

Altimétrie de précision autour du détroit d'Ormuz

Détermination d'un géoïde gravimétrique, d'altitudes orthométriques précises et de la variation du niveau moyen de la mer

Jean-Louis CARME - Benjamin WEYER - Hamza MAZIH

Bayanat et Fugro ont récemment réalisé les travaux de modernisation de l'infrastructure géodésique et hydrographique de l'Émirat de Charjah aux Émirats Arabes Unis, qui ont conduit à une redéfinition de l'ensemble des référentiels en vigueur. Ce projet a eu ceci d'exceptionnel qu'il a intégré, s'agissant du terrain, des mesures de GNSS géodésique, nivellement de précision, observations marégraphiques, gravimétrie absolue et relative, puis au bureau, les calculs des réseaux géodésique et de nivellement, des niveaux hydrographiques de référence, et enfin d'un modèle de géoïde gravimétrique et de sa déclinaison hybride. Ainsi, le projet nous a donné l'opportunité de déterminer les différentes formes d'altitudes, depuis les niveaux moyens de la mer (MSL, Mean Sea Levels) ou les plus basses mers astronomiques (LAT, Lowest Astronomic Tides) jusqu'aux altitudes orthométriques rigoureuses, en passant par les hauteurs ellipsoïdales, les cotes géopotentielle, les altitudes issues du seul nivellement géométrique, et les ondulations géoïdales. Comme ces travaux ont été effectués de bout en bout selon les règles de l'art et en utilisant les dernières méthodologies de calcul disponibles – notamment la prise en compte des variations latérales de densité des masses topographiques pour le calcul de géoïde, ou l'application des corrections de topographie, de densité ou de géoïde pour le calcul des altitudes orthométriques – le projet a également permis de répondre à la question de la variation du niveau moyen de la mer (MSL) de part et d'autre du détroit d'Ormuz, ou plus exactement le long du golfe Arabo-Persique et du golfe d'Oman ainsi qu'entre ces deux golfes, variation toujours incertaine en raison du manque de fiabilité de l'altimétrie par satellite dans les zones littorales.

GNSS, GGM, géoïde et topographie de la surface de la mer

Avec l'avènement puis la généralisation du GNSS en tant que technique de levé géodésique et topographique,

les hauteurs ellipsoïdales issues de mesures GNSS doivent toujours être transformées en altitudes orthométriques (ou en altitudes normales) en utilisant les ondulations du géoïde (ou les anomalies d'altitude du quasi-

MOTS-CLÉS

Géoïde, altitudes orthométriques, hydrographie, topographie de la surface de la mer, GNSS géodésique, nivellement, gravimétrie, détroit d'Ormuz

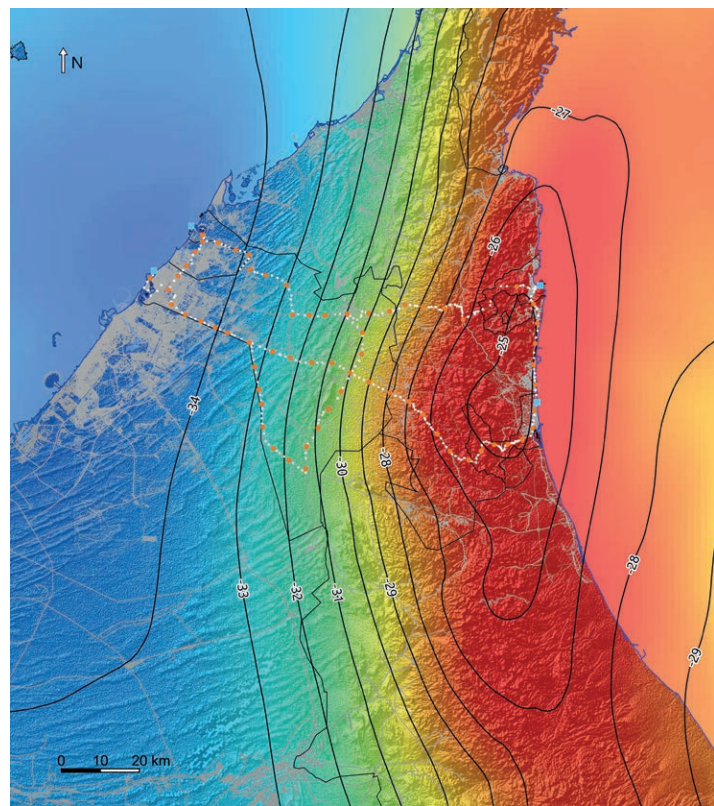


Figure 1. Modèle de géoïde gravimétrique hybride local de l'Émirat de Charjah.

géoïde), mais qui ne sont connues avec précision que dans un certain nombre de pays développés. En dehors de ces pays, les géomètres topographes s'appuient sur des modèles de gravité globaux (GGM, *Global Gravity field Model*) mais qui sont imprécis à petite et moyenne longueur d'onde dans de nombreuses régions. Pour les applications exigeantes en termes de précision altimétrique (infrastructures linéaires, ouvrages et réseaux hydrauliques, études de zones inondables, érosion côtière, etc.), un GGM ne suffit

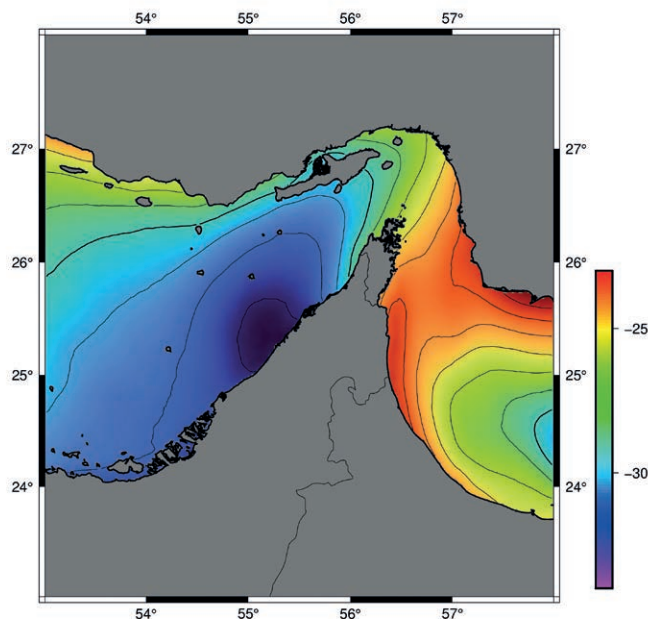


Figure 2. Surface moyenne de la mer DTU18 MSS (*Mean Sea Surface*) dans la zone d'étude, valeurs en m.

