

Évaluation des références altimétriques françaises par nivellement hydrodynamique

■ Jonathan CHENAL - Sylvain LAVOUÉ - Olivier JAMET

Les observations du niveau de la mer aux marégraphes connectés aux réseaux de nivellement français continentaux NGF/IGN69 et NIREF, et corse NGF/IGN78, sont combinées au produit de topographie dynamique moyenne de l'océan CNES-CLS22 pour calculer les altitudes des repères de nivellement attachés aux marégraphes dans le référentiel de l'altimétrie, évaluer les dénivelées entre les marégraphes, et estimer les

biais et pentes des réalisations altimétriques considérées. La pente sud-nord de la réalisation NGF/IGN69 est confirmée et estimée à 3 cm/deg, tandis qu'une pente est-ouest, plus difficile à mettre en évidence, est également suggérée. Concernant le NIREF, il est globalement plus cohérent avec le nivellement hydrodynamique, mais il est mis en évidence que la traverse de nivellement géométrique Marseille-Dunkerque de 1983 est plus proche des résultats hydrodynamiques que celle remesurée entre 2013 et 2016. Enfin, le réseau NGF/IGN78 est également frappé d'une pente nord-sud proche de 3 cm/deg. La dénivelée entre Marseille et Ajaccio permet d'estimer le biais entre les systèmes continentaux et le système insulaire à 14,6 cm. Les dénivelées hydrodynamiques sont ensuite intégrées dans les équations de compensation du NIREF, et dans une compensation intégrant le NIREF continental et l'IGN78 corse. Enfin, les systèmes altimétriques ultra-marins sont examinés avec cette méthode, et les biais entre leurs systèmes altimétriques estimés.

MOTS-CLÉS

Niveau de la mer, marégraphe, topographie dynamique moyenne, nivellement géométrique, NIREF, IGN69, IGN78

dances entre les observations de la traverse Marseille-Dunkerque en 1983, puis en 2013-2016, sont également apparues, justifiant d'examiner leur qualité respective.

Néanmoins la France n'était pas le seul pays ayant un système altimétrique non parallèle à une surface de niveau puisque, par exemple, l'Australie (Hamon et Greig, 1972) ou l'Angleterre (Penna et al., 2013) avaient identifié le même problème. Dans les deux cas, l'estimation des biais systématiques frappant le nivellement géométrique sur lequel leurs systèmes altimétriques reposaient est passée par une approche indépendante appelée nivellement hydrodynamique (Featherstone et Filmer, 2012 ; Penna et al., 2013). Cette approche consiste à combiner observations marégraphiques du niveau de la mer et produits de topographie dynamique moyenne pour rattacher les repères de nivellement installés à proximité des marégraphes au géoïde associé à la topographie dynamique moyenne utilisée. Ce faisant, on dispose d'une surface de référence, horizontale par définition, permettant de recalculer les dénivelées entre ces repères sans passer par l'intermédiaire du nivellement géométrique. L'intérêt topologique de cette approche est qu'elle permet de formuler des contraintes observationnelles sur les bords du graphe formé des travées de nivellement qui sont, par construction, moins observés. L'autre intérêt est de réaliser la connexion entre les domaines terrestre et marin et de rendre possible l'expression de dénivelées entre repères de territoires séparés par la mer, tels que le territoire principal de l'Australie et l'île de Tasmanie (Featherstone et Filmer, 2012), et donc d'exprimer leurs altitudes dans des références verticales communes.

Introduction

L'unification des références altimétriques européennes et mondiales est une démarche entamée depuis plusieurs décennies, qui passe par la comparaison des altitudes des différents systèmes à la frontière des pays, mais aussi par la détermination de celle du niveau moyen de la mer aux marégraphes rattachés aux systèmes altimétriques concernés (Levallois, 1959 ; Ihde et al., 2017). Ainsi, dès l'établissement du système altimétrique français NGF/IGN69, il est apparu qu'une pente du sud vers le nord affectait les altitudes du niveau de la mer dans des proportions excédant ce que l'océanographie pouvait expliquer (Levallois et Maillard, 1970), suggérant la présence d'erreurs systématiques de

nivellement se propageant de l'origine du système, à Marseille, sur tout le territoire. En France, l'Institut géographique national (IGN, Institut national de l'information géographique et forestière depuis 2012) décida de réobserver la dénivelée Marseille-Dunkerque en 1983, puis d'établir un réseau de nivellement de haute précision (NIREF, Nivellement de référence) pour caractériser le NGF/IGN69, reliant entre eux plusieurs marégraphes (Kasser, 1989 ; Leclercq et Coulomb, 2017). L'observation de la traverse Marseille-Dunkerque en NIREF confirma la pente du système NGF/IGN69 et permit l'expression d'un niveau moyen de la mer évoluant dans des proportions respectant la physique de l'océan sur le littoral français (Lavoué et Jamet, 2023). Cependant, des discor-



Cette approche a été récemment développée à l'échelle européenne en utilisant un modèle de circulation océanique sur l'Atlantique, la mer du Nord et la mer Baltique, dans la perspective de contribuer à l'unification verticale européenne (Afrasteh et al., 2021, 2023). En France, cette méthode est mobilisable pour revisiter l'estimation de la pente du NGF/IGN69 sans recours au NIREF, mais aussi pour évaluer ce dernier et tenter de connecter les territoires séparés par la mer, en premier lieu le système altimétrique corse NGF/IGN78 avec le système continental NGF/IGN69 et, au-delà, les départements, régions et collectivités d'Outre-mer.

Cet article présente les premières études réalisées dans ce cadre par le Service de géodésie et métrologie de l'IGN. Nous abordons successivement la méthode et les données utilisées, puis les résultats assortis d'une discussion, avant de conclure par les limites de cette première étude et les perspectives néanmoins prometteuses de cette approche.

Principes du nivellement hydrodynamique

Un système altimétrique est défini par plusieurs éléments, dont une origine et un type d'altitude. En France, le système NGF/IGN69 a pour origine le niveau moyen de la mer observé à Marseille entre 1885 et 1896 ; le type d'altitude est normal, c'est-à-dire qu'il prend pour surface de référence un quasi-géoïde, par opposition au géoïde qui est celle des altitudes orthométriques. Le quasi-géoïde diffère du géoïde en ce qu'il ne dépend pas de la distribution de densité située entre le géoïde et la surface topographique, ce qui confère aux altitudes normales une praticité que n'ont pas les altitudes orthométriques. Néanmoins, cette distinction s'estompe à partir du littoral puisque la surface topographique s'y confond avec le niveau de la mer (Heiskanen et Moritz, 1967 ; Penna, 2013 ; Filmer, 2014).

