

Intercomparaison par nivellement de précision de niveaux moyens de la mer aux principaux marégraphes hexagonaux

■ Sylvain LAVOUÉ - Olivier JAMET

L'IGN met en œuvre un réseau de nivellement de haute précision (le NIREF) reliant entre eux différents marégraphes présents sur les côtes métropolitaines continentales et contribuant à la référence verticale européenne. Ce réseau, s'il met en évidence des biais dans le système de référence légal des altitudes NGF/IGN69, offre également la possibilité de déterminer des différences de potentiel entre ces marégraphes et des dénivelées, d'ordre de grandeur décimétrique, entre les niveaux moyens des bassins océaniques. Néanmoins, l'évaluation de la qualité du NIREF par comparaison à des modèles de potentiel de pesanteur globaux montre qu'il semble subsister sur celui-ci une erreur résiduelle de quelques centimètres que des travaux en cours à l'IGN cherchent à mieux caractériser.

MOTS-CLÉS

Nivellement de haute précision, NIREF, référence verticale, marégraphie

Introduction

Lorsque l'on parle de niveaux moyens de la mer, il convient de distinguer niveau marin absolu, qui correspond à la hauteur d'eau par rapport à un référentiel absolu et géocentrique et niveau marin relatif observé localement par des instruments, par rapport au socle terrestre qui les supporte. Les différents marégraphes présents sur nos côtes entrent dans cette deuxième catégorie et enregistrent les variations relatives de hauteur du niveau de la mer local par rapport à un ou plusieurs points de référence situés sur la terre, à proximité du lieu de mesure. Le niveau de la mer est généralement exprimé par rapport à deux surfaces de référence globales qui définissent la forme de la Terre : l'ellipsoïde (référencement géométrique) et le géoïde (référencement dynamique).

L'ellipsoïde de révolution est la surface mathématique qui approxime au mieux le géoïde terrestre. Sa définition mathématique ne correspond pas exactement à la forme physique de la Terre, mais elle permet d'exprimer des coordonnées et de calculer des positions et des distances dans un référentiel unique et stable. Le référencement géométrique,

par rapport à l'ellipsoïde, permet de suivre l'élévation du niveau de la mer de manière globale, relativement au centre des masses de la Terre.

On définit le géoïde, quant à lui, comme étant une surface équipotentielle du champ de pesanteur qui coïncide le mieux avec le niveau moyen des océans au repos, à une époque de référence conventionnelle. La valeur correspondante du potentiel de pesanteur est notée W_0 . Par exemple, le W_0 choisi par l'Association internationale de géodésie est celui de la résolution de 2015, qui correspond à une estimation de la valeur du potentiel au niveau moyen des mers à l'époque 2010.0. Le référencement dynamique, par rapport au géoïde, permet de suivre les évolutions du relief océanique dues à la circulation générale, notamment aux courants côtiers. Dans la pratique, la détermination du géoïde est complexe car elle dépend de la répartition des masses dans l'océan, sur et à l'intérieur de la Terre. D'autre part, l'interface entre le géoïde terrestre réalisé par technique gravimétrique et le géoïde marin issu d'observations d'altimétrie spatiale, n'est pas bien maîtrisée et donc, le référencement dynamique ponctuel reste peu précis.

Pour améliorer le référencement dynamique des marégraphes, on peut s'appuyer sur un réseau de nivellement qui traduira directement les variations d'altitude entre les instruments et permettra d'accéder à un référencement dynamique commun. Notons tout de même que ce type de réseau est potentiellement attaché de biais liés aux techniques d'observation employées.

