

## Les références verticales maritimes en France : méthodologie de création des surfaces BATHYELLI<sup>1</sup>

■ Yves-Marie TANGUY - Gwénaële JAN - Yves PASTOL

En cartographie marine, les profondeurs (acquises par navire équipé de sondeur et aujourd'hui par avion équipé de laser bathymétrique) sont exprimées par rapport à un zéro hydrographique, qui garantit la sécurité de la navigation. La composante verticale de plus en plus fiable obtenue par GNSS a introduit une autre référence usuelle en hydrographie : l'ellipsoïde IAG-GRS80.

Dans ce contexte<sup>2</sup>, le service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) a lancé en 2005 le projet BATHYELLI<sup>3</sup> qui référence (en métropole hors estuaire) le zéro hydrographique (ZH) au GRS80 du système géodésique RGF93. Outre la réalisation de levés bathymétriques référencés à l'ellipsoïde, un tel modèle offre de nombreuses applications (continuité terre-mer sur le littoral, référencement des études hydrodynamiques, etc.). L'article présente la problématique posée par le calcul de la surface ZH/GRS80 et la méthodologie retenue pour la générer : l'altimétrie apporte une observation irremplaçable dans les zones hauturières, mais elle ne permet pas encore aujourd'hui d'observer la topographie dynamique de l'océan de surface sur le littoral en raison des trop fortes incertitudes sur les mesures radar altimètres près de la côte (Ménard Y. et al. 1994 [6], Bonfond P. et al. 2003 [1], Jan G. et al. 2004 [3]). Cette étude vise à compléter la réalisation des surfaces moyennes en zone côtière à partir de mesures GPS et de marégraphes. Enfin, deux comparaisons des surfaces BATHYELLI sont présentées avec respectivement le produit de références altimétriques maritimes RAM 2014 (SHOM) et les données de LIDAR topo-bathymétrique.

### Les références verticales maritimes

#### ■ Rappel

L'IGN69 est, à terre, la référence des altitudes en métropole (hors Corse où la référence est l'IGN78). Elle est définie historiquement à partir du niveau de mer moyen observé au marégraphe de Marseille entre 1885 et 1897. Avec le développement des techniques spatiales et des constellations GNSS, une référence globale verticale a été communément introduite : l'ellipsoïde IAG-GRS80. Il s'agit d'une surface mathématique représentant en

#### ■ MOTS-CLÉS

références verticales maritimes, zéro hydrographique, levé bathymétrique référencé à l'ellipsoïde, fusion de données altimétriques, GPS et marégraphiques.

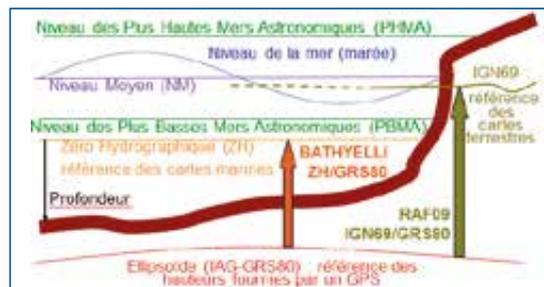


Figure 1. Schéma des niveaux de référence.

des Plus Basses Mers Astronomiques (PBMA). Cet écart variable (< 0.5m), constitue une marge de sécurité supplémentaire pour la navigation.

Le projet BATHYELLI apporte à l'utilisateur la valeur du zéro hydrographique référencé à l'ellipsoïde, ce qui constitue l'équivalent maritime du RAF09.

Le Niveau Moyen référencé à l'ellipsoïde (NM/GRS80) est la clé de voûte de cette réalisation à partir duquel le ZH/GRS80 est déduit en passant par l'estimation du niveau des plus basses mers astronomiques (PMBA/GRS80) (Figure 2).

- La surface PBMA/GRS80 est déterminée par la soustraction de l'amplitude maximale de la marée connue par un modèle (CSTFrance du SHOM) ;
- La surface ZH/GRS80 est calculée par la règle de concordance (Equation 1). Cette méthode est sensible à la définition géographique de la zone de marée

première approximation la forme de la Terre. Cette référence a pour intérêt d'être stable (définition mathématique), accessible (en tout point du globe) et précise<sup>4</sup>. De plus, les hauteurs ellipsoïdales acquises à terre par un récepteur GNSS peuvent être converties en altitude par l'intermédiaire de la grille RAF09 définie par l'IGN (IGN69/GRS80). En mer, le SHOM, qui publie les cartes marines, a pour mission de définir le zéro hydrographique. La Figure 1 illustre les niveaux marins couramment employés.

Le zéro hydrographique, en chaque port, n'est pas exactement le niveau

1 BATHYELLI : Bathymétrie référencée à l'ellipsoïde.

2 L'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) établit dans la publication S-44 ses recommandations pour le référencement des sondages. Le référencement à l'ellipsoïde a également fait l'objet de la publication n°37 (sept. 2006) de la Fédération Internationale des Géomètres.

