cm | %   | EMQ cm     |
|  | Etat  |                              |                     | Type  | Nombre | min.                     | max. | moyen |               |     |            |
| 12/12/2017   | plein | 1,60                         | 0,61                | points moyens (500 points ~ / m²) / matrice 1 m | 1040   | -3                       | 4    | -0,7  | 1,1           | 58% | 1,3        |
| 14/12/2017   | vide  | 0,24                         | 0,61                |   | 1040   | -1                       | 6    | 1,3   | 1,0           | 70% | 1,7        |
|  |       |                              |                     |   |        | Écart moyen              |      |       | 0,3           |     |            |

**Tableau 5.** Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence après réduction de la valeur de l'immersion du sondeur



En attendant de pouvoir expliquer les causes du défaut de justesse initial, les résultats de ce deuxième contrôle valident la réduction de la valeur d'immersion du sondeur.

## Conclusion et perspectives

Le système bathymétrique multifaisceaux du Bourgidou présente un défaut de justesse en profondeur, de 3 cm environ. Ce défaut a été confirmé par plusieurs levés d'une surface de référence et 2 contrôles de la profondeur à la barre.

En étant pragmatique, cet écart systématique a été corrigé, mais, à ce jour, les causes de ce défaut de justesse sont inconnues.

Le problème peut-il venir du sondeur ? Le sondeur a été révisé chez le constructeur R2sonic en septembre 2018, sans retour significatif de leur part à ce sujet, sachant qu'ils mènent actuellement des investigations sur le positionnement du centre acoustique.

Un ingénieur de la société CADDEN, a suggéré de réaliser un contrôle à la barre après avoir fait pivoter le sondeur de 180° sur son support, ce qui permettrait de s'assurer que le centre acoustique n'est pas décalé par rapport à sa position théorique. Si, par exemple, il était situé au niveau de l'émetteur, il

serait 2.4 cm plus haut, pour 20° d'inclinaison du sondeur.

Le problème peut-il venir du logiciel ? L'inclinaison du sondeur (offset de roulis) est-elle correctement prise en compte dans les calculs géométriques effectués par le logiciel Hypack-Hysweep ?

Réaliser un levé de la surface de référence, ou un contrôle à la barre, en utilisant un autre logiciel d'acquisition, tel Qinsy, permettrait de lever le doute. Bien que plus difficiles à mettre en œuvre en pratique, la Cellule Bathymétrie de Palavas envisage de procéder à ces nouvelles investigations dans le futur. L'enquête se poursuit. ●

## Contact

Bernard CATALA-COTTINI

Hydrographe - Voies Navigables de France - Direction Territoriale Rhône Saône  
bernard.catala@vnf.fr

## Références

- [1] *Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3<sup>e</sup> édition - Version 2008 avec corrections mineures - Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) / 2012.*
- [2] *Evaluation du nivellement par GNSS NRTK-ORPHEON avec RAF09 et impact sur*

la bathymétrie du Canal du Rhône à Sète - Mémoire de travail de fin d'études - Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - Arnaud KRIPPES / 2011.

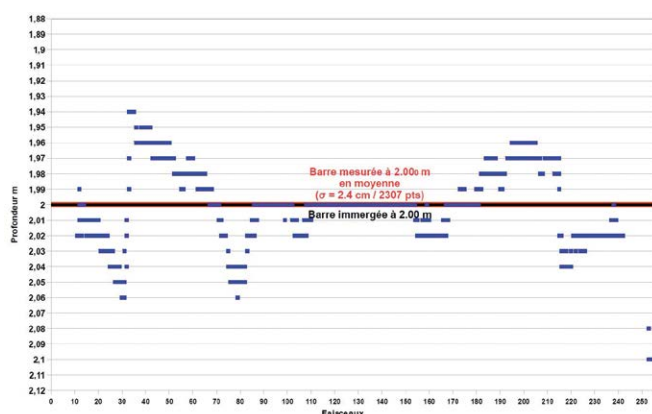
## Liens utiles

Lexique Voies Navigables de France (VNF) : <http://www.vnf.fr/vnf/lexique>.

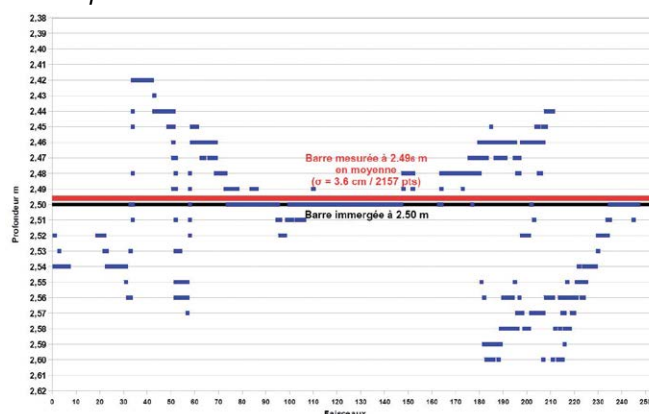
Association Francophone d'Hydrographie (AFHY) : <http://www.afhy.fr/>

## ABSTRACT

*One of the main responsibilities of a surveyor is to ensure the measured data is accurate, especially depth data. How precise the measurements are, mainly depends on the intrinsic qualities of the various equipments that form a bathymetric system. As for their trueness, it is strongly related to how much is known about the geometry of the system and what methodology is used during a survey. Measurement uncertainties - both in position and depth - can be estimated by theoretical calculations, although only purely practical means of control can help qualifying a bathymetric measurement system. This article outlines various such operations that were conducted to investigate measurement uncertainties by a bathymetry team within Voies Navigables de France (VNF).*



**Figure 16.** 14 décembre 2017 - Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.00 m



**Figure 17.** 14 décembre 2017 - Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.50 m