Le coût de mise en œuvre des techniques de nivellement direct traditionnel exclut d'emblée l'idée de procéder à un rattachement systématique des marégraphes entre eux, néanmoins, on peut s'appuyer sur des réseaux existants : en France métropolitaine continentale, le NGF/IGN69, réseau de référence altimétrique légal, est utilisé pour exprimer ces différences d'altitudes. Précisons qu'il s'agit bien ici de différences d'altitudes et pas de dénivelées observées : chaque marégraphe est rattaché localement à des repères dont l'altitude, issue d'une compensation globale des observations compatible avec l'estimation de différences de potentiel terrestre, est connue dans le système légal. Ce détail a toute son importance, car l'exactitude des altitudes ainsi obtenues dépend de la qualité du réseau compensé et pas de celle des dénivelées réellement observées. Or, nous savons aujourd'hui que le système légal français est entaché de biais, notamment un biais Nord-Sud d'une vingtaine de centimètres. Utiliser telles quelles les altitudes exprimées dans le système NGF/IGN69 conduirait ainsi à établir une dénivelée entre les marégraphes de Marseille et Dunkerque, donc une différence entre leurs niveaux des mers respectifs, erronée de plus de 20 cm. Le réseau de nivellement à vocation scientifique de l'IGN (le NIREF) peut permettre de répondre en partie à cette problématique, tout en nous interrogeant sur sa qualité et son évaluation.

Le NIREF, un réseau de nivellement de haute précision

Conscient des biais du réseau NGF/IGN69, depuis son établissement dans les années 70, l'IGN a entrepris en 1983, des mesures de nivellement de haute précision, reliant Marseille à Dunkerque¹. Réalisée intégralement en nivellement géométrique motorisé pour atténuer l'impact des phénomènes suspects de provoquer des erreurs systématiques (axe de visée plus haut, matériel plus lourd et plus stable, plus grande rapidité de mesure), à l'aide de niveaux optomécaniques Zeiss Ni-002 munis d'un compensateur à miroir réversible, cette opération a permis d'atteindre une précision qui n'a pas pu être surpassée par la suite, faute notamment de maintien des instruments disponibles en 1983. La reprise de traverses de précision comparable s'est effectuée de 2001 à aujourd'hui pour relier plusieurs points des côtes aux pays européens frontaliers (figure 1). Elle s'est appuyée sur des spécifications publiées en 1996 par l'ingénieur géographe en chef Henri Duquenne, avec des contraintes d'observations plus strictes que celles mises en œuvre pour le réseau traditionnel, mais des matériels différents de ceux utilisés en 1983. Ce réseau de nivellement de référence (dénommé aujourd'hui NIREF) est destiné à être utilisé dans de nombreux domaines comme la recherche sur les systèmes de référence verticaux, l'unification des systèmes de référence verticaux au niveau européen, l'étude de déformations de la croûte terrestre ou encore l'étude des variations du niveau de la mer. Ce réseau est composé de près de 12 000 dénivelées observées entre des points successifs, distants de quelques centaines de mètres au maximum. Ces dénivelées donnent une estimation des différences de potentiel terrestre via une valeur de gravité interpolée sur chacun des points dans le modèle de gravimétrie dense de l'IGN (voir encart).

Dans un contexte européen, l'IGN a poursuivi une démarche de densifica-

¹ Kasser, M. (1989). Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983. *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II*, 1989, pp. 695-700.

Figure 1. Itinéraires mesurés en NIREF (en bleu) et réseau de 1^{er} ordre du NGF/IGN69 (en magenta).

tion de ce réseau de haute précision, en réalisant une nouvelle compensation des données du nivellement de 1^{er} ordre du réseau NGF/IGN69² partiellement contraintes sur le NIREF afin d'obtenir un réseau densifié offrant le même ordre de grandeur de précision et d'exactitude que le NIREF.

La mise en œuvre du NIREF – considéré plus exact que le nivellement historique – a permis de confirmer l'existence d'une pente Nord-Sud entre NGF/IGN69 et la réalité physique (figure 2). Mises à part quelques anomalies locales, ces écarts croissent régulièrement avec la latitude,

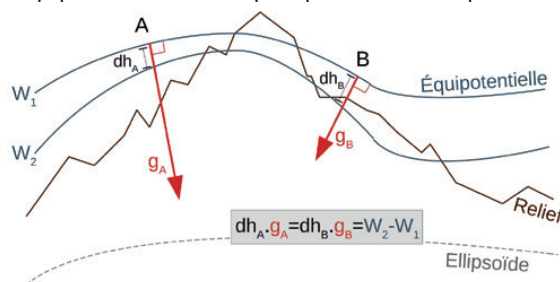
² Pour plus de précision sur le réseau de nivellement NGF/IGN69, voir : https://geodesie.ign.fr/index.php?page=reseaux_nivellement_francais

allant de 0 cm à Marseille (point de référence) à 18 cm à Dunkerque. NIREF confirme donc le supposé biais Nord-Sud du système NGF/IGN69 et donne une indication sur son amplitude.