3 La version v1.1 de la surface du zéro hydrographique (ZH/GRS80) est disponible sur l'espace de diffusion du SHOM en licence ouverte Etalab.

4 Le GRS80 est l'ellipsoïde associé au système géodésique RGF93, matérialisation de l'ITRS en métropole.

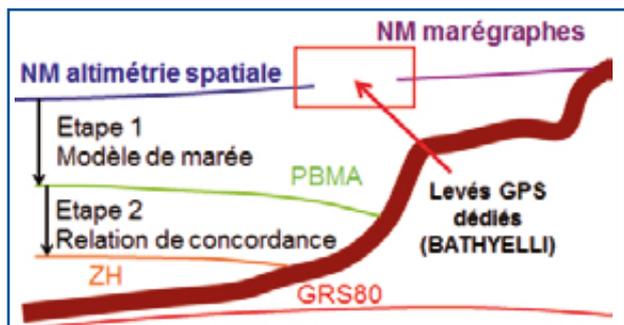


Figure 2. Méthode de réduction du niveau moyen au zéro hydrographique

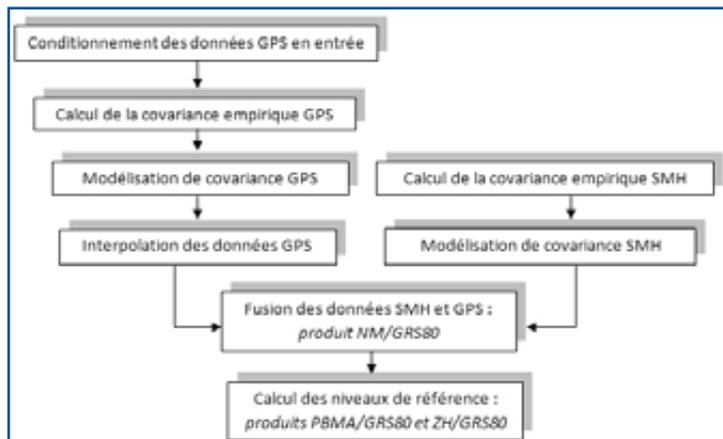


Figure 3. Présentation schématique des calculs pour l'intégration d'un levé GPS dans les surfaces de référence BATHYELLI (SMH/GRS80, PBMA/GRS80, ZH/GRS80).



(13 en métropole). Elle est, de plus, dépendante d'un nivellement précis opéré sur le marégraphe point d'appui à la côte (Coulomb A. 2013 [2]).

$$AM / AP = ZM / ZP \quad (\text{Équation 1})$$

avec A : l'amplitude maximale de la marée ;

Z : l'écart entre les plus basses mers astronomiques et le zéro hydrographique PBMA/ZH (la marge de sécurité) ;

M : un point d'une zone de marée ;

P : le port principal d'une zone de marée.

### ■ De l'intérêt d'une progression vers une représentation surfacique

Pour les marégraphes du réseau RONIM (Poffa et al. 2011 [10]) qui font l'objet de rattachements à l'ellipsoïde, le niveau moyen peut être déterminé ponctuellement dans la zone géographique à proximité du port équipé (produit du SHOM Références Altimétriques Maritimes (RAM)). La problématique du projet BATHYELLI est de progresser vers une représentation surfacique de ces niveaux de mer. Lefèvre et al. (2007 [5]), décrit une première étape avec la constitution sur la façade Atlantique d'une Surface Moyenne Hydrographique (SMH, à savoir un niveau moyen référencé à l'ellipsoïde). Dans la continuité de ces travaux, 2 SMH ont été générées pour la façade Atlantique Manche et pour la mer Méditerranée (Jan G. et al. 2009 [4]) à partir des données altimétriques (1993-2008) traitées pour 4 satellites (Jason-1, Topex-Poseidon, EnvisAt, GFO). Les données altimétriques sont encore entachées d'incertitude supérieures à 0.1 m voire 0.5 m à la côte. Celle-ci dépend de

l'angle d'incidence de la trace satellite par rapport à la côte. Elles ne respectent donc pas à la côte le seuil d'incertitude recommandée (0.05 m pour la mesure) et ne sont pas exploitables en côtier. Les données GPS et marégraphes viennent combler cette lacune à la côte et assurent la transition entre l'océan hauturier (surface moyenne hydrographique par altimétrie) et le domaine côtier (surface moyenne hydrographique par GPS et niveau moyen par marégraphie). Ainsi, 20 levés BATHYELLI ont été réalisés entre 2006 et 2008 (SHOM, L. Pineau-Guillou, 2009 [8]) et 5 entre 2012 et 2013.