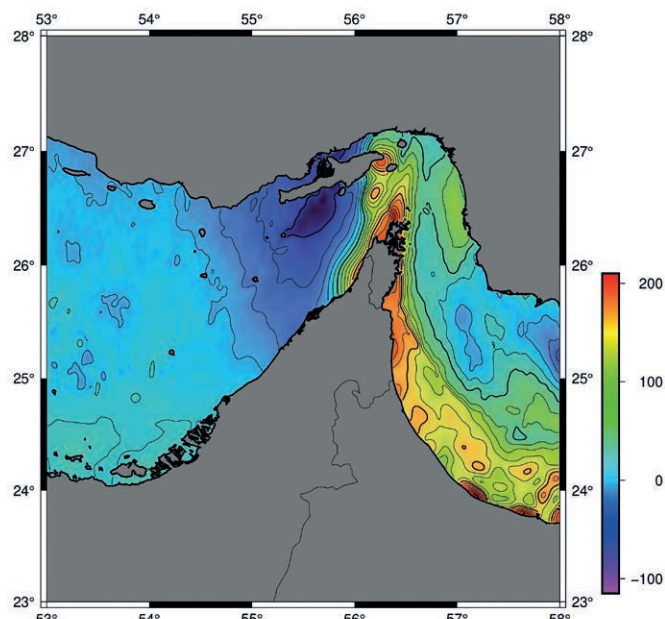


Figure 3. Champ de gravité dérivé d'altimétrie satellitaire dans la zone d'étude, valeurs en mGal.

pas et des modèles de géoïdes gravimétriques hybrides, issus de modèles de géoïdes gravimétriques locaux et de repères GNSS nivelés (ou plus exactement, de repères de nivellement connus en hauteurs orthométriques rigoureuses – au sens de Tenzer et al. 2005 – et hauteurs ellipsoïdales précises), sont nécessaires.

Près de la côte, la topographie de la surface de la mer (TSS, *Topography of the Sea Surface*) est calculée au moyen du géoïde et des observations de marégraphes. Au large (haute mer), son équivalent est la topographie dynamique moyenne de l'océan (MDT, *Mean Dynamic Ocean Topography*), calculée à l'aide de la surface moyenne de la mer (MSS, *Mean Sea Surface*, mesurée principalement à partir d'altimétrie par satellite) qui intègre les variations du géoïde et les variations météocean.

Alors que la MDT /TSS est réputée peu fiable à proximité du littoral du fait des perturbations de la surface de la mer qui y réduisent la précision de l'altimétrie satellitaire (eau peu profonde), il est toujours très intéressant de comparer les MDT globales récentes avec une TSS issue de mesures in situ du MSL au moyen de marégraphes, et d'un géoïde local déterminé à partir de mesures in situ au moyen de nivellement, gravimétrie terrestre et gravimétrie aérienne

réalisée en mer dans une bande côtière de largeur appropriée.

Ici, une telle comparaison avait d'autant plus de sens que les MSS récentes montrent toutes bien les fortes variations de la surface de la mer au-dessus de l'ellipsoïde (Figure 2), une grande variabilité des anomalies de gravité à l'air libre issue d'altimétrie satellitaire (Figure 3), et des erreurs associées à ces anomalies significatives, atteignant 12 mGal à 15 km de la côte et plus de 20 mGal à proximité du rivage et que les variations météocean (principalement dues aux courants et aux vents) demeurent toujours incertaines en l'absence de mesures correspondantes in situ.

Coordonnées planimétriques et hauteurs ellipsoïdales

Dans le cadre de ce projet, Bayanat et Fugro ont réétabli les référentiels géodésique, altimétrique, gravimétrique et hydrographique et déterminé leur réalisation sur le territoire de l'Émirat de Charjah, qui se caractérise par la présence de deux côtes et d'une chaîne de montagne entre les deux.

L'infrastructure géodésique comprend 31 points géodésiques de référence, dont 23 bornes de premier ordre venant en complément de 8 Stations GNSS Permanentes (SGP) actives. Leurs coord-

onnées précises, incluant positions et hauteurs ellipsoïdales, ont été établies à l'aide de GNSS géodésique. Ce levé précis a été étendu aux 67 repères de nivellement de premier ordre.

Dix-sept jours d'observations GNSS des SGP ont été utilisés. Le rattachement géodésique à l'ITRF a été assuré en intégrant à ce réseau 30 SGP du réseau régional IGS (Figure 4). Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel Gamit-Globk v10.7 (MIT) et contrôlé à l'aide du logiciel Bernese v5.2 (AIUB), ce qui a permis d'estimer des incertitudes de 2 mm sur les coordonnées Est et Nord et de 5 mm en hauteur ellipsoïdale.

Le réseau de premier ordre (Figure 5) a été observé selon les règles de l'art. La compensation finale par moindres carrés, effectuée avec Geolab v2017



Figure 4. Stations IGS utilisées pour le rattachement du réseau géodésique à l'ITRF.

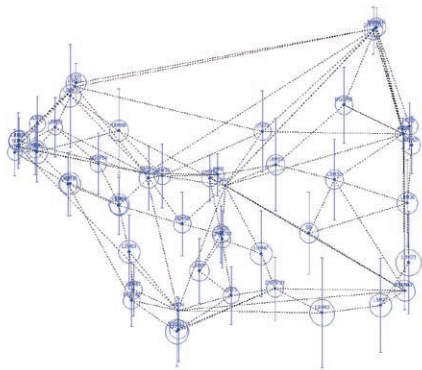


Figure 5. Réseau de 1^{er} ordre et sous-réseau de nivellement (gauche) et réseau de SGP (droite).



Trois stations de gravimétrie absolue (sessions de 24 heures) ont été établies pour permettre le référencement du réseau de gravimétrie relative à l'IGSN71, sa mise à l'échelle, et la limitation de la propagation des erreurs. Le traitement a été effectué par l'Université de Montpellier avec le logiciel Micro-g Lacoste g9. Les données ont été corrigées du mouvement des pôles, des marées terrestres, des surcharges océaniques et de la pression atmosphérique. Le calcul a fourni des valeurs de gravité précises à 4 μ Gal.

Les mesures de gravité relative ont été réduites en prenant en compte les constantes de calibration des gravimètres, les marées terrestres, les surcharges océaniques et atmosphériques, la dérive des gravimètres (inversion par moindres carrés), la gravité normale sur l'ellipsoïde de référence et la correction à l'air libre calculée au deuxième ordre, conformément aux règles de l'art en géodésie.

La compensation finale par moindres carrés du réseau a été contrainte sur les 3 points de gravimétrie absolue, fournissant des incertitudes des points du canevas gravimétrique de 32 μ Gal en moyenne, donc très satisfaisantes. La vérification du comportement harmonique des différents jeux de données utilisés au moyen d'un calcul de prolongement vers le bas par moindres carrés (LSDWNC : *Least Square Downward Continuation*) a permis de vérifier l'absence de points hors tolérance. Cet algorithme incorpore les lois d'harmonie gravitationnelle (intégrale de Poisson) permettant de générer une

(Bitwise) a été contrainte sur les coordonnées précises des SGP, fournissant des incertitudes de 5 mm en coordonnées Est et Nord et 13 mm en hauteur ellipsoïdale.

La transformation depuis le référentiel ITRF2014 à l'époque moyenne des mesures vers l'ITRF2000 à l'époque de référence aux Émirats Arabes (2000.0) a été effectuée en utilisant les paramètres de transformations publiés par l'IIERS ainsi que les deux modèles de mouvement de plaques tectoniques ITRF2014 et GEODVEL (MORVEL56 a été également testé mais n'a finalement pas été retenu).