Ainsi, sur le littoral, il devient possible de lier les concepts géodésiques du domaine marin et du domaine terrestre, et de faire du géoïde la surface de référence à cette fin. Sur le domaine marin, la surface définissant le niveau moyen

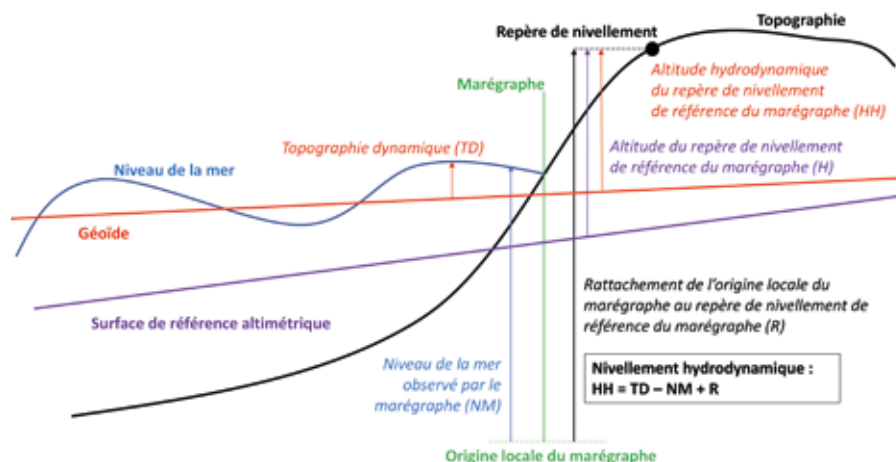


Figure 1. Illustration du principe du nivellement hydrodynamique consistant à exprimer l'altitude du repère de nivellement à partir des données océaniques.

de la mer est nommée surface moyenne de la mer (MSS, *Mean Sea Surface*) ; la distance moyenne séparant la MSS du géoïde est appelée topographie dynamique moyenne (MDT, *Mean Dynamic Topography*).

Sur le littoral, les marégraphes observent le niveau de la mer ponctuellement, à partir d'une échelle de valeurs dont l'origine, conventionnelle, est rattachée au système altimétrique par l'intermédiaire d'un repère de nivellement fondamental installé à proximité du marégraphe, le rattachement entre les deux étant noté R (hauteur du repère au-dessus de l'origine propre du marégraphe). Ainsi, si on fait l'hypothèse que le marégraphe peut observer le même niveau moyen de la mer (MSL, *Mean Sea Level*) que celui de la MSS, alors on peut associer une altitude hydrodynamique au repère de nivellement (à condition qu'il soit suffisamment près du littoral), exprimée par rapport au géoïde de la MDT (voir figure 1) :

$$HH = MDT - MSL + R$$

Cette altitude peut être comparée à l'altitude officielle H exprimée dans le système altimétrique du territoire concerné ; ainsi (Featherstone et Filmer, 2012) :

$$H - HH = K$$

La valeur K représente le biais entre la surface de référence du système altimétrique et le géoïde associé à la MDT. K n'est uniforme le long d'un littoral que si la surface de référence du système altimétrique est parallèle au géoïde de la MDT le long de la côte. Ainsi les varia-

tions spatiales de K nous renseignent sur les déformations du système altimétrique sur le littoral. De plus, la détermination de K en chaque marégraphe peut permettre d'estimer le biais moyen, ainsi que la pente nord-sud et la pente est-ouest du système altimétrique étudié par rapport au géoïde de la MDT. Si, de surcroît, les marégraphes considérés sont ceux qui matérialisent les origines de deux systèmes altimétriques A et B, alors on peut écrire :

$$\begin{aligned} H_i - HH_i &= K_A \\ H_j - HH_j &= K_B \\ \Rightarrow H_i - H_j - (HH_i - HH_j) &= K_A - K_B \end{aligned}$$

Autrement dit, c'est en examinant les dénivelées hydrodynamiques entre les marégraphes origines des systèmes altimétriques que l'on peut rigoureusement exprimer le biais entre les deux systèmes, et non à partir d'une évaluation moyenne ou de l'éventuelle connexion entre eux.

Par ailleurs, les dénivelées hydrodynamiques peuvent être utilisées pour réestimer les altitudes d'un réseau de nivellement en les introduisant comme équations d'observation. En effet, en tant que hauteur au-dessus d'une surface équipotentielle de potentiel gravitationnel W_h (le géoïde de la MDT), elles donnent accès à la différence de cote géopotentielle en deux points i et j par la relation

$$\Delta C_{ij} = (HH_j \times g_j + W_o) - (HH_i \times g_i + W_o) = HH_j \times g_j - HH_i \times g_i$$

où g_i et g_j sont les valeurs moyennes du module de l'accélération de pesanteur à l'aplomb du point considéré, entre le géoïde et la hauteur HH.



Données utilisées

Les observations du niveau de la mer par les marégraphes sont fournies avec un échantillonnage mensuel. Ce sont les données de référence locale révisée (RLR, *Revised Local Reference*) fournies par le Service permanent pour le niveau moyen de la mer (PSMSL, *Permanent Service for Mean Sea Level*, Holgate et al. 2012), qui sont rattachées au repère fondamental de chaque marégraphe par une constante également fournie par le PSMSL. D'autres observations marégraphiques sont issues du Système d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL, Woppelmann, 2004). Les marégraphes utilisés sont installés sur les territoires français : France continentale, Corse, départements, régions et collectivités d'Outre-mer (voir tableau 1 et figure 2). Les altitudes des repères de nivellement dans les systèmes NGF/IGN69 et NGF/IGN78 ont été obtenues de l'IGN, ainsi que pour les systèmes ultra-marins, sauf pour la Nouvelle-Calédonie où c'est à partir du site du Service de géomatique et de télédétection de la Direction du numérique et de la Modernisation du Gouvernement de Nouvelle-Calédonie que nous avons obtenu ces données. Les altitudes des points du NIREF sont issues de traitements internes au Service de géodésie et de métrologie de l'IGN.

Concernant la MDT, nous avons utilisé le produit CNES-CMEMS-CLS22 (voir <https://www.aviso.altimetry.fr>), dont la production est séparée entre les mers Méditerranée et Noire d'une part (par le Copernicus Marine Service, Mulet et al., 2023), et le reste de l'océan global (par CLS, Jousset et al., 2023), qui reposent tous deux sur la combinaison de données issues de l'altimétrie spatiale et d'observations *in situ* de température, salinité et vitesse des courants. Une incertitude est associée à chaque point de grille de MDT, qui est annoncée comme sous-estimée, ne prenant en compte que l'incertitude formelle du processus d'interpolation.

Traitement des données

Les observations marégraphiques mensuelles sont extraites sur la même période que celle de la MDT qui, toutes

Tableau 1. Territoires français, systèmes altimétriques associés et marégraphes utilisés dans cette étude.

Territoire	Système altimétrique	Marégraphe
France continentale	NGF/IGN69 + NIREF	Brest
	NGF/IGN69 + NIREF	Marseille
	NGF/IGN69 + NIREF	La Rochelle
	NGF/IGN69 + NIREF	Cherbourg
	NGF/IGN69 + NIREF	Dunkerque
	NGF/IGN69 + NIREF	Socoa
	NGF/IGN69	Boucau
	NGF/IGN69	Boulogne
	NGF/IGN69	Calais
	NGF/IGN69	Concarneau
	NGF/IGN69	Dieppe
	NGF/IGN69	Arcachon
	NGF/IGN69	Mimizan
	NGF/IGN69	Port-Tudy
	NGF/IGN69	Roscoff
	NGF/IGN69	Sète
	NGF/IGN69	Saint-Malo
Corse	NGF/IGN69	Saint-Nazaire
	NGF/IGN69	Toulon
	NGF/IGN69	La Figueirette
	NGF/IGN78	Ajaccio
Martinique	NGF/IGN78	Centuri
	NGF/IGN78	Solenzara
	NGF/IGN78	L'Île Rousse
Guyane	IGN1987	Fort-de-France
Guadeloupe	NGG1977	Île Royale
Saint-Pierre-et-Miquelon	IGN88	Pointe-à-Pitre
Réunion	DANGER1950	Saint-Pierre
Terres australes et antarctiques françaises (Kerguelen)	Réunion-1989	Pointe-des-galets
Terres australes et antarctiques françaises (Saint-Paul)	TAAF-IGN66	Kerguelen
Nouvelle-Calédonie	S1	Saint-Paul
	NGNC	Nouméa-Numbo
	NGNC	Hienghène
	NGNC	Tadine
Polynésie française	NGNC	Thio
	IGN66	Papeete
	NGPF	Vairao
	ZH-PF	Rikitea
	ZH-PF	Tubuai
	ZH1997	Nuku-Hiva (Taiohae)
	ZH1990	Rangiroa