Pour progresser d'un calcul ponctuel vers une surface, 2 grilles de calcul ont été générées pour l'étude, l'une en Atlantique Manche, l'autre en mer Méditerranée. L'originalité de ces grilles tient principalement à la discrétisation spatiale en éléments finis qui permet de densifier le maillage sur les zones à forts gradients de bathymétrie (ainsi que les zones de hauts fonds) et dans les zones à grande amplitude de marée.

### Les Processus de création des surfaces BATHYELLI

Une chaîne de calcul dédiée à l'intégration des données (altimétrie, levés GPS, données marégraphiques) a été développée permettant la génération des surfaces de références verticales BATHYELLI. Une fois les données GPS acquises et validées, la méthode d'intégration dans la solution existante BATHYELLI peut être schématisée par la Figure 3, passant de la création de

surfaces GPS à la fusion avec la SMH altimétrique pour aboutir aux calculs successifs des surfaces de références (PBMA/GRS80 puis ZH/GRS80).

### ■ Conditionnement des hauteurs ellipsoïdales

Un levé GPS BATHYELLI est constitué de plusieurs profils de mesures en mer se croisant régulièrement (traits noirs sur la Figure 4). Pour analyser la cohérence de ses hauteurs ellipsoïdales et pour s'affranchir d'un biais potentiel entre les mesures, les écarts des hauteurs ont été comparés et ajustés aux points de croisement entre profils GPS. Cette étape du prétraitement est bénéfique pour le fonctionnement de l'inversion par moindres carrés des mesures GPS. En effet, cette méthode, basée sur un processus de minimisation ne peut s'affranchir de biais entre les mesures. Les statistiques sur les écarts aux points de croisement avant et après ajustement des mesures GPS ont montré que les valeurs obtenues après ajustement sont bien inférieures à celles avant ajustement, justifiant le traitement des observations utiles à la création d'une surface moyenne (SMH). Le traitement appliqué ajuste un biais par profil et impose, par souci d'inversion, que la somme des biais soit nulle.

Pour chaque point de croisement, cet écart doit être faible car calculé en un même point, à partir de 2 mesures à différents instants mais corrigées de la marée, donc en théorie représentatif d'un niveau de mer moyen proche du statique. Les profils GPS dont les écarts

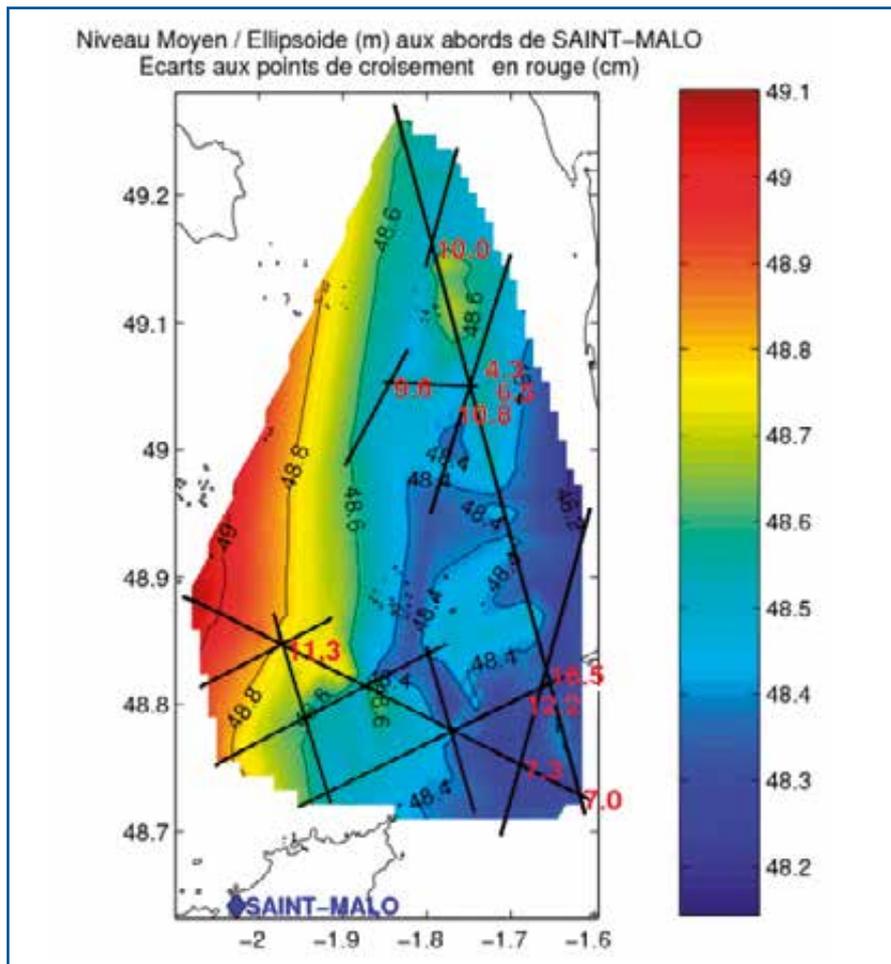


Figure 4. Écarts aux points de croisement sur la zone de Granville, Saint-Malo (unité : cm). Fond de carte : niveau moyen sur GRS80 (unité : m. Source SHOM).

sont inférieurs à 0.15 m sont conservés. Pour les autres profils, une analyse des erreurs est réalisée.