Grille gravimétrique absolue et relative

Pour pouvoir calculer le géoïde, un canevas de points gravimétriques a été mesuré suivant un maillage régulier d'espacement 2 km dans l'Émirat

de Charjah et 5 km dans les émirats environnants, afin de compléter la base de données gravimétrique existante (données publiques ou confidentielles), issue de campagnes de gravimétrie terrestre, gravimétrie aéroportée côtière et gravimétrie marine. Les 67 repères de nivellement ont également été observés. Les mesures ont été effectuées selon les règles de l'art de la microgravimétrie : étalonnage sur une ligne de base de dénivelé 1500 m, maintien des instruments en position verticale lors des trajets, utilisation de paravents et pare-soleils, hauteurs déterminées simultanément par GNSS géodésique sur un support commun, boucles quotidiennes avec réoccupation intermédiaire d'une durée totale inférieure à 8 heures, sessions de 6 à 18 cycles sur chaque point en fonction de l'état de relaxation du ressort, réoccupation de 12 % des points, réseau constitué de polygones fermés et compensé par moindres carrés (Figure 6).



Figure 6. Levé de gravimétrie absolue et relative. À gauche : Gravimètre absolu FG5. Au centre : mesures CG6 du gradient vertical de gravité. À droite : GNSS et gravimétrie relative CG5 combinés.



grille d'anomalies de gravité à partir de données dispersées au sens des équations de géodésie physique.

Niveaux hydrographiques de référence

L'observation du niveau moyen de la mer (MSL) permet de suivre l'évolution de sa dynamique, y compris sa thermodynamique. La variabilité du MSL traduit en grande partie l'effet des échanges entre l'océan et l'atmosphère, ainsi que la circulation océanique globale. La détermination précise de la topographie dynamique (MDT), définie comme la différence entre le MSL et le géoïde, permet de calculer le gradient horizontal du MSL, c'est-à-dire la circulation océanique en surface, en particulier les courants géostrophiques. Des marégraphes radars enregistrant les variations du niveau de la mer ont été installés dans quatre ports maritimes de l'Émirat de Charjah, situés le long du golfe Arabo-Persique (Khalid Port et Al Hamriyyah) et du golfe d'Oman (Khor Fakkan et Kalba port), donc de part et d'autre du détroit d'Ormuz.

Les séries temporelles des variations du niveau de la mer couvrant une période de deux années ont été lissées au moyen d'un filtre passe-bas, afin de s'affranchir des variations à haute fréquence. Les données filtrées ont ensuite fait l'objet d'une analyse harmonique, qui consiste à représenter le signal de marée comme la somme d'une série finie de fonctions harmoniques. Chaque composante est modélisée par un signal sinusoïdal caractérisé par une amplitude, une vitesse angulaire et un déphasage par

rapport au méridien de Greenwich. On peut ainsi écrire :

$$h(t) = Z_0 + \sum H_n \cos(\sigma_n \cdot t - g_n) \quad (1)$$

où $h(t)$ est la hauteur de la marée à un instant t , Z_0 est le niveau moyen de mer, autour duquel oscille le niveau d'eau, H_n est l'amplitude de la composante harmonique, σ_n est la fréquence de la composante harmonique, et g_n est le déphasage. Une correction nodale a été appliquée par la suite.

Pour chaque port (observatoire de marée), cette analyse harmonique des séries temporelles, réalisée au moyen d'un ajustement par moindres carrés, a permis d'obtenir les caractéristiques des 37 ondes principales qui composent le spectre de la marée, et qui permettent de prédire le signal de marée avec précision d'ordre centimétrique d'après l'Agence nationale américaine d'observation océanique et atmosphérique (*NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 2007*). Le niveau moyen de la mer est défini comme étant égal à la composante constante Z_0 de la fonction de hauteur de marée après ajustement par moindres carrés.

Pour les quatre ports, l'amplitude et la phase de chacune des 37 composantes harmoniques ont été calculées à partir des deux ans d'observations de niveau de la mer, et des corrections nodales ont été appliquées pour tenir compte des irrégularités induites par les mouvements de l'orbite lunaire. Le choix de la méthode d'ajustement par moindres carrés (par opposition à une analyse fréquentielle) a été motivé par la durée relativement courte des observations,

ce qui a permis de réduire l'impact des effets météorologiques sur les résultats. L'erreur moyenne quadratique de l'ajustement par moindres carrés a varié de 3.7 à 6.5 cm selon les marégraphes.

Des prédictions de marée ont été réalisées en utilisant l'ensemble des composantes harmoniques (amplitude et phase) résultant de l'analyse. La marée prédite qui correspond à un signal théorique a ensuite été comparée à la marée réellement mesurée (*Figure 7*), et leur différence a permis de mesurer le signal résiduel d'origine météocean (principalement les effets du vent et de la pression atmosphérique).

Pour contrôler la robustesse des 8 principales constantes harmoniques (M2, S2, N2, K2, O1, K1, P1, Q1), les ondes de marée ont été recalculées à partir de sous-séries temporelles glissantes de 3 et 6 mois extraites de l'ensemble des données. L'analyse statistique de la variation de ces composantes a permis un contrôle en première approximation de ces ondes qui représentent 90 % du signal de marée, les anomalies cycliques mises en évidence n'ayant concerné qu'une fraction des échantillons.

Finalement, pour les quatre marégraphes, l'étude statistique des différences entre les marées prédites et les observations du niveau de la mer a montré que l'heure de la plus basse mer astronomique sur la période de mesures coïncidait très bien (à 2 minutes près pour Khor Fakkan et jusqu'à 48 minutes près pour Khalid, donc moins d'une heure pour les 4 ports), ce qui a permis de valider l'analyse harmonique réalisée. L'analyse de la variation de ces

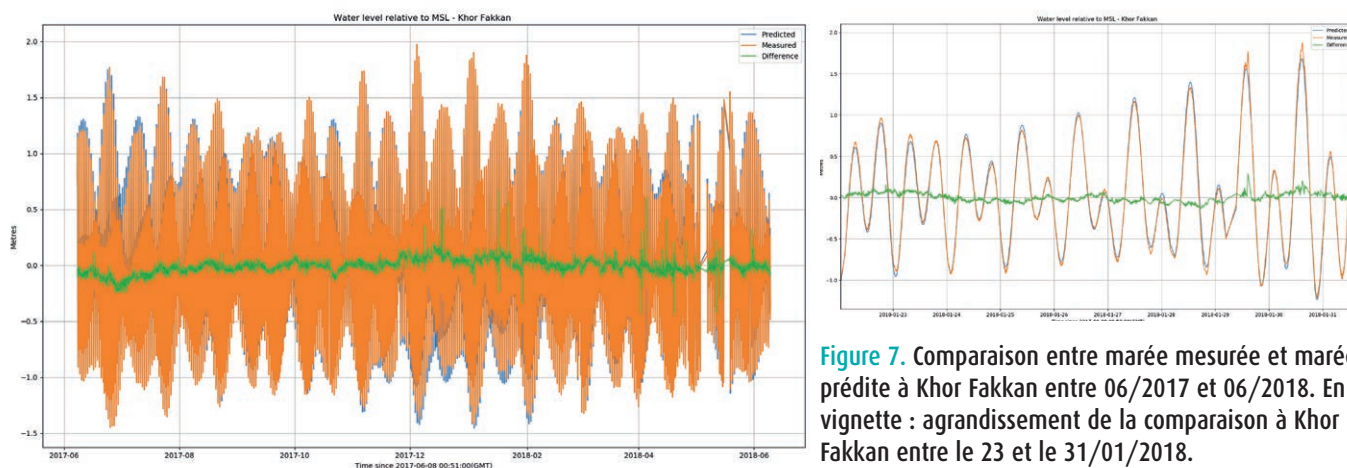


Figure 7. Comparaison entre marée mesurée et marée prédite à Khor Fakkan entre 06/2017 et 06/2018. En vignette : agrandissement de la comparaison à Khor Fakkan entre le 23 et le 31/01/2018.