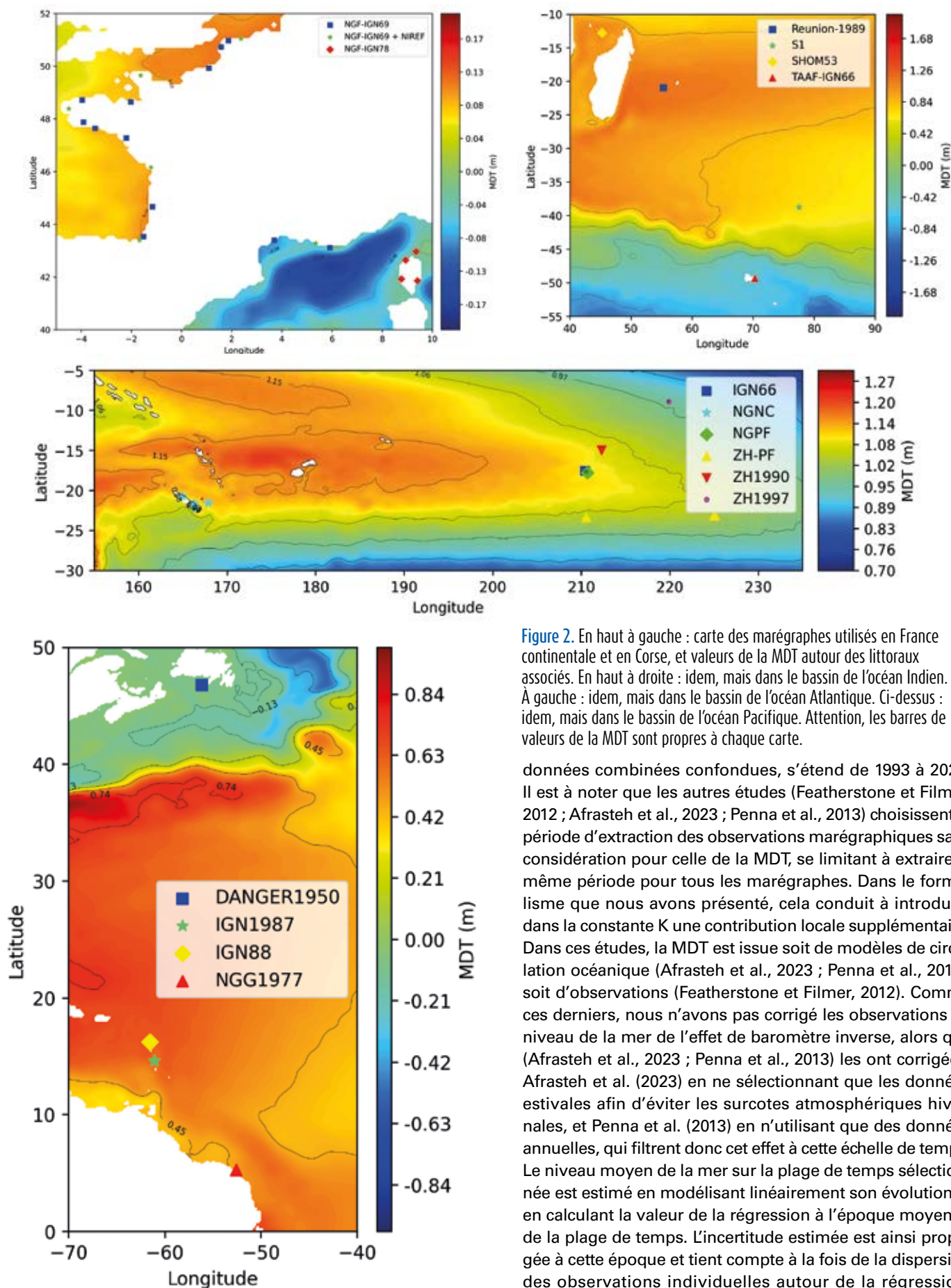


Figure 2. En haut à gauche : carte des marégraphes utilisés en France continentale et en Corse, et valeurs de la MDT autour des littoraux associés. En haut à droite : idem, mais dans le bassin de l'océan Indien. À gauche : idem, mais dans le bassin de l'océan Atlantique. Ci-dessus : idem, mais dans le bassin de l'océan Pacifique. Attention, les barres de valeurs de la MDT sont propres à chaque carte.

données combinées confondues, s'étend de 1993 à 2020. Il est à noter que les autres études (Featherstone et Filmer, 2012 ; Afrasteh et al., 2023 ; Penna et al., 2013) choisissent la période d'extraction des observations marégraphiques sans considération pour celle de la MDT, se limitant à extraire la même période pour tous les marégraphes. Dans le formalisme que nous avons présenté, cela conduit à introduire dans la constante K une contribution locale supplémentaire. Dans ces études, la MDT est issue soit de modèles de circulation océanique (Afrasteh et al., 2023 ; Penna et al., 2013), soit d'observations (Featherstone et Filmer, 2012). Comme ces derniers, nous n'avons pas corrigé les observations de niveau de la mer de l'effet de baromètre inverse, alors que (Afrasteh et al., 2023 ; Penna et al., 2013) les ont corrigées, Afrasteh et al. (2023) en ne sélectionnant que les données estivales afin d'éviter les surcotes atmosphériques hivernales, et Penna et al. (2013) en n'utilisant que des données annuelles, qui filtrent donc cet effet à cette échelle de temps. Le niveau moyen de la mer sur la plage de temps sélectionnée est estimé en modélisant linéairement son évolution et en calculant la valeur de la régression à l'époque moyenne de la plage de temps. L'incertitude estimée est ainsi propagée à cette époque et tient compte à la fois de la dispersion des observations individuelles autour de la régression, mais aussi de la plage de données effectives sur la plage de