Une première source d'erreur est liée au traitement géodésique appliqué à la mesure : L. Pineau-Guillou 2009 [9] a montré à quel point une connaissance fine de la hauteur d'antenne GPS du navire<sup>5</sup> est critique (distance Antenna Reference Point / eau). L'expérience du SHOM a conclu à l'emploi privilégié de l'hybridation entre les données GNSS et inertielles du navire pour obtenir des hauteurs ellipsoïdales fiables.

Une seconde source d'erreur peut provenir de la méthode de calcul du ZH/GRS80 qui passe par les étapes de soustraction du signal dynamique à la hauteur instantanée mesurée par GPS (amplitude de marée et effets atmosphériques sur la surface de l'océan) pour calculer un niveau moyen puis des plus basses mers astronomiques (Figure 2). L'erreur peut venir de la correction temporelle et spatiale

basée sur des modèles de prédiction de marée. En effet, une fois soustraits de l'amplitude de marée, les écarts aux points de croisement entre les profils du levé GPS peuvent atteindre, au maximum 0.15 m. En regard de la géodésie terrestre millimétrique, il est important d'avoir à l'esprit cet ordre de

grandeur pour les mesures maritimes. La Figure 4 illustre les écarts de hauteur existants dans la baie du Mont Saint-Michel, entre Saint-Malo et Granville, où l'amplitude des marées est particulièrement importante (~ 10 m).

Une fois les mesures de hauteurs validées, l'objectif est d'obtenir des résidus proches d'un signal de type gaussien centré, qui soient les plus conformes possible aux signaux inversibles par la méthode des moindres carrés. Pour chacune des zones GPS traitées, les résidus obtenus sont d'une part de moyenne nulle et d'autre part d'écart-type minimal. Pour ce faire, un modèle de géoïde<sup>6</sup> est soustrait aux mesures GPS, puis l'équation d'un plan est calculée par lever GPS et est retranchée au signal de hauteur de mer résiduel.

### ■ Covariances empirique et analytique

En préambule à l'estimation de la SMH côtière par interpolation des profils GPS, il est nécessaire d'approcher les covariances des résidus de hauteurs de mer GPS par des modèles analytiques à support compact tels que ceux introduits dans Moreaux (2008 [6]). Deux outils ont été développés pour estimer les covariances isotropes des résidus GPS et pour l'approximation de ces covariances dites empiriques par un modèle analytique (Figure 5).

La covariance analytique a été calculée

<sup>5</sup> Par les logiciels de post-traitement POS-Pac d'Applanix et DelphINS d'Ixsea.

<sup>6</sup> Modèle de géoïde appliqué : EGG97 pour l'étude (2009). EIGEN8 est en cours de test.

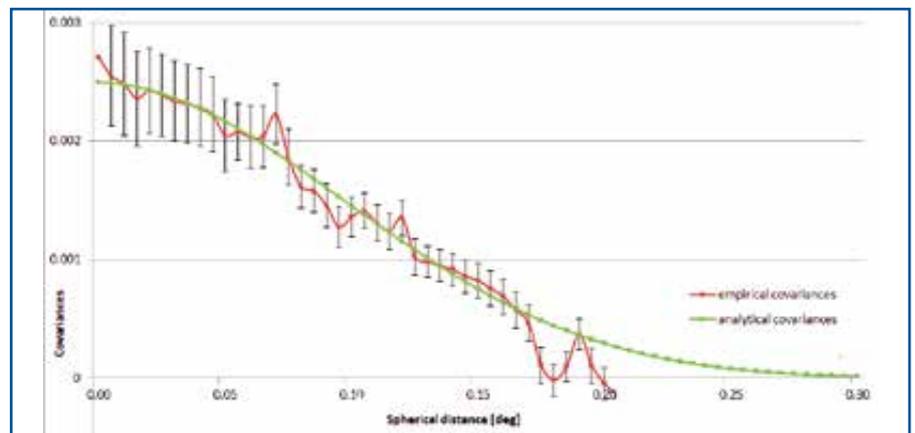


Figure 5. Covariances empirique et modélisée du levé GPS Saint-Tropez à partir des résidus d'observations GPS (en rouge) et le résultat du modèle analytique à support compact (Wendland, en vert). En abscisse la distance maximale d'ajustement : 0.17°.