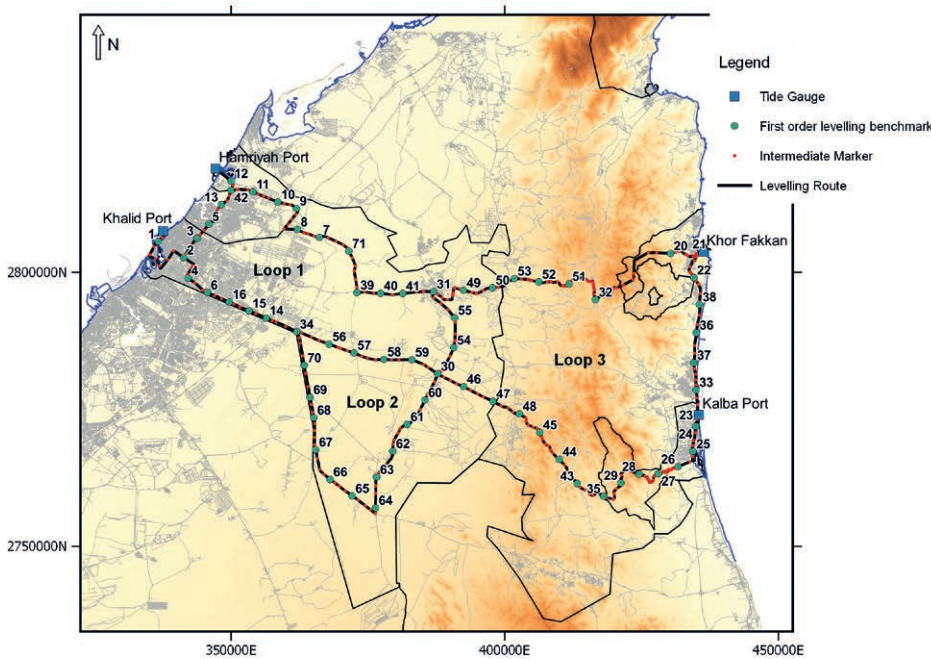


Figure 8. Nouveau réseau de nivellement de l'Émirat de Charjah.

composantes a permis d'estimer la précision du niveau moyen de la mer et du niveau des plus basses mers astronomiques calculés entre 2 et 4 cm selon les marégraphes.

Le MSL au port de Al Hamriyyah a été défini comme zéro du référentiel altimétrique de l'Émirat.

Nivellement géométrique

Un réseau de nivellement de premier ordre de 400 km constitué de 67 repères de nivellement uniformément répartis le long de 3 boucles principales a été observé en cheminement aller et retour (soit 800 km parcourus au total) et constitue la réalisation du nouveau référentiel vertical (Figure 8).

Les mesures ont été effectuées selon les règles de l'art (utilisation de niveaux numériques de précision et mires invar codées, contrôle des niveaux et des mires ainsi que de leur non-dilatation, distance maximale des portées, équivalence des portées avant et arrière, limitation de la section de mire utilisée, cheminements retour à des date et heure différentes, fermetures temporaires sur deux repères). En outre, des observations gravimétriques ont été effectuées à chaque repère de nivellement.

Les trois fermetures de boucles se sont retrouvées comprises dans la fourchette

$1 - 3\text{mm}\sqrt{L_{km}}$ (10, 24 et 42 mm pour des longueurs de boucles de L_{km} 102, 145 et 187 km) tandis que les différences entre les cheminements allers et retours étaient de 4.3, 4.9 et 8.9 mm.

Altitudes orthométriques rigoureuses

Comme les surfaces équipotentielles du champ de pesanteur ne sont pas parallèles, les dénivelés mesurés par nivellement géométrique dépendent du chemin suivi. Ces dénivelés doivent donc être corrigés pour tenir compte des variations de la gravité le long des cheminements et permettre de déterminer des altitudes orthométriques rigoureuses (au sens de Tenzer et al. 2005). En effet, le recours à tout autre type d'altitudes n'aurait pas permis d'évaluer précisément la qualité du géoïde gravimétrique calculé. Ainsi, les altitudes normales ne sont pas référencées au géoïde mais au quasi-géoïde qui n'est pas une surface équipotentielle, et même si elles dérivent bien des cotes géopotentielle, elles sont en quelque sorte mises à l'échelle au moyen du champ de pesanteur normal et non pas réel. Les altitudes dites normales-orthométriques correspondent à des formulations différentes selon les pays, mais dans tous les cas elles dérivent du champ de pesanteur

normal et non pas réel ; en outre, elles ne sont référencées ni au géoïde ni au quasi-géoïde. Les cotes géopotentielle (exprimées en m^2s^{-2}) ne sont pas homogènes à des altitudes. Quant aux altitudes dynamiques, comme elles sont directement liées aux cotes géopotentielle et que les surfaces équipotentielles convergent vers les pôles, elles n'ont aucune signification géométrique. Les altitudes orthométriques de Helmert constituent certainement une solution utilisable en première approximation, mais insuffisante dès lors qu'il s'agit d'évaluer un géoïde précis à 2 ou 3 cm près.

La détermination des altitudes orthométriques rigoureuses des repères de nivellement réalisant le référentiel vertical de l'Émirat de Charjah a été effectuée au moyen des logiciels GeoHeight (Fugro France) et RigOrth (Université de New Brunswick, UNB) en deux étapes :

• Compensation du réseau de nivellement en cotes géopotentielle et détermination des altitudes orthométriques de Helmert

Les dénivelés ΔH déterminés par nivellement géométrique ont été combinées aux mesures de gravité (g) effectuées sur chaque repère de nivellement pour calculer les différences de cotes géopotentielle ΔC :

$$\Delta C = \frac{g_1 + g_2}{2} \Delta H \quad (2)$$

Les différences de cotes géopotentielle ont été compensées par moindres carrés, puis les cotes géopotentielle compensées ont été converties en altitudes orthométriques de Helmert en utilisant l'approximation de la gravité moyenne le long de la verticale issue de la réduction de Poincaré-Prey :

$$H_{Helmert} = \frac{C}{\bar{g}^H} \quad (3)$$

$$\text{avec } \bar{g}^H = g - \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \gamma}{\delta h} + 4\pi G \rho \right) H \quad (4)$$

Les différences entre les altitudes orthométriques de Helmert ainsi obtenues et les altitudes calculées en utilisant uniquement les observations de nivellement géométrique varient de quelques millimètres à plusieurs centimètres selon les zones (quelques dixièmes de mm à quelques mm par section), atteignant **7.1 cm** à leur maxi-



mum ; ces corrections sont donc très significatives.

• Détermination des corrections orthométriques rigoureuses

Les altitudes orthométriques de Helmert sont biaisées du fait de l'approximation effectuée lors de la détermination de la moyenne de la pesanteur réelle sur l'arc de la ligne de force reliant le géoïde au point de mesure. D'après Santos et al. (2006), celle-ci peut être décomposée comme suit :

$$\bar{g} \approx \bar{\gamma} + \overline{\delta g}^{NT} + \bar{g}_B^T + \bar{g}_R^T + \bar{g}^{\delta\rho} \quad (5)$$

où $\bar{\gamma}$, $\overline{\delta g}^{NT}$, \bar{g}_B^T et \bar{g}_R^T , et $\bar{g}^{\delta\rho}$ sont les valeurs moyennes le long de la ligne de force entre le géoïde et le point de mesure, respectivement, de la gravité normale, de l'effet de la perturbation moyenne à grande longueur d'onde (dit de géoïde ou "No Topography"), des effets de terrain (plateau de Bouguer et terrain résiduel), et de l'effet de densité.