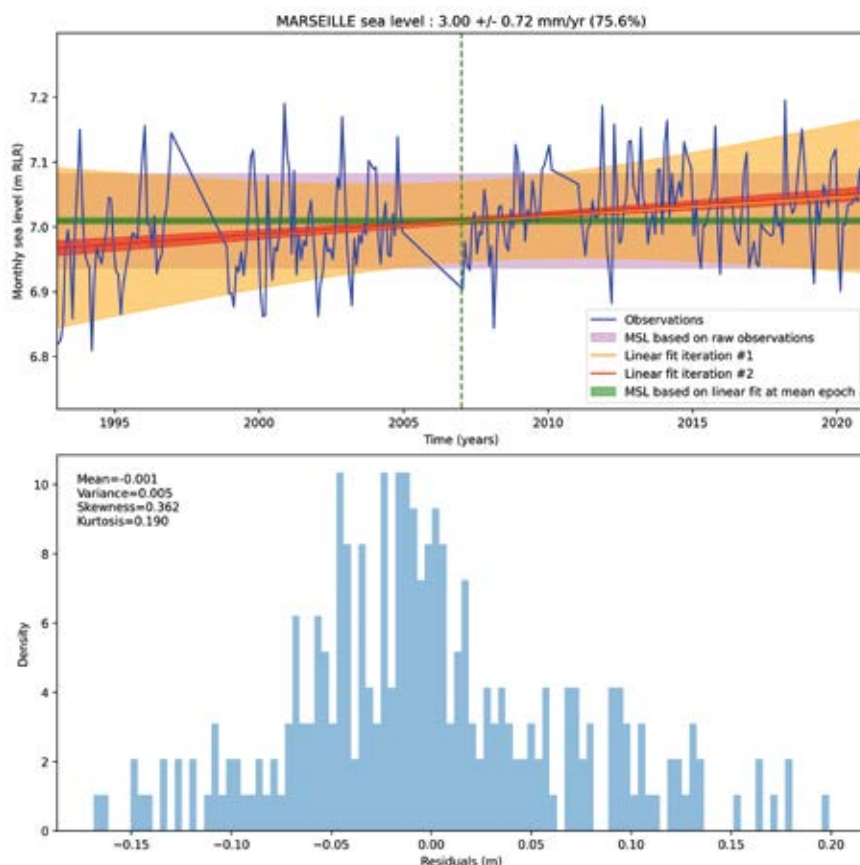


Figure 3. Série temporelle de niveau de la mer à Marseille et niveau moyen calculé (RLR, m) ; en haut est indiqué le taux de variation observé du niveau de la mer (moyenne, écart-type), ainsi que le taux d'observations présentes par rapport au nombre attendu. En bas : histogramme des résidus sur la dernière itération, avec indication des quatre moments de leur distribution.

temps sélectionnée (voir l'exemple de Marseille sur la figure 3).

Résultats de l'évaluation de l'IGN69

La régression bivariée de la différence entre les altitudes publiées et les altitudes hydrodynamiques pour les marégraphes rattachés au NGF/IGN69 nous donne une pente nord-sud de $29,2 \pm 3,6$ mm/deg (1 sigma) et une pente est-ouest de $-4,7 \pm 2,9$ mm/deg. La significativité de cette régression est jugée en regard de la valeur p (p-val), qui quantifie la probabilité que le résultat soit dû au hasard (probabilité de l'hypothèse nulle ; voir Pearson, 1900). Nous calculons ici la valeur p en comparant la distribution des valeurs du modèle linéaire déterminé avec la distribution des observations. La valeur

p de cette estimation est inférieure à 10^{-8} . Autrement dit, il est virtuellement certain que ces pentes ne sont pas dues au hasard, mais résultent bien d'un signal, ceci même si l'écart-type sur la pente est-ouest est de plus de 50 % de sa valeur. Ces valeurs diffèrent de celles de Rülke et al. (2012), qui trouve des pentes plus fortes, à hauteur de 4,7 cm/deg, et de -1,8 cm/deg, respectivement, sur la base de comparaisons de géoïdes (sans indication d'incertitude).

Nous avons testé la robustesse de notre évaluation en changeant la configuration des marégraphes utilisés et en ne retenant que ceux de la façade atlantique, plus proche de l'étude d'Afrasteh et al. (2023). Dans ce cas, nous obtenons une pente nord-sud cohérente avec celle obtenue avec le réseau total, à savoir $27,8 \pm 4,4$ mm/deg, et une pente est-ouest également cohérente avec celle obtenue avec le réseau total, mais avec un écart-type supérieur ($-3,4 \pm 5,2$ mm/deg) (voir tableau 3).

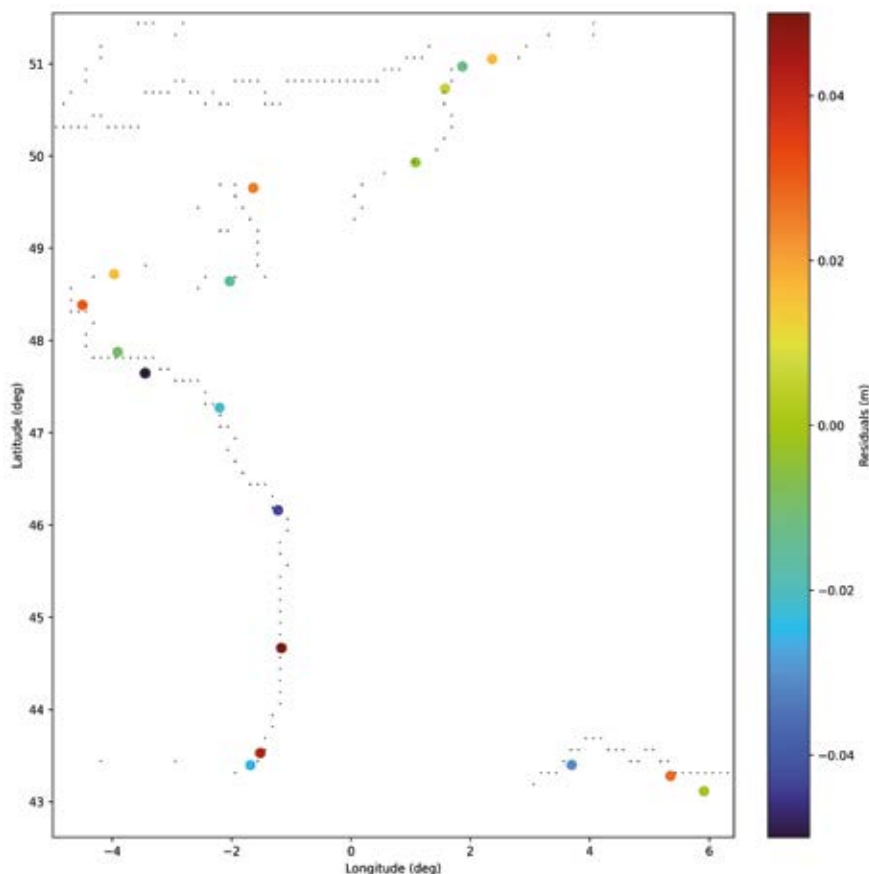


Figure 4. Carte des résidus de l'ajustement bivarié modélisant une transformation linéaire entre IGN69 et nivellement hydrodynamique estimée aux marégraphes français connectés à l'IGN69.

Tableau 2. Pentes nord-sud et est-ouest, avec écart-type, des solutions NIREF, NIREF-MD83 et NIREF-MD16. Les deux dernières colonnes indiquent les RMS des résidus et la valeur p.

Solution	Pente nord-sud (mm/deg)	Pente est-ouest (mm/deg)	RMS (mm)	p-val
NIREF	6,8 +/- 7,1	0,6 +/- 5,7	37,0	0,18
NIREF-MD83	9,3 +/- 7,0	0,2 +/- 5,6	42,3	0,08
NIREF-MD16	5,0 +/- 7,3	1,0 +/- 5,9	34,0	0,33

Tableau 3. Pentes des systèmes continentaux obtenus sur la seule base des marégraphes de la façade atlantique.