à partir des modèles de covariances isotropiques à support compact. Un modèle de covariance à support compact est tel que ses covariances sont nulles au-delà d'une certaine distance sphérique. Par un processus de minimisation au sens des moindres carrés des écarts entre les covariances empiriques, le modèle analytique renvoie les paramètres du modèle offrant la meilleure approximation des covariances empiriques pour un intervalle de distance donné. Quatre familles de modèles de covariances isotropiques à base sphérique (d'argument la distance sphérique entre deux points) et à support compact (de valeur nulle au-delà d'une certaine distance sphérique) ont été testées : Wendland, Wu, Buhmann, Gaspari & Cohn (Jan G, Moreaux G., Crespon F., Helbert J. et al, 2009 [4]). Dans le cadre de l'étude le modèle de Wendland a été appliqué<sup>7</sup>. On peut ainsi déterminer la distance maximale d'ajustement du modèle de covariance (Figure 5). Les modèles de covariances à support compact ont ensuite été utilisés pour interpoler des mesures GPS résiduelles aux points des grilles de projection des futurs niveaux de référence.

### ■ Fusion de données altimétriques, GPS et marégraphiques

Cette étape est le résultat de toutes les étapes préparatoires réalisées sur les mesures GPS, marégraphiques et altimétriques. Le résultat de cette étape est une donnée d'entrée pour le calcul des surfaces de référence. La méthode de fusion a pour objectif de produire une SMH en réalisant le raccord entre la SMH altimétrique et les différentes SMH GPS.

- Espace "GPS valide" : données issues des levés GPS,
- Espace "ALTI valide" : mesures de SMH altimétrique,
- Espace "Marégraphe valide" : la mesure marégraphe est alors la référence.
- Espace de raccord : les données y sont estimées par interpolation.

Dans l'espace de raccord, la fusion des données issues des SMH GPS et SMH

<sup>7</sup> Modèle de covariance empirique de Wendland (paramètre l=5 et k=3)

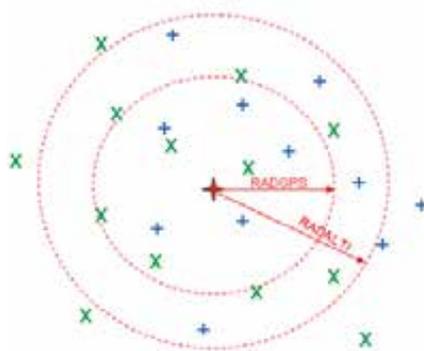


Figure 6. Zones de sélection des données issues des SMH GPS (+ croix bleues) et SMH ALTI (X croix vertes)

ALTI est réalisée pour chaque point de prédiction. L'ensemble des points de SMH GPS et l'ensemble des points de SMH ALTI inclus dans les zones de sélection sont contenus dans les cercles de rayon RADGPS et RADALTI (Figure 6). Ces ensembles de points correspondent aux positions où sont respectivement collectées les mesures obsgps, et obsalti.

Pour chaque point de prédiction  $j$  la valeur estimée  $pre_j$  est définie par la convolution de la matrice des covariances entre prédictions et observations (W), calculées précédemment, l'inverse de la matrice de covariances entre les observations GPS et altimétriques ( $C^{-1}$ ) et la matrice des observations GPS et altimétriques (O) (Equation 2).

$$pre_j = W \times C^{-1} \times O \quad (\text{Equation 2 : Prédiction de la hauteur fusionnée})$$

Le modèle analytique de covariance en fonction de la distance  $d$  est une fonction multiquadrique qui tient compte des rayons RADGPS et RADALTI (Figure 6). Par ailleurs, la méthode de fusion GPS altimétrie fournit l'erreur a posteriori  $err_j$  (Equation 3)

$$err_j^2 = W \times C^{-1} \times W^T \quad (\text{Equation 3 : Calcul de l'erreur a posteriori})$$

Une fois la surface de niveau moyen à l'ellipsoïde établie, les autres références verticales maritimes peuvent être calculées par zone de marée en prenant appui sur la valeur du niveau moyen pour chaque port de référence.

### Validation des surfaces de référence

#### ■ Comparaison avec le produit RAM 2014

La justesse de la surface BATHYELLI a été estimée par comparaison au produit SHOM de Références Altimétriques Maritimes (RAM) pour les marégraphes communs aux 2 solutions. Le RAM définit les hauteurs ellipsoïdales du niveau moyen pour les ports principaux des zones de marée et certains ports