La gravité mesurée peut être décomposée de la même façon :

$$g = \gamma + \delta g^{NT} + \delta g_B^T + \delta g_R^T + \delta g^{\delta\rho} \quad (6)$$

En reportant (6) dans (4) et en introduisant \bar{g}^H dans (5), l'expression de la pesanteur réelle peut s'écrire comme la somme de l'approximation de Helmert de la pesanteur moyenne et de termes correctifs dont la formulation analytique peut être trouvée dans Santos et al. (2006) :

$$\bar{g} \approx \bar{g}^H + c_\gamma + c_{\delta g^{NT}} + c_{\delta g_B^T} + c_{\delta g_R^T} + c_{\delta g^{\delta\rho}} \quad (7)$$

et $c_{\delta g_B^T}$ (corrections de pesanteur normale et de Bouguer) se calculent simplement, de sorte que le calcul des altitudes orthométriques rigoureuses consiste principalement à évaluer les termes correctifs $c_{\delta g_R^T}$ et $c_{\delta g^{\delta\rho}}$, et $c_{\delta g^{NT}}$, correspondant respectivement à l'effet du terrain résiduel (variations environnantes de la topographie), l'effet des variations latérales de densité des masses topographiques, et l'effet de la perturbation de gravité générée par le géoïde à plus grande longueur d'onde. Ces corrections sont calculées à l'aide de modèles numériques de

terrain et d'un modèle global de variation latérale de densité dérivé de la carte lithologique.

Sur la zone d'étude, la somme de ces corrections (terrain, densité et géoïde) est comprise entre 0.0 et 1.5 cm, qui s'ajoute donc aux corrections de Helmert précédemment décrites, **ce qui est loin d'être négligeable compte tenu de la précision requise** pour évaluer puis adapter le géoïde gravimétrique pour obtenir un géoïde gravimétrique hybride, notamment dans la chaîne de montagne d'Al Hajar, ou rattacher entre eux avec précision les quatre marégraphes pour pouvoir déterminer les différences du niveau moyen de la mer le long des côtes de l'Émirat et a fortiori entre le golfe Arabo-Persique et le golfe d'Oman.

Notons que les corrections orthométriques de Helmert, de terrain, de densité et de géoïde augmentent avec l'altitude et qu'elles ont été calculées ici pour des points dont l'altitude reste relativement faible (jusqu'à 470 m, avec des sommets avoisinants culminant jusqu'à 1100 m). Ces corrections seraient encore plus significatives pour des repères de nivellement situés sur des hauts plateaux ou chaînes de montagnes.

Géoïde gravimétrique

Le modèle de géoïde local a été calculé en appliquant la méthode de Stokes-Helmert augmentée, implémentée à travers la suite logicielle SHGeo 2019 développée par UNB et Fugro. Le détail des principales étapes de calcul est décrit dans Ellmann, A. et P. Vaniček (2007). Deux approches sont utilisables pour le calcul.

La variante "2-Space" (ou "espace de Helmert") convertit les anomalies à l'air libre en anomalies dites de Helmert en condensant l'effet des masses topographiques en une couche d'épaisseur infinitésimale sur le géoïde, réduisant l'effet des masses topographiques sur le géoïde de plusieurs ordres de grandeur (suppression des effets topographiques de Helmert et addition des effets topographiques condensés). C'est seulement dans un espace de ce type que l'inté-

gration de Stokes est valide d'un point de vue mathématique et physique ; en effet, le géoïde ne peut pas être calculé de manière harmonique s'il persiste une quelconque topographie.

La variante "3-Space" (ou espace "No-Topography", Yang, 2005) convertit les anomalies à l'air libre en anomalies dites No-Topography (suppression des effets topographiques de Helmert). Dans ce cas, les effets liés aux masses topographiques sont supprimés donnant un champ de gravité plus lisse (de plus grande longueur d'onde), réduisant les erreurs lors des itérations de la prolongation vers le bas par moindres carrés (LSDWNC) – jusqu'au niveau du géoïde – des anomalies. Les courtes longueurs d'ondes sont réintroduites par l'ajout des effets topographiques condensés après application de la LSDWNC. Du fait de la présence d'une chaîne de montagne, c'est cette approche qui a été préférée pour le calcul du modèle de géoïde gravimétrique de l'Émirat de Charjah, la première méthode n'ayant été appliquée qu'à fin de contrôle de qualité.

Les principales étapes de calcul peuvent se résumer avec la séquence suivante :

- conversion des anomalies à l'air libre en anomalies No-Topography (NT) ;
- interpolation des anomalies NT en grille régulière ayant une résolution d'une minute ; l'interpolation est pondérée par la distance et par la précision des mesures gravimétriques ;
- prolongement vers le bas par moindres carrés (LSDWNC) : les anomalies NT en grille sont prolongées jusqu'au niveau du géoïde par inversion de l'intégrale de Poisson ; un rayon d'intégration d'un degré a été utilisé ;
- conversion des anomalies NT sur le géoïde en anomalies de Helmert par restitution des effets topographiques condensés (restitution des effets des masses topographiques) ;
- calcul des anomalies de Helmert résiduelles par soustraction d'un modèle de champ de pesanteur satellitaire de grande longueur d'onde (ici GOCO05s) ;
- calcul du cogéoïde de Helmert : les anomalies résiduelles sont transformées en ondulations résiduelles (intégration de Stokes) ;
- calcul du cogéoïde : restitution des

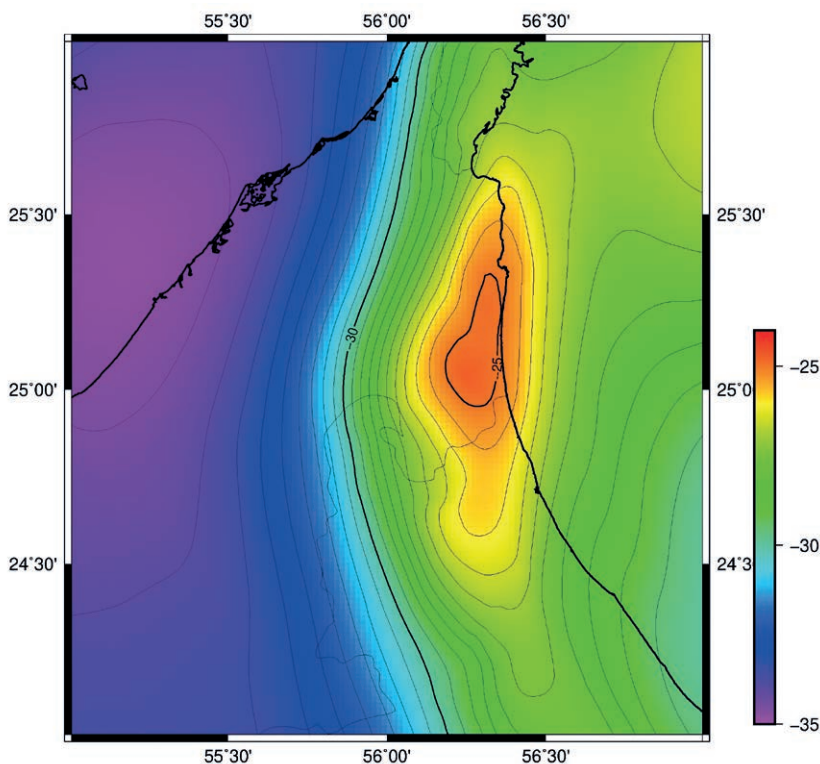


Figure 9. Géométrie gravimétrique de l'Émirat de Charjah, ondulations en m.

ondulations de grande longueur d'onde ;
 – transformation du cogéométre en géométre par transformation des masses condensées en masses réelles (application du PITE, *Primary Indirect Topographic Effect*).