Ces observations semblent par ailleurs confirmées par les observations des huit marégraphes rattachés à la fois au NGF/IGN69 et au NIREF. On peut comparer en ces points, trois références : deux références altimétriques (le NGF/IGN69 et le NIREF) et une référence maritime (on utilisera ici le niveau moyen NM). La définition du niveau moyen dépend de la série temporelle d'observation utilisée pour le calculer. Cette durée est variable selon les données marégraphiques diffusées par le Shom dans le

La pesanteur et le potentiel de pesanteur

La pesanteur est en tout point perpendiculaire à la surface d'un liquide au repos. Cette surface, sur laquelle le potentiel gravitationnel (W) est constant, est appelée surface équipotentielle. La différence de potentiel entre deux de ces surfaces, le long de la verticale s'écrit $dW = g \cdot dh$ où dh est la distance en mètres séparant les deux surfaces en un point et g la pesanteur en ce point. Cette relation ne dépend pas du lieu de la mesure. Il existe une infinité de surfaces équipotentielles dont les principales caractéristiques sont qu'elles ne sont pas parallèles et qu'elles ne s'entrecroisent pas. On note W_0 la valeur du potentiel sur la surface particulière correspondant à celle des "océans au repos", prolongée sous les continents.



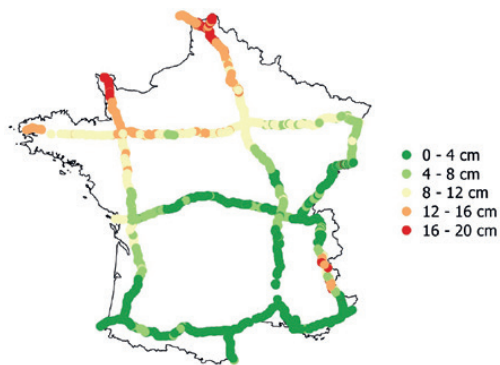


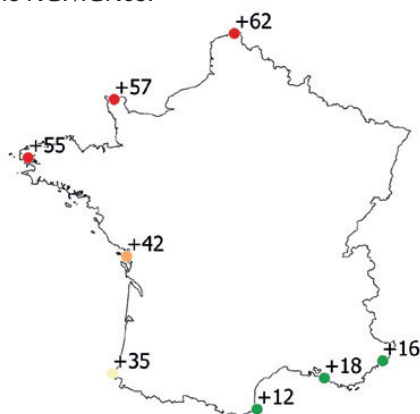
Figure 2. Écart entre altitudes NGF/IGN69 et altitudes NIREF en cm.



document des Références altimétriques maritimes (RAM) ; c'est pourquoi, dans un souci d'harmonisation, on utilisera ici un niveau moyen calculé à partir des données de 2000 à 2022, diffusées par le Système d'observation des eaux littorales (SONEL). Les écarts présentés en figure 3 expriment l'altitude de ce niveau moyen par rapport à la référence NGF/IGN69 ou par rapport au NIREF.

On note tout d'abord que la valeur de +18 cm à Marseille peut être lue comme la hausse du niveau moyen de la mer, à cet endroit, depuis la fin du XIX^e siècle, au moment de l'établissement de l'origine du système altimétrique NGF/IGN69, jusqu'à aujourd'hui. Le NIREF ayant par convention le même point d'origine que le réseau légal, on y retrouve le même écart.

Selon les données issues du NGF/IGN69, le niveau moyen océanique croît significativement avec la latitude, alors que, selon le NIREF, le niveau moyen océanique est plus constant sur la façade atlantique et le long des côtes de la Manche, ce qui semble plus cohérent, et confirme l'existence d'un biais dans le NGF/IGN69.



Enfin, NIREF permet également d'estimer une dénivelée d'une quinzaine de centimètres entre le niveau moyen de la Méditerranée et le niveau moyen océanique, comme l'ont déjà remarqué Johan Leclercq et Alain Coulomb³, ce qui est cohérent avec les différences observées par l'Ordre des géomètres-experts lors d'une campagne de mesures réalisée en 2016 à l'occasion du 70^e anniversaire de l'Ordre.