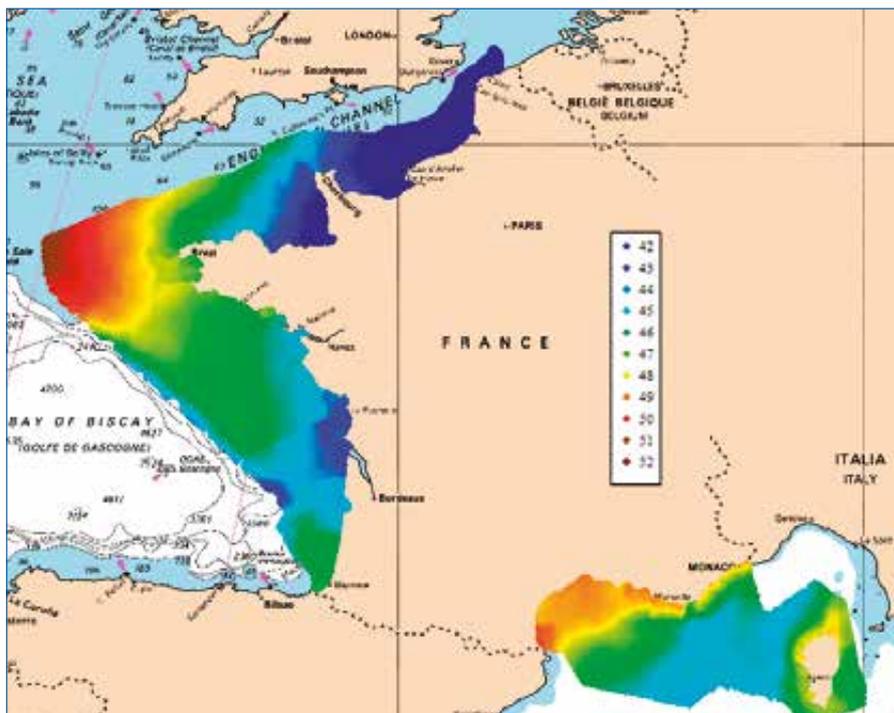


Figure 7. Produit ZH/GRS80 (unité : m ; source : <http://data.shom.fr>)



secondaires. Les résultats montrent une différence de niveau moyen ( $\Delta\text{NM}/\text{GRS80}$ ) entre le RAM version 2014 et BATHYELLI v1.1 de 0.07 m en moyenne (erreur quadratique moyenne de 0.16 m) en Atlantique. Pour la mer Méditerranée sur la façade Corse, la différence est de 0.02 m (rms 0.11 m) (*Tableau 1*).

Une approche similaire consiste à comparer les hauteurs ellipsoïdales de zéro hydrographique du RAM avec celles de BATHYELLI. Une réserve importante doit être ici formulée : comme exposé précédemment, chaque valeur de zéro hydrographique d'un point de grille BATHYELLI est, par construction, concordante avec le port principal de la zone de marée. A contrario pour des raisons historiques (définition strictement locale, fusion de zones de marée anciennes), les ZH des ports secondaires présentés dans le RAM ne sont pas tous concordants et des écarts potentiellement d'une quinzaine de centimètres peuvent être observés. Bien que cette problématique fasse l'objet au SHOM d'une étude d'harmonisation (non triviale car impactant potentiellement la représentation de la bathymétrie), cette comparaison imparfaite est tout de même menée pour estimer l'écart à attendre entre l'emploi de la cote officielle locale et le modèle surfacique.

Les résultats montrent une différence de  $\Delta\text{ZH}/\text{GRS80}$  entre le RAM version 2014 et BATHYELLI v1.1 de 0.07 m en moyenne (erreur quadratique moyenne de 0.26 m) en Atlantique. Pour la mer Méditerranée façade Corse, la différence est de 0.08 m (rms 0.15 m). Ces erreurs quadratiques moyennes sont conformes aux attentes du projet (*Tableau 2*).

Pour la zone Méditerranée continentale, l'erreur quadratique moyenne (rms) entre le résultat BATHYELLI et le RAM 2014 est trop importante (*Tableau 1*). Deux raisons peuvent expliquer cette statistique :

- d'une part, l'absence de données GPS in situ sur la partie Ouest du golfe du Lion. En supprimant les comparaisons sur Gruissan, Port-Camargue et Fos-sur-Mer, la RMS( $\Delta\text{NM}/\text{GRS80}$ ) diminue à 20.5 cm.
- d'autre part, le fort gradient bathymé-

Façade maritime	Nombre de ports	$\mu(\Delta\text{NM}/\text{GRS80})$	RMS( $\Delta\text{NM}/\text{GRS80}$ )
Atlantique	40	0.7 cm	16.8 cm
Méditerranée continentale	13	12.2 cm	36.3 cm
Méditerranée Corse	7	1.9 cm	11.6 cm

**Tableau 1.** Statistiques sur la différence de hauteurs ellipsoïdales du niveau moyen entre les produits RAM 2014 et BATHYELLI v1.1

Façade maritime	Nombre de ports	$\mu(\Delta\text{ZH}/\text{GRS80})$	RMS( $\Delta\text{ZH}/\text{GRS80}$ )
Atlantique	40	7.6 cm	26.8 cm
Méditerranée continentale	13	6.5 cm	28.2 cm
Méditerranée Corse	7	8.1 cm	15.1 cm

**Tableau 2.** Statistiques sur la différence de hauteurs ellipsoïdales du zéro hydrographique entre les produits RAM 2014 et BATHYELLI v1.1

trique sur la Côte d'Azur induit une importante variation du géoïde côtier et de la surface de niveau moyen. Cette façade maritime où l'amplitude des marées est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres concentre les travaux d'amélioration planifiés par le SHOM, afin d'y diminuer l'incertitude associée.