Le cœur du calcul repose sur l'intégration de Stokes qui transforme les anomalies de gravité en ondulations géométriques en appliquant la formule :

$$N(\Omega) = k \iint_{\Omega'} \Delta g(\Omega') S(\Omega, \Omega') d\Omega' \quad (8)$$

Avec Ω la position du point (latitude, longitude) calculé, Ω' la position d'un point dans le rayon d'intégration, k une constante, $S(\Omega, \Omega')$ le noyau de Stokes (Stokes, 1849); $\Delta g(\Omega')$ l'anomalie de gravité au point Ω' et $N(\Omega)$ l'ondulation du géométre au point Ω . Cette formule s'applique uniquement pour un champ de gravité harmonique.

De multiples tests ont été effectués pour trouver la combinaison optimale de rayon d'intégration de stokes et de degré et ordre maximal du modèle de champ de pesanteur satellitaire. Un rayon d'intégration de 0.57° combiné à un champ de pesanteur de référence calculé au degré et à l'ordre 320 se sont

avérés être les paramètres optimaux pour la zone d'étude. Ces paramètres ont permis de réduire au maximum les écarts entre les ondulations modélisées par le géométre et leurs homologues obtenues à partir des hauteurs ellipsoïdales et des altitudes orthométriques rigoureuses sur les 67 points GNSS nivelés. La Figure 9 présente le géométre gravimétrique de l'Émirat de Charjah. L'évaluation de la précision du modèle de géométre obtenue a été effectuée au moyen des 67 repères de nivellement connus précisément en altitudes orthométriques rigoureuses et hauteurs ellipsoïdales.

Modèle de géométre	Résidu moyen [m]	Écart-type [m]	Résidu minimal [m]	Résidu maximal [m]
Meilleur modèle global (GECO)	+0.081	0.111	-0.164	+0.450
Modèle gravimétrique local brut	+0.981	0.039	-0.095	+0.064
Modèle hybride local	0.000	0.010	-0.026	+0.019

Table 1. Évaluation d'un modèle de géométre global, du modèle gravimétrique local et du modèle hybride (modèle gravimétrique local adapté sur les 67 repères de nivellement) ; les résidus minimaux et maximaux sont calculés après soustraction de l'écart moyen, correspondant au décalage appliqué pour translater le modèle au zéro du référentiel altimétrique (MSL à Al Hamriyyah).

La précision du modèle gravimétrique local a été estimée à 3.9 cm (Table 1). Par rapport à GECO (Gilardoni et al. 2015) – le meilleur modèle géopotentiel global sur la zone d'étude –, le modèle gravimétrique est plus de deux fois plus précis et permet une réduction remarquable de l'écart entre le plus grand et le plus petit résidu (qui passe ainsi de 61.4 cm à 15.9 cm).

Géométre gravimétrique hybride

Afin de faire correspondre le géométre à la réalisation du référentiel altimétrique, le géométre gravimétrique calculé a été adapté par collocation par moindres carrés aux 67 repères de nivellement disponibles. Il faut noter que cette adaptation a été ici principalement rendue nécessaire à cause du manque de points gravimétriques suffisamment précis et disponibles au-delà des frontières (en l'occurrence en Oman). En effet, la densité des points gravimétriques satisfaisante dans la zone d'intérêt a permis de bien modéliser l'influence à courte longueur d'onde du champ de gravité. En revanche, pour être modélisée précisément sans utiliser de tels repères, l'influence à moyenne longueur d'onde provoquée par certaines structures distantes (notamment la chaîne Al Hajar située au-delà des frontières) aurait nécessité de pouvoir disposer d'une grille gravimétrique au-delà de la frontière.

Pour contrôler le modèle gravimétrique hybride, trois tests à l'aveugle ont été effectués. Chaque test à l'aveugle a

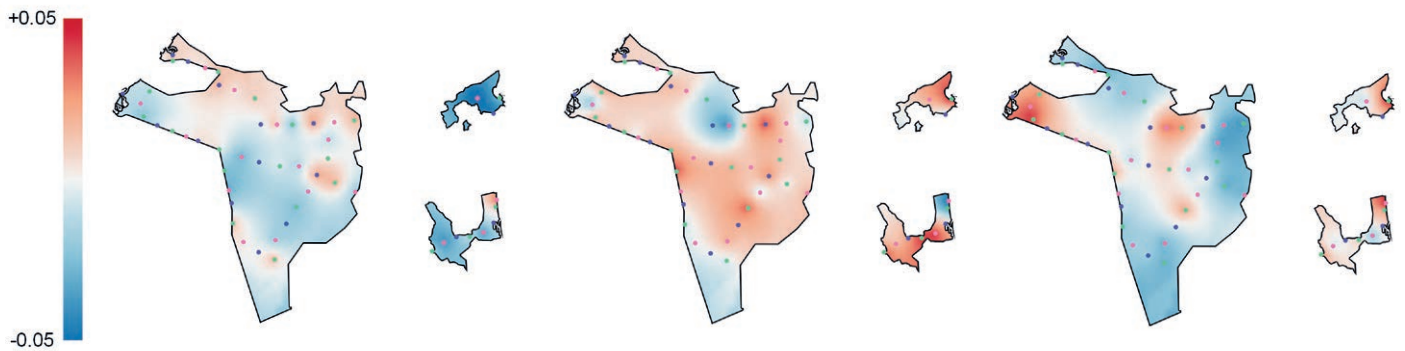


Figure 10. Tests à l'aveugle : écarts (en mètres) entre le géoïde hybride calculé en utilisant tous les repères de nivellement et le 1^{er} sous-échantillon (à gauche), le 2^e sous-échantillon (au centre) et le 3^e sous-échantillon (à droite).

consisté à générer un modèle gravimétrique hybride en n'utilisant qu'un tiers des repères de nivellement disponibles (assimilables à des points de calage). Les trois modèles ainsi générés ont été évalués d'une part en les comparant aux ondulations calculées sur les deux tiers de points restants (assimilables à des points de contrôle), et d'autre part en les comparant avec le modèle gravimétrique hybride généré en utilisant l'ensemble du jeu de points GNSS nivelés. Les trois tests à l'aveugle ont fourni des écarts-types des résidus sur les points de contrôle compris entre 2.1 cm et 3.3 cm. Ces valeurs sont considérées comme des indicateurs pessimistes de la précision atteignable (l'évaluation est effectuée sur les points non utilisés). Ces écarts-types satisfaisants ainsi que l'absence de points hors tolérance ont permis de valider du même coup par avance le modèle généré avec tous les points.