Effet des conventions de définition des altitudes

Avant d'aller plus loin, il convient de rappeler quelques conventions en matière de définition des altitudes. Une altitude exprime l'éloignement d'un objet par rapport à un niveau de référence, généralement un niveau moyen de la mer. De façon générale, l'altitude est donnée par (Heiskanen et Moritz, 1967) :

$$H_M = \frac{C_M}{\gamma^*} = \frac{-W_M + W_A}{\gamma^*}$$

où M est le point où on détermine l'altitude, A est un point de référence dont l'altitude est nulle par convention, par exemple un marégraphe, et γ^* est une fonction du seul point M qui a la dimension d'une accélération. Le choix de γ^* définit le type d'altitude. On distinguera ici plusieurs types d'altitudes : les altitudes dites usuelles (H_M) qui peuvent être des altitudes orthométriques ou des altitudes normales et la cote géopotentielle (C_M), à vocation plutôt scientifique.

3 XYZ n° 153, 4^e trimestre 2017, pp. 52-54

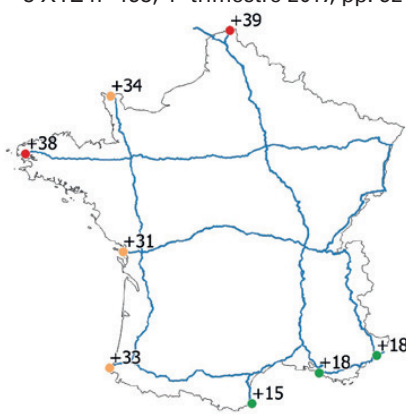


Figure 3. Altitudes du niveau moyen des mers sur la période 2000-2022 (cm), exprimées dans les systèmes NGF/IGN69 (à gauche) et NIREF (à droite).

Dès lors qu'on essaie de comparer entre elles des altitudes usuelles, on se heurte assez vite aux problématiques des différences d'origine et de définition de la grandeur γ^* , ces conventions étant notamment différentes d'un pays à l'autre.

En France métropolitaine, le système d'altitude en vigueur est un système d'altitudes dites "normales", c'est à dire pour lequel la grandeur γ^* est déterminée à partir d'un modèle de la pesanteur terrestre basé sur un ellipsoïde. Il utilise l'ellipsoïde de Hayford 1909 ainsi que le système de référence gravimétrique CFG65 et se réfère au niveau moyen de la mer à Marseille mesuré à la fin du XIX^e siècle comme point origine. La publication des altitudes NIREF est effectuée dans le même système. Une comparaison avec les valeurs des altitudes exprimées dans les systèmes internationaux (ellipsoïde GRS80 et référence gravimétrique IGSN71) montre que si les écarts sur les côtes sont quasiment nuls, il y a des différences de plusieurs dizaines de centimètres dans les secteurs montagneux.

Pour cette raison, nous utiliserons par la suite des cotes géopotentielles qui expriment directement la différence de potentiel par rapport au point de référence A. La cote géopotentielle en un point M est notée C_M et s'obtient lorsque $\gamma^*=1$. Cette altitude ne s'exprime pas en mètres, contrairement aux altitudes usuelles, mais en $m^2 s^{-2}$ ou en unités géopotentielles (UGP) telles que $1UGP=10SI=10m^2 s^{-2}=10^6 mGal.m$. À 2 % près, les valeurs des cotes géopotentielles en UGP sont assimilables à des valeurs d'altitude en mètres.

Le NIREF comme outil d'intercomparaison entre quelques marégraphes hexagonaux

Indépendamment de sa publication traditionnelle comme liste d'altitudes dans le système légal français NGF-IGN69, le NIREF est construit à partir d'observations de dénivelées qui, associées à des estimations de la pesanteur aux lieux de mesure, conduisent à des estimations de différences de potentiel de

pesanteur entre les points. Ces différences de potentiel sont compensées pour tenir compte des redondances des observations et conduisent ainsi à une estimation des cotes géopotentielles par rapport au point de référence des réseaux français.

