

Submitted on: 03/09/2024

Revised form accepted on: 18/02/2025

Corresponding author: mhaddad@cts.asal.dz



**Revue
Nature et Technologie**

<https://journals.univ-chlef.dz/index.php/natec>

Research Article

ISSN: 1112-9778 – EISSN: 2437-0312

Evaluation de la précision verticale des modèles numériques de terrain en accès libre à l'aide de mesures GNSS/Nivellement : Sud-Est du Sahara Algérien

Mahdi HADDAD* and Mounia GAHLOUZ

Agence Spatiale Algérienne, Centre des Techniques Spatiales, 1 avenue de la Palestine, BP13 Arzew, Oran 31200, Algérie.

Citation: HADDAD, M. and GAHLOUZ, M. (2025, Mars 30) Evaluation de la précision verticale des modèles numériques de terrain en accès libre à l'aide de mesures GNSS/Nivellement : Sud-Est du Sahara Algérien. *Revue Nature et Technologie*, 17 (1), 49-57

Résumé

Cette étude se concentre sur la qualité de la précision verticale des modèles numériques de terrain (MNT) globaux disponibles gratuitement : ETOPO, GLOBE, GTOPO30, SRTM et GMTED2010. L'évaluation de la précision verticale de ces MNT s'appuie sur 41 points de contrôle au sol dont les coordonnées ont été déterminées par l'utilisation de la technique GNSS différentielle et les altitudes de référence par l'utilisation des techniques classiques de nivellement de précision. Ces points GNSS/Nivelés se situent sur les régions de Gassi Touil, Bir Berkine, Tine Fouye Tabankort (TFT), Alrar et Edjeleh & Zarzaitine (Wilaya de Ouargla et Illizi). Les mesures statistiques ont été calculées à partir des différences d'élévation entre l'altitude du point GNSS/Nivelés et la valeur interpolée du MNT. Après élimination des mesures aberrantes pour chaque MNT, une erreur quadratique moyenne (EQM) a été déterminée pour évaluer la précision verticale du modèle. Sur la base de cette enquête, il s'avère que les deux MNT SRTM 3" et GMTED 7.5" sont les mieux indiqués pour schématiser les caractéristiques des régions considérées. La précision verticale globale de ces deux MNT montre un EQM de 3,596 m et 2,955 m, respectivement.

Mots-clés : ETOPO ; GLOBE ; GTOPO30 ; SRTM ; GMTED2010 ; Précision verticale ; Algérie.

Assessment of the vertical accuracy of open-source digital terrain models using GNSS/level measurements: Southeastern Algerian Sahara

Abstract

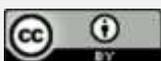
This study focuses on the quality of the vertical accuracy of freely available global Digital Terrain Models (DTMs): ETOPO, GLOBE, GTOPO30, SRTM and GMTED2010. Assessment of the vertical accuracy of these DTMs is based on 41 ground control points, whose coordinates have been determined using the differential GNSS technique, and reference heights have been determined using conventional precision levelling techniques. These GNSS/levelling points are located in the regions of Gassi Touil, Bir Berkine, Tine Fouye Tabankort (TFT), Alrar and Edjeleh & Zarzaitine (Wilaya of Ouargla and Illizi). Statistical measurements were calculated from the differences in elevation between the height of the GNSS/levelling point and the interpolated DTM value. After eliminating outliers for each DTM, a root mean square error (RMSE) was determined to assess the vertical accuracy of the model. Based on this investigation, it turns out that the two DTMs SRTM 3" and GMTED 7.5" are the best suited to schematize the characteristics of the considered regions. The overall vertical accuracy of these two DTMs shows an RMSE of 3.596 m and 2.955 m, respectively.

Keywords: ETOPO; GLOBE; GTOPO30; SRTM; GMTED2010; Accuracy assessment; Algeria.

1. Introduction

Des données numériques détaillées sur la surface de la Terre sont devenues disponibles au cours des dernières décennies notamment les modèles numériques de terrain (MNT) ou les modèles numériques d'élévation (MNE)

qui sont utilisés comme base de données dans de nombreuses applications intégrées dans les systèmes d'informations géographiques (SIG). Ces données fournissent la description de la surface tridimensionnelle 3D et la visualisation. Aussi, ces données contribuent à la dérivation des facteurs morphologiques de la surface



This article is available under the BY [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The license ensures that the article can be downloaded, printed out, extracted, reused, archived, and distributed, so long as appropriate credit is given to the

topographique tels que la pente, l'aspect, le profil de pente et la courbure. Ces facteurs morphologiques représentent des paramètres topographiques clés dans le calcul du rayonnement solaire à une échelle spatio-temporelle fine, la prévision de production d'électricité et la simulation des prévisions dans le secteur d'énergies renouvelables.