Solution	Pente nord-sud (mm/deg)	Pente est-ouest (mm/deg)	RMS (mm)	p-val
IGN69ATL	28,3 +/- 4,3	-3,9 +/- 5,1	71,8	4 e-6
NIREFATL	12,3 +/- 6,6	-10,9 +/- 6,6	43,4	0,11
NIREFATL-MD83	14,2 +/- 7,1	-10,2 +/- 8,6	48,9	0,10
NIREFATL-MD16	10,9 +/- 6,1	-11,5 +/- 7,5	39,1	0,12



La traverse Marseille-Dunkerque, qui fait souvent office de témoignage de la pente sud-nord du système NGF/IGN69, est évaluée avec une dénivelée hydrodynamique de 4,919 +/- 0,013 m, contre 5,150 m avec les différences d'altitudes NGF/IGN69, conduisant à une évaluation de la différence de 23,1 +/- 1,3 cm.

Cette estimation est proche des 25,1 cm mesurés à partir de la traverse Marseille-Dunkerque du nivellement scientifique NIREF observée en 1983 (Kasser, 1989). Elle est également cohérente avec l'une des estimations plus récentes de Leclercq et Coulomb (2017). Ces auteurs l'évaluaient à 23 cm à partir de l'ensemble des observations NIREF, et à 19,6 cm à partir de la réobservation de la traverse Marseille-Dunkerque entre 2013 et 2016, sans avoir pu trancher entre les deux valeurs à cette époque.

Les résidus de la régression bivariée utilisée peuvent par ailleurs suggérer soit des fautes dans le nivellement géométrique, soit des déformations locales de la NGF/IGN69 non modélisées par la transformation linéaire utilisée, notamment à Dunkerque, Boulogne, Calais, Saint-Malo et Socoa, soit encore bien entendu une incertitude du nivellement hydrodynamique non modélisée (voir figure 4).

Résultats de l'évaluation du NIREF

Nous avons procédé de la même manière avec les marégraphes rattachés à l'ensemble du réseau NIREF, qui

sont en moins grand nombre, et avons testé trois configurations pour comparer les deux observations de la traverse Marseille-Dunkerque, mesurée une première fois en 1983, et réobservée entre 2013 et 2016 : une première solution avec les deux observations de cette traverse ("NIREF"), une deuxième solution sans l'observation de 1983 MD83 ("NIREF-MD83") et une troisième solution sans l'observation de 2013-2016 MD16 ("NIREF-MD16") (voir tableau 2).

Les résultats semblent suggérer que la traverse MD83 est moins biaisée sur la direction nord-sud que la traverse MD16. L'incertitude sur la pente est-ouest est, dans tous les cas, très supérieure à la valeur estimée. La configuration "NIREF" est logiquement une moyenne entre les deux autres.

Concernant la traverse Marseille-Dunkerque, sa dénivelée dans la configuration NIREF-MD16 est de 4,932 +/- 0,011 m, soit un écart de 1,3 +/- 1,7 cm avec le nivellement hydrodynamique, tandis qu'elle vaut 4,985 +/- 0,009 m en configuration NIREF-MD83, amenant un biais avec le nivellement hydrodynamique de 6,7 +/- 1,5 cm. Ces résultats corroborent donc la conclusion selon laquelle la traverse Marseille-Dunkerque de 1983 est plus cohérente avec le géoïde de la MDT que celle de 2013-2016 et donc que la surface de référence que l'on pourrait associer à la première est plus proche de l'horizontalité que la seconde.

Si on procède au même test de sensibilité que pour le NGF/IGN69, à savoir

estimer les pentes nord-sud et est-ouest des différentes configurations du NIREF sur la seule base hydrodynamique des marégraphes de la façade atlantique, on constate que le retrait du marégraphe de Marseille amène à des pentes substantielles sur le NIREF, dans les deux directions (voir tableau 3). Néanmoins, ces évaluations reposant alors seulement sur cinq marégraphes, leur robustesse statistique demeure sujette à caution. Ces résultats seront à comparer aux études antérieures qui se sont appuyées sur les mêmes marégraphes, comme la compensation du réseau européen proposée par Afrasteh et al. (2023).

Intégration du nivellement hydrodynamique dans la compensation du réseau

Disposant des équations d'observation du NIREF dans ces différentes configurations, nous avons pu avoir une autre approche et introduire les dénivelées hydrodynamiques comme équations d'observation du système à inverser. Ce calcul permet d'estimer l'influence de ces observations de dénivelées à longue distance sur l'ensemble des altitudes des points du NIREF.

Nous avons donc introduit les observations hydrodynamiques dans les trois configurations mentionnées précédemment, que nous avons comparées aux mêmes configurations compensées sans ces observations. Nous avons comparé point par point les différences d'altitudes entre les points du NIREF (voir tableau 4) puis les paramètres du basculement entre configuration enrichie du nivellement hydrodynamique et configuration originale (voir tableau 5). Les pentes nord-sud estimées diffèrent de celles obtenues sur la seule base des marégraphes et sont plus faibles, ce qui indique que l'apport des observations côtières ne permet pas de corriger l'intégralité du basculement. Elles aboutissent à la même conclusion quant au biais de la traverse Marseille-Dunkerque de 2013-2017, qui introduit une pente nord-sud de l'ordre de 9 mm/deg.

La carte des écarts entre les ajustements de la configuration NIREF-MD16



et de la même configuration complétée par le nivellement hydrodynamique (voir figure 5) indique des différences positives de plus en plus fortes du centre de la France vers l'Ouest sur la traverse Ernée-Brest. À l'inverse, la traverse Roanne-La Rochelle indique des écarts négatifs de plus en plus forts vers l'Ouest. Des écarts légèrement positifs sont également constatés sur le pourtour méditerranéen. De façon plus générale, les écarts semblent attachés aux traverses et non distribués aléatoirement sur le territoire. Néanmoins, ils ne montrent pas d'effet spécifique sur le sud-ouest du territoire tel que suggéré par Afrasteh et al. (2023), probablement pour les raisons déjà citées concernant l'évaluation des pentes nord-sud et est-ouest, à savoir le choix des marégraphes et le choix de la source de MDT.

Tableau 4. Moyenne et écart-type (mm) de la comparaison des trois configurations du NIREF (toutes observations, traverse Marseille-Dunkerque 1983 retirée, traverse 2013-2016 retirée) avec leur équivalent contraint par le nivellement hydrodynamique.

Système	Moyenne (mm)	Écart-type (mm)
NIREF	3,7	16,9
NIREF-MD83	13,5	23,3
NIREF-MD16	-8,0	14,9

Tableau 5. Paramètres de transformation des trois configurations du NIREF (toutes observations, traverse Marseille-Dunkerque 1983 retirée, traverse 2013-2016 retirée) vers leur équivalent contraint par le nivellement hydrodynamique.