### ■ Comparaison avec les surfaces d'un laser topo-bathymétrie

Par leur nature aéroportée, les mesures par laser du programme conjoint SHOM-IGN Litto3d<sup>®</sup> constituent depuis 2005 des levés bathymétriques référencés à l'ellipsoïde. A ce titre, ils bénéficient directement de l'apport des surfaces BATHYELLI sur tout le pourtour littoral métropolitain. A contrario, la question posée dans cette partie est de savoir si ces mesures par laser aéroporté peuvent améliorer les surfaces de référence verticale.

Certains lasers bathymétriques sont la combinaison de deux chaînes optiques distinctes : une de longueur d'onde verte (532 nm) qui pénètre particulièrement bien dans l'eau, une dans le proche infra-rouge (1 064 nm) pour détecter précisément la surface. Le SHOM a déjà exploité cette seconde propriété pour estimer un niveau des plus basses mers astronomiques, référencé à l'ellipsoïde sur un atoll des Îles Eparses (Océan Indien) avec le lidar HawkEye Ila d'AHAB (Suède).

De nouveaux lasers topo-bathymé-

triques de moindre énergie mais de densité de points d'acquisition supérieure sont récemment apparus. La région PACA a fait l'objet d'un levé Litto3d<sup>®</sup> entre février 2012 et juillet 2013 où, pour les petits fonds, le laser topo-bathymétrique RIEGL VO-820-G (Autriche) était employé en complément d'un laser bathymétrique FUGRO LADS Mk3 (Australie). Bien que travaillant uniquement sur une longueur d'onde verte, le RIEGL a eu pour spécificité de renvoyer de très nombreux retours de surface. Afin d'évaluer la justesse de la hauteur ellipsoïdale de ces retours (et estimer l'éventuel biais dû à la pénétration de la longueur d'onde verte), la méthodologie suivante a été appliquée :

- séparation manuelle du nuage de points représentant la surface d'eau de mer<sup>8</sup>,
- correction temporelle et spatiale de la marée par le logiciel MASG2 (SHOM),
- calcul de la différence moyenne ( $\Delta\text{NM}/\text{GRS80}$ ) entre la hauteur ellipsoïdale du niveau moyen obtenue par lidar et celles des produits RAM et BATHYELLI.

Deux sites d'étude ont été choisis :

- Marseille, pour son importance historique pour les références verticales ;
- Saint-Tropez, dont le NM/GRS80 a fait l'objet d'un ajustement dans la version 1.1 des surfaces BATHYELLI.

Le *Tableau 3* et la *Figure 8* synthétisent les résultats obtenus. Le nombre

<sup>8</sup> RIEGL propose désormais dans son logiciel de traitement RiProcess un algorithme automatique pour cette étape.



Site	Nombre de retours	$\Delta$ NM/GRS80 entre lidar et RAM 2014	$\Delta$ NM/GRS80 entre lidar et BATHYELLI v1.1
Marseille	11 852	-11.8 cm	0.1 cm
Saint-Tropez	2 655 732	4.0 cm	9.7 cm

Tableau 3. Différence sur le niveau moyen (NM/GRS80) entre produits de Références Altimétriques Maritimes (RAM), BATHYELLI et LIDAR.

d'échantillons sur Marseille est faible, mais le résultat est conforme à ce qui était attendu avec la pénétration dans l'eau de mer, avant rétro-diffusion, du laser vert (532 nm) : le NM/GRS80 lidar est sous celui de la référence officielle RAM 2014. Le résultat pour Saint-Tropez donne un niveau moyen obtenu par lidar très proche (4 cm au-dessus) de la cote officielle. Cette méthode d'exploitation des retours de surface par lidar présente un réel intérêt : le levé Litto3d® prévu sur le Languedoc-Roussillon en septembre 2014 pourra certainement contribuer à améliorer les surfaces BATHYELLI sur des zones dépourvues de levés GPS dédiés (comme la zone de Gruissan à Port-Camargue).

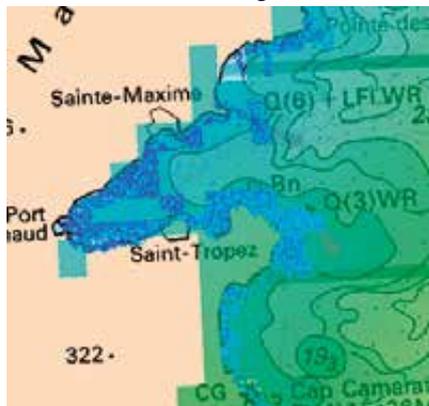


Figure 8. Saint-Tropez : Surface NM/GRS80 BATHYELLI v1.1 (en vert), retour de surface RIEGL (en bleu).