Pour des raisons de disponibilité, les données des MNT de couverture globale semblent une source de données acceptable pour la mise en œuvre d'une telle plateforme de prévision. La qualité des prévisions qui en découlent est par conséquent assujettie à la qualité du MNT utilisé. De manière générale, trois critères permettent de juger l'adéquation d'un MNT à une application particulière :

- la couverture géographique pour laquelle les données du MNT sont disponibles.
- la résolution spatiale, c'est-à-dire la distance entre deux points adjacents du MNT.
- la qualité des données du MNT généré : elle dépend de l'application ou non de traitements de correction des données après leur acquisition. En effet, la présence de nuages lors d'un relevé satellitaire provoque des trous (pas de données). Aussi, l'écume des vagues sur des lignes côtières fausse les échos Radar et provoque ainsi des zones brouillées, ... etc. [1].

Plusieurs études scientifiques ont évalué la précision des MNT globaux dans plusieurs régions du monde, en utilisant différentes procédures telles :

- la superposition du MNT avec les courbes de niveau digitalisées depuis la carte topographique pour voir si le MNT tient compte des formes du relief, notamment du réseau hydrographique.

- L'évaluation de la précision en terme d'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) calculée à partir des écarts entre les altitudes d'un certain nombre de points de contrôle (Ground Control Points /GCP) et celles dérivées du MNT à l'emplacement de ces points de contrôle. Les altitudes des points de contrôle sont déterminées sur le terrain par des méthodes topométriques conventionnelles, par la technique GNSS ou par des méthodes photogrammétriques. Toutefois la plupart de ces évaluations basées sur l'EQM ont porté sur de petites régions, avec peu de travaux à l'échelle mondiale ou régionale. En outre, peu d'articles scientifiques comparent les modèles fournis par les institutions de recherche. Le tableau 1 qui va suivre est donné à titre

d'exemple pour identifier et comparer la précision verticale du modèle SRTM de différentes sources.

L'objectif de cette étude consiste à réaliser une comparaison des données de cinq MNT globaux (ETOPO 1', GLOBE 30", GTOPO30 30", SRTM de 30" et 3" et GMTED2010 30", 15" et 7.5») avec les données d'altitudes de 41 points de contrôle situés dans le Sud-Est du Sahara algérien et dont les coordonnées ont été déterminées par l'utilisation de la technique GNSS différentielle (mode statique) et les altitudes par l'utilisation des techniques classiques de nivellement de précision. Ces altitudes orthométriques se réfèrent au système de référence altimétrique dénommé Nivellement Général Algérien (NGA) fut établi. Ces points GNSS nivelés ont été déterminés dans le cadre du projet mené par le CTS portant sur la mise en place d'un référentiel géodésique au profit de la SONATRACH/PED par l'utilisation de la technique du GNSS (réseau RGS2019).

Cette analyse est la seule véritable comparaison indépendante. Mais elle doit être appliquée avec soin car les altitudes issues d'un MNT global peuvent être affectées d'erreurs d'interpolation ou des erreurs systématiques liées au processus de génération du MNT. Ces erreurs sont difficiles à détecter à l'aide d'une inspection informelle et d'affichage graphique, en particulier. Une approche simple pour identifier ces erreurs systématiques (valeurs aberrantes) consiste à utiliser le test de Grubbs [17-19]. Avec le test de Grubbs, on détecte une valeur aberrante à la fois jusqu'à ce qu'aucune valeur aberrante ne soit laissée. Ce test suppose que les données sont normalement distribuées.

2. Données et méthodes

1. Points GNSS nivelés

Afin de mener cette étude comparative des modèles numériques d'élévation et des modèles géopotentiels globaux, 41 points GNSS/Nivelés, appartenant au réseau géodésique RGS2019 de la Sonatrach (Lot 1 du réseau) ont été utilisés. Ces points GNSS/Nivelés sont répartis sur les régions de Gassi Touil, Bir Berkine, Tine Fouye Tabankort (TFT), Alrar et Edjeleh & Zarzaitine (Wilaya de Ouargla et Illizi). A chacune de ces régions, un réseau GNSS constitué d'une station GNSS primaire et d'un ensemble de stations GNSS secondaires ont été observés. Le choix de l'emplacement des stations primaires et secondaires a été fait pour que ces stations soient

favorables aux observations GNSS. Les caractéristiques suivantes ont été ainsi prises en considération : masque d'élévation de 15°, absence de surfaces réfléchissantes

pouvant être la cause de multi-trajets du signal GNSS, sûreté du site, alimentation électrique à proximité et absence d'émetteur-récepteur radio à proximité.