Système	Pente nord-sud (mm/deg)	Pente est-ouest (mm/deg)	RMS (mm)	p-val
NIREF	5,8 +/- 4,6 e-5	2,2 +/- 4,2 e-5	10,3	0
NIREF-MD83	8,6 +/- 5,5 e-5	1,1 +/- 4,8 e-5	11,7	0
NIREF-MD16	3,9 +/- 5,8 e-5	2,1 +/- 4,6 e-5	11,6	0

Évaluation du NGF/IGN78 Corse et connexion aux systèmes continentaux

Le système altimétrique corse NGF/IGN78 pour lequel nous avons identifié quatre marégraphes rattachés a également été évalué par la méthode hydrodynamique. Nous avons d'abord, sur la seule base des marégraphes, estimé le basculement du système IGN78 par rapport au géoïde de la MDT, et trouvé une pente nord-sud de 2,9 +/- 1,0 cm/deg, quasiment identique à la pente du NGF/IGN69, et une pente est-ouest de 0,9 +/- 1,3 cm/deg. L'incertitude sur cette dernière reste supérieure à la valeur obtenue et la valeur p de l'ajustement atteint 0,21, ce qui conduit à n'attribuer qu'une confiance relative à ce résultat. En effet, le faible nombre de marégraphes disponibles limite la consolidation statistique de l'étude

et, de surcroît, l'incertitude sur l'altitude hydrodynamique du marégraphe de Solenzara, due à une très courte série d'observations marégraphiques, contribue à alimenter l'incertitude sur le résultat.

Nous avons ensuite calculé la dénivelée hydrodynamique entre les marégraphes continentaux et les marégraphes corses. Parmi celles-ci, la dénivelée Ajaccio-Marseille est de première importance puisqu'elle permet de relier les origines des deux systèmes. La comparaison entre les différences d'altitude des repères fondamentaux et la valeur de la dénivelée hydrodynamique, que nous avons estimée à 1,022 +/- 0,011 m, aboutit à un biais positif entre NGF/IGN78 et NGF/IGN69 entre les deux systèmes de 0,146 +/- 0,011 m (NGF/IGN78 au-dessus de NGF/IGN69).

Disposant des équations d'observation du système corse, nous avons

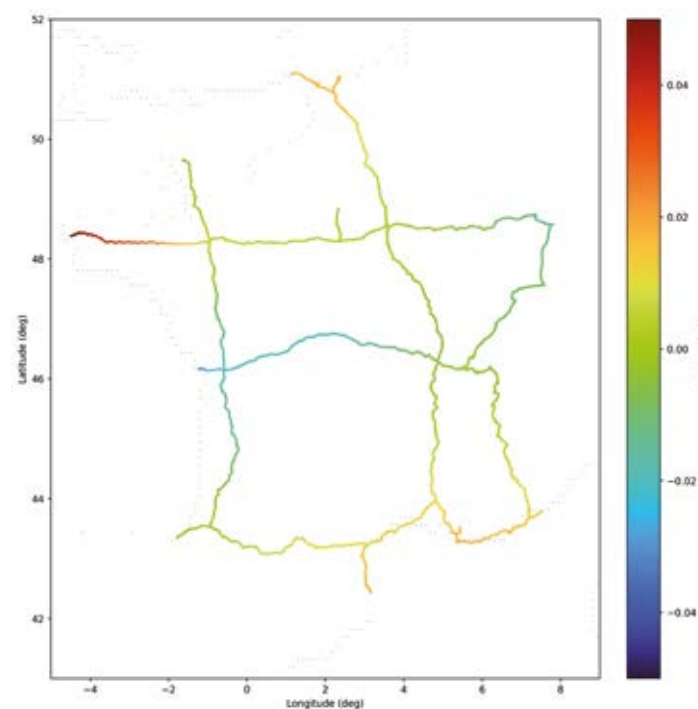


Figure 5. Carte des résidus des traverses de la configuration NIREF-MD16 entre les solutions sans et avec contraintes hydrodynamiques.

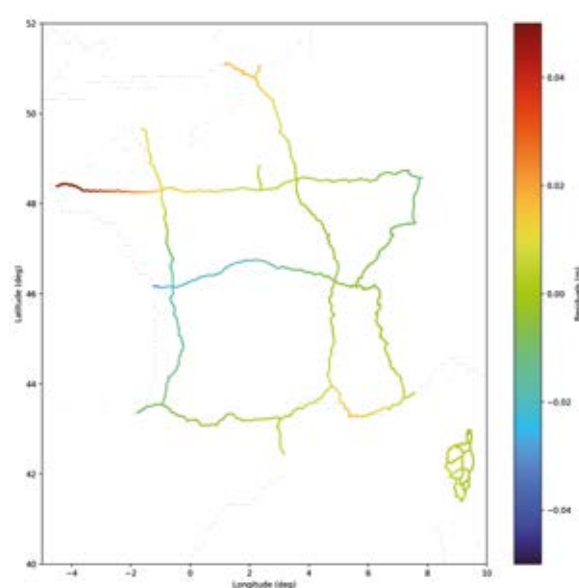


Figure 6. Carte des résidus de la comparaison entre la compensation du NIREF (configuration NIREF-MD16) avec l'IGN78, avec et sans les contraintes hydrodynamiques. Celles-ci sont appliquées à plusieurs niveaux : sur les deux systèmes d'une part, et en les connectant avec les contraintes hydrodynamiques entre Sète, Marseille et Toulon, côté continent, Ajaccio, Centuri, Solenzara et l'Île-Rousse, côté Corse, d'autre part.

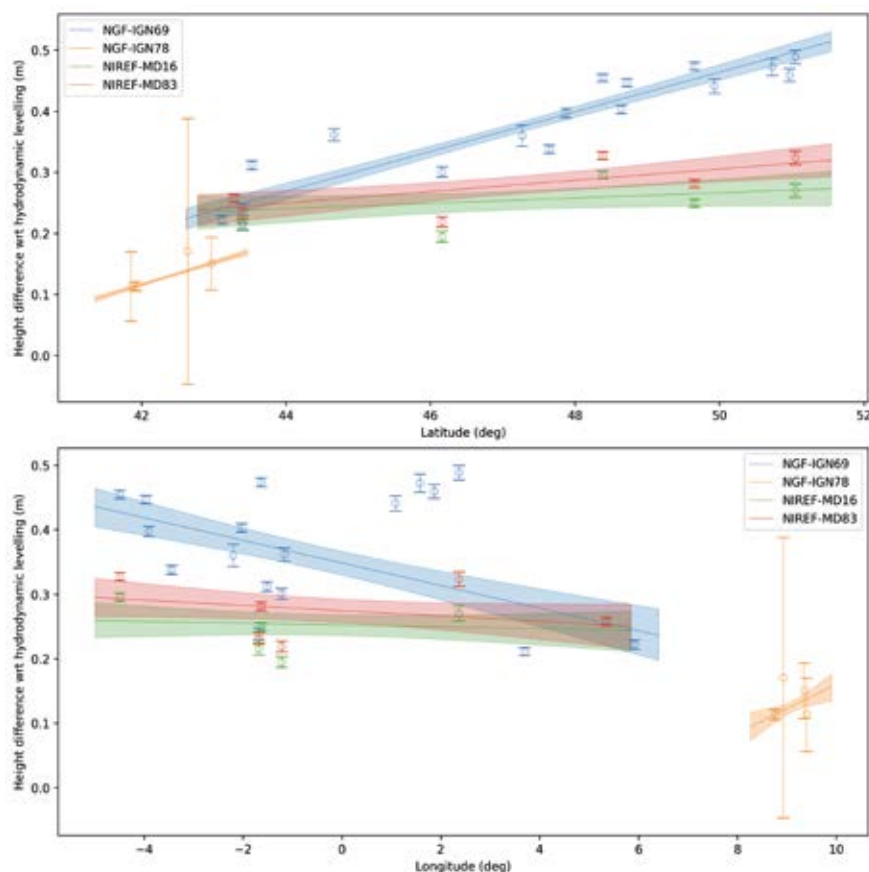


Figure 7. Différence entre l'altitude publiée et l'altitude hydrodynamique, en fonction, en haut, de la latitude, et, en bas, de la longitude, pour différents systèmes. Chaque point représente un marégraphe, et les barres d'erreur sont à un sigma. Les droites de régression illustrent la pente des systèmes considérés et les enveloppes d'erreur sont à 1 sigma. La configuration NIREF, intermédiaire entre NIREF-MD16 et NIREF-MD83 a été retirée par seul souci de lisibilité de la figure.