## Conclusion

Les surfaces BATHYELLI offrent une possibilité innovante pour les hydrographes : le levé bathymétrique référencé à l'ellipsoïde. Avec l'éventail de techniques GNSS aujourd'hui disponibles sur les navires (acquisition RTK ou post-traitement PPK, PPP, couplage inertiel), la hauteur ellipsoïdale du fond est accessible et transformable en sonde référencée au zéro hydrographique par la grille ZH/GRS80. L'intérêt de la méthode est que toute observation de marée/surcote, souvent associée à l'immersion

d'un marégraphe, devient inutile. L'article montre plusieurs pistes de progrès sur le calcul des surfaces de références verticales BATHYELLI. Les modèles de marée sont un des paramètres clés que le SHOM développe et consolide régulièrement (avec l'intégration de nouvelles séries d'observations marégraphiques).

Les hauteurs ellipsoïdales de niveau de mer conditionnent également les résultats : qu'elles soient issues d'altimétrie spatiale, de levés GPS par navire, de retours de surface de mer par laser aéroporté, de marégraphes permanents, de réflectométrie GNSS ou encore de bouées GNSS, un vaste domaine de recherches reste ouvert. A ce titre, les surfaces BATHYELLI ne constituent pas aujourd'hui un produit définitivement figé et il convient d'ailleurs que l'utilisateur exploite systématiquement le champ « incertitude » associée à chaque hauteur ellipsoïdale de la grille. Le SHOM prévoit une réalisation BATHYELLI régulière (par mise à jour de versions) afin que tout usager puisse bénéficier des dernières améliorations apportées au modèle. ●

## Contacts

**Yves-Marie TANGUY**  
yves-marie.tanguy@shom.fr  
**Gwénaële JAN**  
gwenaele.jan@shom.fr  
**Yves PASTOL**  
yves.pastol@shom.fr

## Références

1. Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Ménard Y., Orsoni A., Jan G., Jeansou E. 2003. *Absolute calibration of Jason-1 and Topex-Poseidon in Corsica*, Marine Geodesy, 26, pp 261-284.
2. Coulomb A. *Mise au point sur les réseaux géodésiques et nivellement*. Revue XYZ, N°134 -1<sup>er</sup> trimestre 2013.

3. Jan G., Ménard Y., Faillot M., Lyard F., Jeansou E. Bonnefond P., 2004. *Offshore absolute calibration of space borne radar altimeters*. Marine Geodesy, Vol 27 n°3 et 4, pp 615-631.
4. Jan G., Moreaux G., Crespon F., Helbert J., *Détermination des surfaces de références pour l'hydrographie*. Rapport d'étude BATHYELLI pour le SHOM, mai 2009.
5. Lefèvre F., Schaeffer P., Wöppelman G., *Etude et fourniture de données nécessaires au calcul d'une surface moyenne océanique issue de l'altimétrie spatiale*, rapport final CLS pour le SHOM, 2007
6. Ménard Y., [1994] *L'océan physique révélé par l'altimétrie*.
7. Moreaux G. *Compactly supported radial covariance functions*. Journal of Geodesy, 2008, 82, 431-443.
8. Pineau-Guillou L., *BATHYELLI project : set-up of Chart Datum (CD) using altimetry et GPS*, colloque ENC GNSS 2008, Toulouse, 23-25 avril 2008.
9. Pineau-Guillou L., *Projet BATHYELLI : Détermination du zéro hydrographique à partir de l'altimétrie spatiale et du GPS*, revue Navigation, volume 57, n°226, avril 2009.
10. Poffa N. et al, *Évolution instrumentale des marégraphes du réseau RONIM*. Annales Hydrographiques 6<sup>e</sup> série, Vol. 8 n°777 p3-1, 2011
11. Wöppelmann G., Allain S., Baharel P., Lannuzel S., Simon B., *Zéro hydrographique vers une détermination globale*, revue XYZ, n° 79, 2<sup>e</sup> trimestre 1999, pp. 27-34 - Simon B, *Références de hauteur en hydrographie*, Annales Hydrographiques n°773, première partie.

## ABSTRACT

**Key words:** maritime vertical references, chart datum, ellipsoid referenced survey, data fusion  
*On nautical charts, depths (acquired by the echo-sounder of a vessel, or nowadays by the laser of a plane) are referenced to a chart datum (CD). The improved z-component given by GNSS introduces in hydrography another vertical reference: the IAG-GRS80 ellipsoid. In this context, the French hydrographic office SHOM started in 2005 the BATHYELLI project, in order to provide CD referenced to GRS80 in the legal geodetic system RGF93. The problematic and methodology to create the CD/GRS80 surface is presented, through altimetric, GNSS and tide gauges data fusion.*