Le **tableau 1** présente les cotes géopotentielles des niveaux moyens de la mer sur la période 2000-2022 des marégraphes métropolitains rattachés au NIREF.

On constate, comme nous l'avions fait sur les altitudes, que les bassins océaniques montrent des cotes assez homogènes. On constate également qu'il y a une différence de potentiel d'une quinzaine de centièmes d'UGP entre le niveau moyen de la Méditerranée et celui de la façade atlantique du territoire hexagonal, et d'une vingtaine de centièmes d'UGP entre la façade méditerranéenne et la Manche.

Évaluation de l'exactitude du NIREF

On pourrait s'en tenir à ces premiers résultats, pourtant, lorsqu'on cherche à étudier de manière fine la problématique des niveaux moyens des mers, il est indispensable de s'assurer de la qualité des sources de données utilisées et le nivellement ne déroge pas à la règle. Dans cette optique, l'IGN a entrepris une campagne de réobservation de la traverse NIREF reliant Marseille à Dunkerque entre 2012 et 2016. Or, les calculs qui en ont résulté montrent une variation Nord-Sud de 0,1 UGP (environ 10 cm) entre les deux itérations (**figure 4**). Cet écart croît fortement sur les 300 premiers kilomètres du tracé où les itinéraires suivis et les méthodes d'observation employées sont différents, ce qui remet en cause la

Bassin	Localisation	Cote en UGP
Méditerranée	Marseille	0,00
	Nice	0,00
	Port-Vendres	-0,03
Façade atlantique	Saint-Jean-de-Luz	0,14
	La Rochelle	0,13
	Brest	0,20
	Cherbourg	0,16
Manche	Dunkerque	0,21

Tableau 1. Différences de potentiel en UGP par rapport au marégraphe de Marseille.

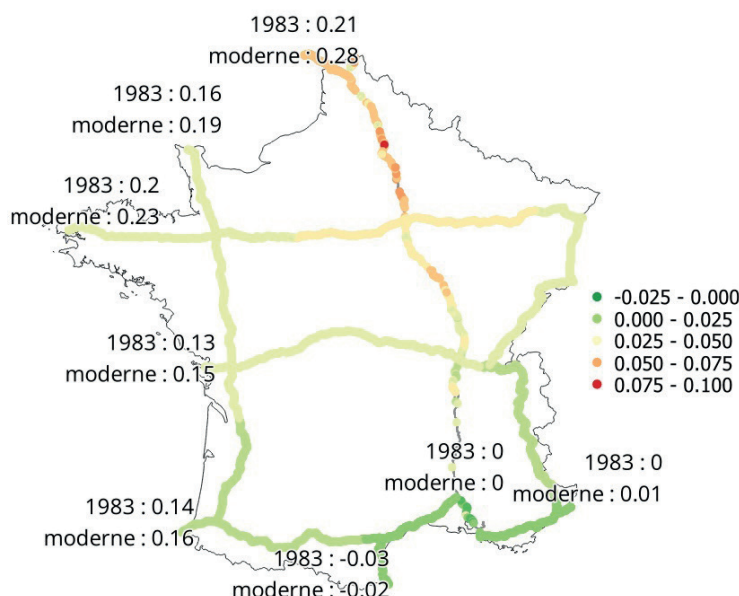


Figure 5. Écarts, en UGP, entre les cotes géopotentielles compensées selon que l'on calcule avec les observations de la traverse Marseille-Dunkerque de 1983 ou celles issues de sa réobservation moderne.

choix de certains modes opératoires. En outre, on constate que la différence de potentiel le long de la façade atlantique et du littoral de la Manche croît de façon plus importante si l'on tient compte des observations modernes, ce qui tendrait à penser que la traverse ancienne est plus exacte (**figure 5**).