pu introduire les dénivelées entre les marégraphes continentaux et les marégraphes corses, ainsi qu'entre marégraphes corses pour recalculer la compensation du système corse. Nous avons ainsi évalué l'apport de la méthode hydrodynamique sur celui-ci, ayant vocation à la fois à le contraindre à être parallèle au géoïde de la MDT utilisée, mais aussi à être cohérent avec le système continental. Deux types de calculs ont été réalisés. Dans le premier, nous avons calculé une compensation NIREF + NGF/IGN78 en introduisant les contraintes hydrodynamiques entre les trois marégraphes de la Côte d'Azur

(Sète, Marseille, Toulon) et les quatre du littoral corse, dans les trois configurations du NIREF déjà présentées, mais nous ne présentons que ceux avec la traverse MD83 dans cet article (configuration NIREF-MD16). À ce stade de nos études, l'estimation d'un jeu unique de paramètres de basculement par compensation n'aurait pas de sens et donc, nous ne présentons, pour ces calculs, que la moyenne et l'écart-type de la distribution des écarts avec les altitudes publiées. On voit dans le *tableau 6*, d'abord, la faisabilité d'un tel calcul, inédit à notre connaissance. Un autre élément frappant de la distribution

des résidus est l'asymétrie de la distribution, puisque l'intervalle de confiance à 90 % est de $[-0,019 ; 0,061]$ m.

Dans le deuxième type de calcul, nous n'avons imposé que la contrainte Ajaccio-Marseille pour lier la Corse au continent et aligner les origines des deux systèmes, et n'avons ajouté les contraintes hydrodynamiques qu'entre marégraphes corses, afin d'aligner la surface de référence de l'IGN78 parallèlement au géoïde de la MDT ; cette configuration intègre des contraintes hydrodynamiques qui, dans le cas corse, ne sont pas très strictes au regard de l'incertitude sur le niveau moyen de la mer due aux séries temporelles courtes des marégraphes de Centuri, L'Île-Rousse et, comme déjà mentionné, de Solenzara (écarts-types de 4,6 cm, 5,8 cm et 21,7 cm respectivement). Dans ce cas, il n'est pas possible de mettre en évidence une pente nord-sud significative, tandis qu'une pente est-ouest émerge à hauteur de -6 mm/deg.

Connexion des systèmes altimétriques d'Outre-mer

L'évaluation des systèmes altimétriques des départements, régions et territoires d'Outre-mer est plus sommaire, car la petite taille de la plupart de ces territoires les conduit à n'être souvent équipés que d'un seul marégraphe avec des données librement accessibles, ce qui ne permet donc d'estimer qu'une altitude hydrodynamique par système altimétrique, et, par conséquent, que les écarts entre ces systèmes et le système hydrodynamique, et non leurs pentes. Seul le système altimétrique de Nouvelle-Calédonie, avec quatre marégraphes, a pu donner lieu à l'estimation d'un basculement, avec une pente nord-sud de $0,544 \pm 0,633$ m/deg et une pente est-ouest de $0,415 \pm 0,418$ m/deg ; ces valeurs exagérées sont probablement liées à l'installation des différents marégraphes sur des îles distinctes et au fait que, bien qu'annoncées dans le même système altimétrique, leurs altitudes ne le sont en réalité probablement pas. Les autres résultats figurent dans le *tableau 7*.

Tableau 6. Statistiques de la comparaison des compensations intégrant les trois configurations du NIREF et l'IGN78 avec leurs équivalents contraints par le nivellement hydrodynamique entre marégraphes méditerranéens.

Configuration	Moyenne (mm)	Écart-type (mm)
NIREF + IGN78	0,0021	0,0159
NIREF-MD83 + IGN78	0,0100	0,0225
NIREF-MD16 + IGN78	-0,0076	0,0135



Tableau 7. Écarts des systèmes altimétriques des départements, régions et territoires d'Outre-mer par rapport au système hydrodynamique.

Territoire	Système altimétrique	Hauteur du système altimétrique au-dessus du géoïde MDT (m)
Saint-Pierre-et-Miquelon	DANGER1950	0,1846 +/- 0,0736
Martinique	IGN1987	0,0501 +/- 0,0146
Guadeloupe	IGN88	-0,5323 +/- 0,0071
Guyane	NGG1977	-0,2102 +/- 0,0233
Réunion	Réunion1989	-1,160 +/- 0,0070
Mayotte	SHOM53	11,3607 +/- 0,0332
Saint-Paul (TAAF)	S1	6,1566 +/- 0,0313
Kerguelen (TAAF)	TAAF-IGN66	0,5075 +/- 0,0118
Polynésie française	IGN66	-1,1921 +/- 0,0058
Polynésie française	NGPF	-1,0253 +/- 0,0552
Polynésie française	ZH1990	-7,4025 +/- 0,0339
Polynésie française	ZH1997	0,06774 +/- 0,0065

Conclusions et perspectives

En conclusion, notre étude a permis de revisiter l'évaluation des systèmes altimétriques français appuyés sur le nivellement géométrique en bénéficiant de la disponibilité des observations marégraphiques et d'estimations de la topographie dynamique moyenne de l'océan. Nous confirmons la pente nord-sud du système NGF/IGN69, à hauteur d'environ 3 cm/deg (soit environ 23 cm entre Marseille et Dunkerque), et suggérons aussi l'existence d'une pente est-ouest. De même, nous avons comparé les données océaniques au nivellement scientifique NIREF et mis en évidence la pente relative entre la traverse Marseille-Dunkerque de 2013-2016 et celle de 1983, cette dernière s'avérant plus cohérente avec le nivellement hydrodynamique. Malgré l'incertitude sur l'altitude hydrodynamique des marégraphes corses due à de plus courtes séries de données, nous avons également montré que le système altimétrique corse NGF/IGN78 est probablement affecté d'une pente nord-sud. Une des plus intéressantes avancées que permet le nivellement hydrodynamique réside dans la connexion des territoires séparés par la mer.

Ainsi, nous avons pu rattacher la Corse et le continent et, d'une part, évaluer le biais entre ces systèmes à leur origine à environ 14,6 cm (NGF/IGN78 au-dessus de NGF/IGN69), et, d'autre part, intro-

duire les deux ensembles d'équations d'observation dans une même compensation, en les reliant par les dénivelées entre les marégraphes de la Côte d'Azur, sur le continent, et ceux sur le littoral corse. Enfin, nous avons exprimé dans une même référence verticale les origines des systèmes altimétriques des départements, régions et territoires d'Outre-mer français.