La comparaison entre les trois modèles gravimétriques hybrides générés à partir des trois sous-ensembles de points GNSS nivelés et le modèle généré avec l'ensemble des points (Figure 10) a montré que n'utiliser qu'une partie des points GNSS nivelés introduit des biais localement (jusqu'à +/- 5 cm) mais que l'évaluation globale valide le modèle gravimétrique hybride final (écarts-types sur l'ensemble du modèle de géoïde de respectivement 1.3 cm pour le 1^{er} sous-échantillon, 1.3 cm pour le 2^e sous-échantillon, et 1.7 cm pour le 3^e sous-échantillon).

Finalement, l'adaptation sur l'ensemble des points GNSS nivelés a fourni un écart-type sur les résidus de 1.0 cm (voir Table 1). Compte tenu de la densité et la répartition des points GPS nivelés, la

précision du modèle de géoïde hybride de l'Émirat de Charjah développé ici a été estimée de manière conservatrice à 2.5 cm.

Étude de la topographie de la surface de la mer autour du détroit d'Ormuz

Grâce au respect minutieux des procédures les plus rigoureuses tant lors des phases de mesures de terrain que lors des phases de calcul, ce projet permet une évaluation fine des variations de la topographie de la surface de la mer autour du détroit d'Ormuz.

La Figure 11 présente les observations de niveau moyen de la mer aux différents marégraphes, situés sur le golfe Arabo-Persique (Khalid Port et Al Hamriyyah) et sur le golfe d'Oman (Khor Fakkan et Kalba port), et les valeurs modélisées à partir d'observations satellitaires.

Une fois le réseau de nivellement calé sur le niveau moyen de la mer (MSL) mesuré à Al-Hamriyyah (golfe Arabo-Persique), les comparaisons ont donné des différences de niveau moyen de la mer de -13.0 cm à Khalid (golfe Arabo-Persique), -6.3 cm à Khor-Fakkan et -0.1 cm à Kalba (tous deux dans le golfe d'Oman). Selon la littérature (Farzaneh et Parvazi, 2018), la surface moyenne de la mer (MSS) varie considérablement dans le golfe et la mer d'Oman (variations excédant 15 m, principalement en raison des variations du géoïde), mais les quatre marégraphes en opération se situent dans des zones où la topographie de la surface de la mer (TSS) devrait avoir une hauteur similaire.

À l'échelle locale, les modèles de topographie dynamique moyenne (MDT)

sont cohérents avec la TSS le long de la côte du golfe Arabo-Persique, diminuant très légèrement vers l'ouest. Cette tendance est confirmée par la variation du MSL mesurée entre Al-Hamriyyah et Khalid (-13 cm), dont l'incertitude due à certains effets locaux possibles – quoique limités – a été estimée en dessous de 2 cm. Le gradient du MSL le long du littoral de la mer d'Oman suscite plus d'interrogations : la TSS diminue légèrement mais clairement vers le nord (-0.062 m de Kalba à Khor-Fakkan, avec une incertitude estimée inférieure à 3 cm), mais cette tendance ne peut être vérifiée par aucun modèle en raison de la variabilité de l'amplitude et de la direction de la pente de la TSS à proximité de la côte dans le golfe d'Oman. De même, entre le golfe Arabo-Persique et le golfe d'Oman, alors que la TSS apparaît être du même ordre de grandeur dans la zone d'intérêt (presque quasiment le même MSL à Al-Hamriyyah et Kalba), aucun modèle ne semble capable de confirmer dans quelle mesure c'est effectivement le cas. En effet, par rapport à notre TSS déterminée à partir des mesures de marées et des hauteurs orthométriques rigoureuses, le dernier modèle de MDT librement accessible (CNES-CLS18 MDT, basé sur le GGM GOCO05s, donc cohérent à bas degré et ordre d'harmoniques sphériques avec notre géoïde) s'est révélé biaisé par des (petites) erreurs systématiques de la pente de la TSS de 2 à 7 mm/km dans les deux mers et quasiment aucun dénivellé de la TSS entre les deux golfes (Figure 11).

L'imprécision de la pente avait été anticipée lors de l'analyse des erreurs estimées de l'altimétrie satellitaire au stade du calcul du géoïde. Toutes les

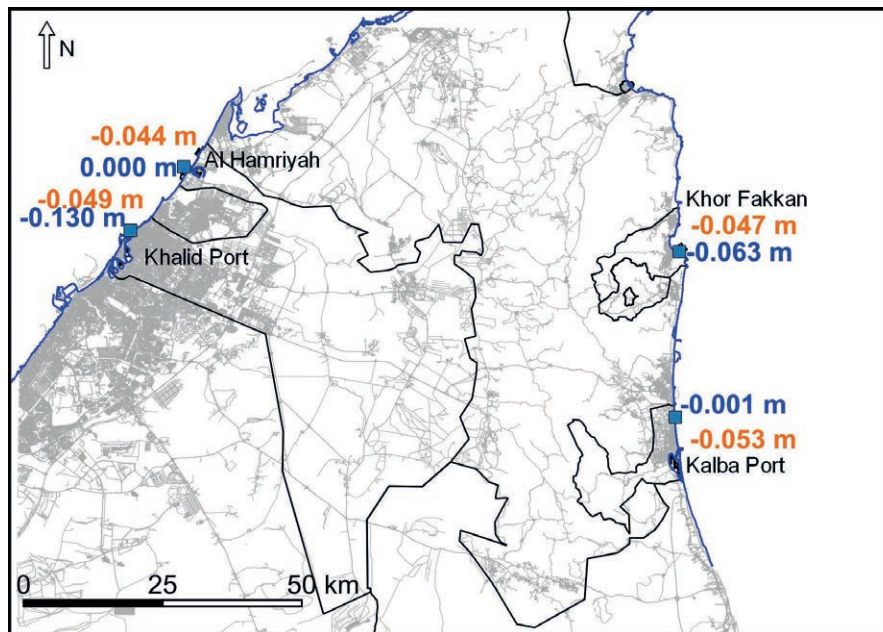


Figure 11. Écart sur les quatre ports entre la TSS issue de la détermination du MSL et du géoïde (mesures de 2019, en bleu) et la MDT CNES-CLS18 interpolée et recalée pour minimiser les différences sur les quatre marégraphes (modèle de 2018, en orange).

données à moins de 15 km des côtes avaient été masquées, ce qui avait représenté un compromis acceptable pour conserver autant de données que possible tout en utilisant des données dont l'ordre de précision serait similaire à celui de la gravimétrie marine (3,5 à 5 mGal). Bien que ce choix ait permis d'avoir des erreurs en majorité comprises entre 0.5 et 5 mGal, on peut remarquer qu'elles atteignent près de 12 mGal au large de Khor-Fakkan, (7 mGal au large de Kalba), et beaucoup plus à proximité immédiate du littoral.