Néanmoins, un certain nombre de points du NIREF ayant été également observés par des techniques GNSS, cela offre la possibilité d'étudier cette hypothèse en utilisant des modèles de potentiel de pesanteur globaux, ici le modèle mondial EGM2008 et le modèle européen EGG2015. Le tableau suivant présente des statistiques sur les écarts entre les valeurs de potentiel, en UGP, déduites des différentes solutions NIREF par rapport aux modèles globaux. Deux solutions de NIREF sont évaluées : l'une excluant la reprise moderne : solution 1983, et l'autre excluant la

mesure ancienne : solution moderne (**tableau 2**). S'il est impossible d'estimer un biais entre NIREF et modèle de champs globaux puisqu'on ne connaît pas précisément le potentiel du point de référence du NIREF, on peut tout de même s'appuyer sur ces éléments pour évaluer la qualité des différences de potentiel du réseau NIREF au regard de ces modèles.

On constate, en effet, que le NIREF est plutôt cohérent avec les modèles globaux comme le montrent les écarts, toujours inférieurs au décimètre, avec un écart-type de l'ordre de 3 cm. Cette dispersion de quelques centimètres s'explique par ailleurs, pour partie par la qualité des observations GNSS, par une temporalité différente entre la mesure de nivellement et la mesure GNSS et par la qualité des modèles globaux eux-mêmes, qui peut être décimétrique dans les zones de montagne.

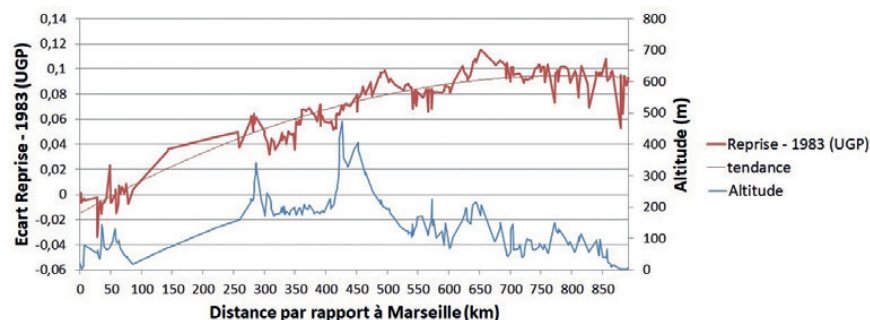


Figure 4. Écart entre les deux observations de la traverse reliant Marseille à Dunkerque (en rouge ; les altitudes le long du parcours sont représentées en bleu).

	Sol. moderne - sol. 1983	Sol. 1983 - EGG15	Sol. 1983 - EGM08	Sol. moderne - EGG2015	Sol. moderne - EGM08
Min recentré	-0,021	-0,057	-0,041	-0,054	-0,055
Max recentré	0,018	0,070	0,088	0,077	0,073
Écart-type	0,009	0,033	0,032	0,029	0,030

Tableau 2. Évaluations des solutions de NIREF.



Dans le détail, si les deux observations de la traverse entre Marseille et Dunkerque n'ont pas une grande influence sur les écarts avec les modèles en fonction de la longitude, elles influent de façon notable sur les écarts en fonction de la latitude. De manière générale, on constate en effet une meilleure cohérence, en fonction de la latitude, du réseau compensé à partir des observations modernes plutôt qu'à partir des observations de 1983, tant par rapport à EGM2008 que par rapport à EGG2015 (figure 6). La solution moderne du NIREF montre en effet une pente plus faible par rapport aux modèles globaux que la solution 1983. Ces indications tendent à mettre en avant une meilleure exactitude des observations modernes au regard des modèles et ce, en dépit des écarts plus importants constatés au niveau des marégraphes. Elles doivent cependant être prises avec précaution dans la mesure où les modèles globaux qui servent ici de référence exploitent des valeurs d'altitude et peuvent hériter d'une partie de leurs biais.

Ces observations montrent d'autre part, qu'il est possible qu'il subsiste une pente dans le NIREF, de l'ordre de 7 mm par

degré, soit une erreur résiduelle d'environ 3 cm entre Marseille et Dunkerque. Une analyse similaire en cours de réalisation sur le réseau NIREF complet, densifié par les observations de 1^{er} ordre du réseau NGF/IGN69, tend à confirmer cette relative cohérence du NIREF par rapport à EGG2015, d'une part et à EGM2008, d'autre part.

Enfin, partant de ces premières analyses, l'IGN travaille actuellement à l'acquisition de mesures GNSS complémentaires sur le réseau NIREF afin de conforter ces conclusions et d'offrir, à terme, une meilleure maîtrise de sa qualité.