Cette étude a cependant des limites que nous allons continuer d'examiner dans de futurs travaux. En effet, Jousset et al. (2022) signalent que l'incertitude sur le produit de MDT CNES-CLS22 est sous-estimée. Nous allons donc étudier la sensibilité de nos résultats au modèle de MDT utilisé afin de mieux estimer l'incertitude de ce produit. Par ailleurs, la question de l'effet des corrections éventuelles à apporter aux observations marégraphiques et des trous de données sur l'estimation du niveau moyen de la mer sur une période donnée est à considérer, tout comme la prise en compte du mouvement vertical local des marégraphes, observé par GNSS.

Les perspectives ouvertes par ces travaux sont de plusieurs ordres. D'abord, le nivellement hydrodynamique contribue à la connexion verticale de territoires séparés par la mer. Il peut ainsi contribuer à la qualité des rattachements entre îles voisines, jusqu'alors effectué avec une mesure unique de zénithales réciproques. Il peut par ailleurs contribuer à l'unifica-

tion verticale européenne et mondiale. À court terme, nous pourrions par exemple examiner l'apport de ces travaux à la détermination de la référence européenne, comparativement aux travaux précédents qui n'exploitent pas de modèles de MDT issus des observations satellitaires.

Enfin, les besoins relatifs à la caractérisation de l'évolution du niveau de la mer à la côte et à l'adaptation des littoraux à son élévation vont croissant. Si ces besoins continuent d'être prégnants et forment un puissant motif pour développer la géodésie, le nivellement hydrodynamique renverse la perspective puisqu'il montre que le développement, la modernisation et la connexion des systèmes altimétriques requiert des observations et des produits associés au niveau de la mer, issus de la marégraphie et de l'océanographie opérationnelle. Ce sont ainsi ces deux domaines scientifiques et ces deux communautés que le nivellement hydrodynamique invite à rapprocher. ●

Contact

Jonathan Chenal, IGN,
Jonathan.Chenal@ign.fr

Disponibilité des données

Les données associées à cet article sont disponibles sur demande auprès de Jonathan Chenal.

Remerciements

Les auteurs remercient Solène Jousset et Eric Greiner (CLS) pour leurs précisions très utiles quant au produit de MDT CNES-CLS22 et leur intérêt pour nos travaux, ainsi que José De Oliveria Pinheiro (IGN) pour ses apports inestimables concernant les données associées au nivellement géométrique. Les auteurs remercient enfin les fournisseurs de données, le PSMSL et SONEL pour les observations de niveau mensuel moyen de la mer et les rattachements locaux entre marégraphes et repères de nivellement, le SHOM pour les références altimétriques maritimes, l'IGN pour les fiches descriptives des repères de nivellement, et Aviso pour la topographie dynamique moyenne. ●



Références

- Afrasteh, Y., et al. "The potential impact of hydrodynamic leveling on the quality of the European vertical reference frame." *Journal of Geodesy* 95 (2021): 1-18.
- Afrasteh, Y., et al. "Realizing the European Vertical Reference System using model-based hydrodynamic leveling data." *Journal of Geodesy* 97.10 (2023): 86.
- Featherstone, Will. "Towards the unification of the Australian height datum between mainland and Tasmania using GPS and AUSGeoid98." *Geomatics Research Australasia* 73 (2000): 33-54.
- Featherstone, W. E., and M. S. Filmer. "The north south tilt in the Australian Height Datum is explained by the ocean's mean dynamic topography." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117.C8 (2012).
- Featherstone, W. E., and M. S. Filmer. "A re-evaluation of the offset in the Australian Height Datum between mainland Australia and Tasmania." *Marine Geodesy* 35.1 (2012): 107-119.
- Filmer, M. S. "Using models of the ocean's mean dynamic topography to identify errors in coastal geodetic levelling." *Marine Geodesy* 37.1 (2014): 47-64.
- Hamon, B. V., and M. A. Greig. "Mean sea level in relation to geodetic land leveling around Australia." *Journal of Geophysical Research* 77.36 (1972): 7157-7162.
- Heiskanen, W. A. and Moritz, W. *Physical Geodesy*. W. H. Freeman, 1967.
- Holgate, Simon J., et al. "New data systems and products at the permanent service for mean sea level." *Journal of Coastal Research* 29.3 (2013): 493-504.
- Ihde, Johannes, et al. "Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHR)." *Surveys in geophysics* 38 (2017): 549-570.
- Jousset, Solène, et al. "New global Mean Dynamic Topography CNES-CLS-22 combining drifters, hydrological profiles and High Frequency radar data." *Authorea Preprints* (2023).
- Kasser, M. *Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983*. Comptes-rendus de l'Académie des sciences, t. 309, série II, pp. 695-700 (1989).
- Lavoué, S., Jamet, O. "Intercomparaison par nivellement de précision de niveaux moyens de la mer aux principaux marégraphes hexagonaux". *XYZ*, 177 (2023).
- Leclercq, J., Coulomb, A. "Nivellement de très haute précision". *XYZ*, 153 (2017).
- Levallois, J.-J. "Symposium sur le niveau moyen des mers en Europe occidentale". Liverpool. Archives IGN (1959).
- Levallois, J.-J., and Maillard, J. "Le nouveau réseau de nivellement de 1^{er} ordre du territoire français - conséquences pratiques et scientifiques". In *Report on the symposium on coastal geodesy*, Munich, ed. R. Sigl (1970).
- Mulet, S., S. Jousset, and M. I. Pujol. "Sea Level TAC MDT products." (2024).
- Pearson, K. (1900) *On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling*, *Philosophical Magazine*. Series 5. 50 (302): 157-175.
- Penna, N. T., et al. "The apparent British sea slope is caused by systematic errors in the levelling-based vertical datum." *Geophysical Journal International* 194.2 (2013): 772-786.

ABSTRACT

Tide gauges sea level observations connected to French vertical reference frame NGF/IGN69 and NIREF, as well as Corsican NGF/IGN78, are combined to mean dynamic topography of the ocean product CNES-CLS22 to calculate heights of tide gauges benchmarks, assess height differences between tide gauges, and assess biases and slopes of vertical datums. The south-north slope of the frame NGF/IGN69 is confirmed and estimated at 3 cm/deg, while an east-west slope, more difficult to display, is suggested. NIREF is more consistent with the hydrodynamic system, but it is evidenced that Marseille-Dunkerque height difference observed by spirit levelling in 1983 is more consistent with the hydrodynamic levelling estimate than the same difference reobserved by spirit levelling in 2013-2016. Corsica vertical reference NGF/IGN78 has also a south-north slope of about 3 cm/deg. The hydrodynamic height difference between Marseille and Ajaccio allows to estimate the vertical difference of IGN69 and IGN78 systems to 14.6 cm. Hydrodynamic height differences are integrated into adjustment equations of NIREF, and in another adjustment including continental NIREF and Corsican IGN78. Finally, French overseas height systems are assessed with this method, and their relative biases estimated.

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe
ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut
de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg
9, rue des Champs
F-57200 SARREGUEMINES
Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04
Courriel : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand
et d'anglais en français en topographie –
géodésie – géomatique – GNSS

Reinhard Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la
Chambre de commerce et d'industrie de Berlin
Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60
Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61
Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions de français
et d'anglais en allemand en géomatique
– GNSS – infrastructures de transport

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service