Ainsi, même si toutes les études s'accordent pour indiquer que la détermination du niveau moyen de la mer précis dans les zones côtières à partir d'altimétrie satellitaire est difficilement réalisable en raison, entre autres, de formes d'ondes corrompues et d'erreurs dans la plupart des corrections (voir Vignudelli et al., 2019), cette étude du géoïde suggère que l'imprécision qui en résulte dépend de la zone d'étude et peut être anticipée à l'aide du modèle d'erreurs fourni avec les données satellitaires. En tout état de cause, un réseau de marégraphes reste le seul moyen précis pour mesurer les variations du niveau moyen de mer dans les zones côtières. Bien que sous-estimant légèrement les pentes de la TSS dans ces

zones côtières, le MDT CNES-CLS18 s'est avéré être assez précis dans la zone d'étude, certainement en raison du fait que sa MSS associée soit basée sur les mesures des missions Jason-1/2 et Cryosat-2 (l'apport de ces missions a notamment été mis en évidence par Sandwell et al., 2019), ainsi que de l'intégration dans le modèle de mesures in situ de dériveurs SVP (*Surface Velocity Program*) dans le golfe d'Oman. Une fois ramené au MSL du port de référence hydrographique (Al-Hamriyyah), le modèle peut être utilisé pour estimer le MSL en première approximation jusqu'à quelques dizaines de kilomètres du port de référence. Mieux encore, le modèle peut être étalonné en utilisant deux marégraphes dans chaque mer et la TSS extrapolée bien plus loin si sa pente est suffisamment uniforme. ●

Contacts

Jean-Louis CARME, directeur technique
Geospatial, Fugro France
jl.carme@fugro.com

Benjamin WEYER, ingénieur topographe
géodésien, Fugro France :
b.weyer@fugro.com

Hamza MAZIH, ingénieur hydrographe
géophysicien, Fugro France :
h.mazih@fugro.com

Références

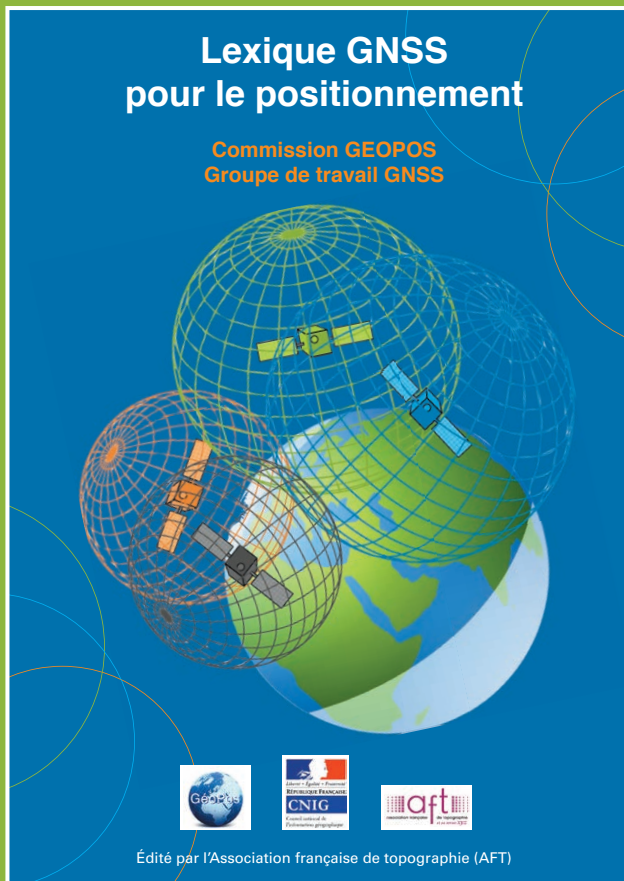
- [1] Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., & Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1906-1912.
- [2] Andersen, O., Knudsen, P., & Stenseng, L. (2018). *A New DTU18 MSS Mean Sea Surface - Improvement from SAR Altimetry*. 172. Abstract from 25 years of progress in radar altimetry symposium, Portugal.
- [3] Ellmann, A., and Vaníček, P (2007)., *UNB application of Stokes-Helmert's approach to geoid computation*. *Journal of Geodynamics*, vol. 43, n° 2, p. 200-213.
- [4] Foroughi, I., P. Vaníček, P. Novak, R. Kingdon, M. Goli, M. Sheng, and M. Santos (2016). *Harmonic downward continuation of scattered point gravity anomalies to mean anomalies on a mesh on the geoid*. 50th CMOS Congress and Joint CGU Annual Meeting, Fredericton, New Brunswick, Canada, 29 May-2 June.
- [5] Gilardoni, M., M. Reguzzoni, and D. Sampietro (2015). *"GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008."* *Studia Geophysica et Geodaetica*, vol. 60, n° 2, pp. 228-247.
- [6] Rio M.-H., Mulet, S., Etienne, H., Picot, N., Dibarboure, G. (2018), *"New CNES-CLS18 Mean Dynamic Topography of the global ocean from altimetry, gravity and in-situ data"*, Punta Delgada OSTST 2018 2018, https://meetings.avisio.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/GEO_05_Rio.pdf
- [7] Sandwell, D., Harper, H., Tozer, B., Smith, W. (2019), *"Gravity field recovery from geodetic altimeter missions"*, *Advances in Space Research* ; doi:10.1016/j.asr.2019.09.011.
- [8] Santos, M., P. Vaníček, W. Featherstone, R. Kingdon, A. Ellmann, B.A. Martin, M. Kuhn and R. Tenzer (2006). *"Relation between the rigorous and Helmert's definitions of orthometric heights."* *Journal of Geodesy*, Vol. 80, n° 12, pp. 691-704, doi: 10.1007/s00190-006-0086-0.
- [9] Stokes, G. (1849). *"On the variation of gravity on the surface of the Earth."* *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 8, pp. 672-695.
- [10] Tenzer, R., Vaníček, P., Santos, M., Featherstone, W. E., and Kuhn, M. (2005). *The rigorous determination of orthometric heights*. *Journal of Geodesy*, 2005, vol. 79, n° 1-3, p. 82-92.
- [11] Vignudelli, S., Birol, F., Benveniste, J.,



Raynal, M., Roinard, H. (2019), "Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone", Surveys in Geophysics 40. 1319. 10.1007/s10712-019-09569-1.
 [12] Yang, H. (2005). *Early Results Towards the Canadian Geoid in the Three-Space Scenario*. M.Sc. E. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 153 pp.

ABSTRACT

Bayanat and Fugro recently carried out works to modernize the geodetic and hydrographic infrastructure of the Emirate of Sharjah in the United Arab Emirates, which led to a redefinition of all the datums in force. This project had this exceptional that it integrated, with respect to terrain, geodetic GNSS measurements, precision levelling, tide gauge observations, absolute and relative gravimetry, then at the office, the calculations of the geodetic and levelling networks, the hydrographic reference levels, and finally a gravimetric geoid model and its hybrid declination. Thus, the project gave us the opportunity to determine different forms of heights, from the Mean Sea Levels or the Lowest Astronomical Tides to the rigorous orthometric heights, passing through ellipsoidal heights, geopotential numbers, pseudo-orthometric heights from stand alone levelling, and geoid undulations. As these works were carried out from beginning to completion according to the rules of the art and using the latest available computation methodologies - notably taking into account the lateral variations in density of topographic masses for geoid computation, or the application of corrections for topography, density or geoid for the computation of orthometric heights - the project also made it possible to answer the question of the variation of the Mean Sea Level on both sides of the Strait of Hormuz, or more exactly along the Arabian-Persian Gulf and the Gulf of Oman as well as between these two gulfs, variation always uncertain due to the unreliability of satellite altimetry in coastal areas.



COMMANDEZ LE

“LEXIQUE GNSS POUR LE POSITIONNEMENT”

AU PRIX DE 10,00 €

21 x 29,7 cm, 32 pages - frais de port inclus (France)

M/Mme Nom : _____

Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal :

Ville : _____

Tél. :

Fax :

Courriel : _____

Date

Signature

Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association francophone de topographie

73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ Cedex
 Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Achat également sur Internet : www.aftopo.org