Conclusion

La France s'est dotée d'un réseau de nivellement de grande précision, le réseau NIREF, qui a permis de mettre en évidence des biais importants dans le système de référence légal NGF/IGN69 et qui contribue à la construction d'une référence européenne de qualité.

Le réseau NIREF met en évidence des différences de cotes géopotentielles d'ordre de grandeur décimétrique

entre les niveaux moyens des bassins océaniques, par exemple une quinzaine de centimètres entre Méditerranée et façade atlantique. Néanmoins, ces résultats sont à considérer avec prudence car, malgré des spécifications d'observation exigeantes, il subsiste une incertitude de quelques centimètres sur ce réseau réalisé au fil de plusieurs décennies. Cette incertitude, dont l'impact est davantage visible en fonction de la latitude, est, aujourd'hui encore, mal maîtrisée et découle tant de variations gravimétriques locales imparfaitement modélisées, que des modes opératoires variés mis en œuvre par l'IGN au fil du temps. Ceci étant, cette incertitude reste du même ordre de grandeur que celle des modèles de potentiel de pesanteur globaux, notamment européens : EGG2015 étant par exemple évalué à 3 cm d'écart-type sur l'ensemble du continent.

C'est dans ce contexte que l'IGN travaille sur des améliorations (évaluation des biais, combinaison d'observations comme cela est réalisé dans le cadre du projet SONEL) pour faire progresser à la fois la qualité de la référence européenne et la cohérence terre-mer des références géodésiques. ●

CONTACTS

Sylvain LAVOUÉ, IGN, sylvain.lavoue@ign.fr
Olivier JAMET, IGN, olivier.jamet@ign.fr

ABSTRACT

The French National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) implements a high-precision leveling network called NIREF, connecting various tide gauges along the French continental coasts and contributing to the European vertical reference. This network, while highlighting biases in the legal altitude reference system NGF/IGN69, also provides the opportunity to determine potential differences between these tide gauges and decimetric elevation differences between the mean levels of ocean basins. Nevertheless, an evaluation of this comparison tool with respect to global gravity potential models suggests that it seems to be a few centimeters residual error in NIREF. IGN is currently working at a better assessment of this residual error.

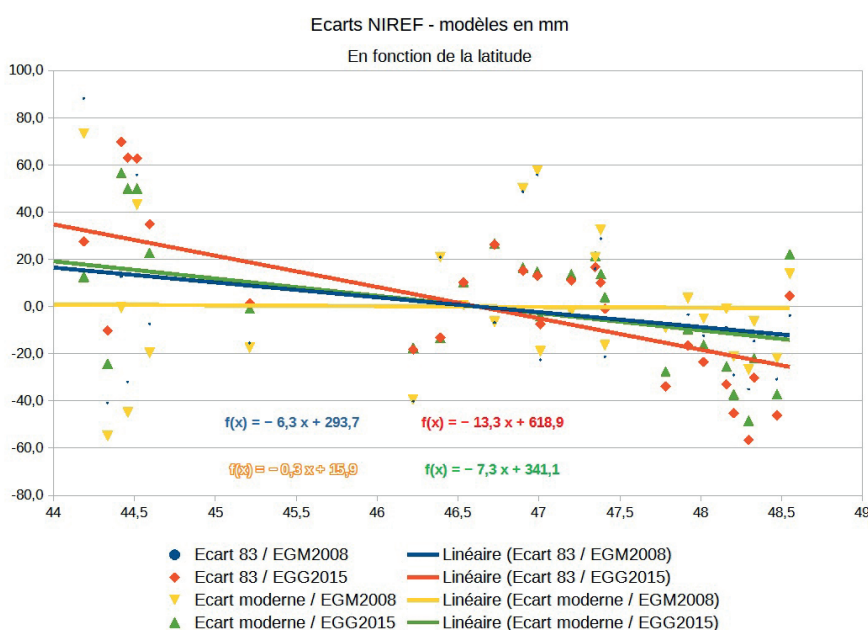


Figure 6. Écarts entre NIREF 1983 et NIREF moderne par rapport aux modèles globaux EGM2008 et EGG2015, en mm, en fonction de la latitude.