Tableau 1

Résumé de quelques études de précision des données SRTM. Moy: Erreur Moyenne, EQM: Erreur Quadratique Moyenne, GCP : Ground Control Points, RTK-DGPS : Real-time kinematic GPS, KGPS : Kinematic GPS, CGIAR-CSI : Consortium for Spatial Information

Référence	Région	Version	Source	Précision
[2]	Global	SRTM v2	Satellite ERS-1	Moy.: 3,60 m Écart-type: 16,16 m
[3]	Global	SRTM v4.1	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: 8,0 m Écart-type: 8,3 m
[4]	États-Unis	SRTM v4.1	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: 1,66 m EQ M : 4,15 m
[5]	États-Unis	SRTM v2	National Elevation Dataset (NED)	Moy.: 2,0 m Écart-type: 8,3 m
[3]	Amérique du Sud	SRTM v4.1	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: 5,2 m EQ M : 11,2 m
[6]	Amazon, Brésil	SRTM v1	Points de contrôle au sol (GCPs)	90 % < 25,00 m EQ M: 11,70 m
[7]	Amazon, Brésil	SRTM v3	Points de contrôle au sol (GCPs)	Écart-type: 11,06 m
[8]	Inde	SRTM University of Maryland	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: -12,56 m Écart-type: 51,37 m
[9]	Indonésie	SRTM v4.1	RTK-DGPS	EQ M : 3,250 m
[10]	Anaguid, Tunisie	SRTM v4.1 : CGIAR-CSI	RTK-DGPS	Moy.: -12,56 m Écart-type: 51,37 m
[10]	Tebessa, Tunisie	SRTM v4.1 : CGIAR-CSI	RTK-DGPS	Moy.: 0,48 m Écart-type: 8,4 m
[11]	Kasserini, Tunisie	SRTM v4.1	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: -1,85 m Écart-type: 9,41 m
[12]	Pologne	SRTM v4	Inventaire DEM cartographie	Moy.: 4,31 m Écart-type: 1,09 m
[13]	Grèce	SRTM v4	KGPS coletados com veículo (GPS).	Moy.: 0,30 m Écart-type: 6,40 m.
[14]	Espagne	SRTM v4.1	Cartes topographiques 1:10.000	EQ M : 6,10 m
[15]	Australie	SRTM (30/90m)	Points de contrôle au sol (GCPs)	Écart-type: 1,84 m
[16]	Australie	SRTM v4.1 CGIAR-CSI	Points de contrôle au sol (GCPs)	Moy.: 3,04 m Écart-type: 3,22 m

L'équipement GNSS du Centre des Techniques Spatiales utilisé est le récepteur Trimble NetR9 couplé avec des antennes GNSS de type Geodetic Zephyr Model 2. La technologie des récepteurs Trimble NetR9 prend en charge les signaux de toutes les constellations GNSS existantes et prévues (GPS, GLONASS, GALILEO, BDS) ainsi que les systèmes d'augmentation (SBAS). En plus de ce dernier équipement, des récepteurs GNSS Trimble R7 de l'ENAGEO (Entreprise Nationale de Géophysique) ont été utilisés.

Les paramètres utilisés pendant toutes les campagnes d'observation GNSS du RGS2019 sont : constellation GPS & GLONASS, mode d'observation Statique avec

un angle d'élévation de 0°, cadence d'enregistrement de 10 secondes, durée d'observation par ligne de base : au minimum 1h et paramètres météo standards. Les contrôles externes ont été soigneusement respectés lors de la collecte des données GNSS : configuration du réseau secondaire sous formes de polygones fermés ; les points sont déterminés deux fois au moins ; une seconde occupation de chaque point secondaire a été effectuée dans une fenêtre de temps différente afin de garantir que la mise en station, la constellation des satellites et les conditions atmosphériques soient différentes.

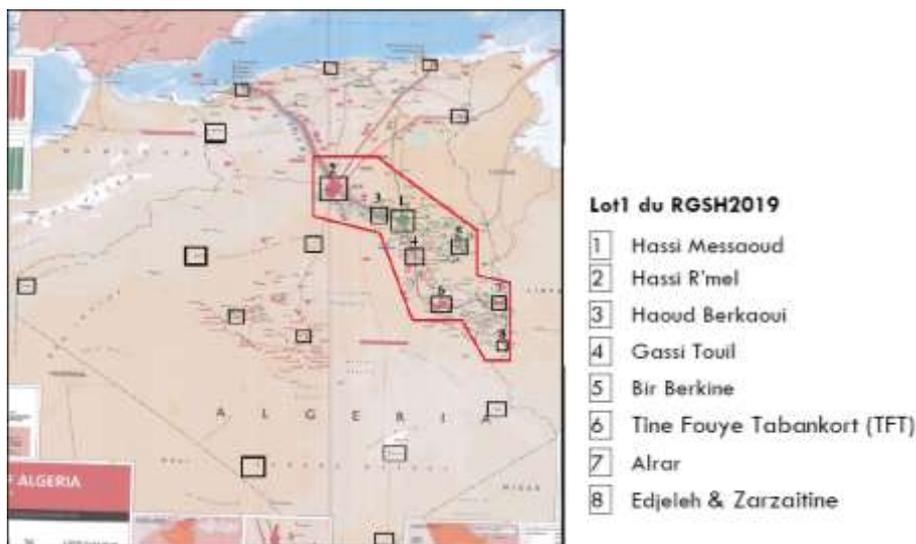


Figure 1 : Configuration du Lot 1 du projet RGS2019

Le calcul des lignes de base GNSS exige que les coordonnées de la station primaire soient maintenues fixes. Les coordonnées des stations secondaires sont déterminées par rapport à ce point "fixe". La détermination des coordonnées des stations primaires du réseau RGS2019 a été effectuée par l'utilisation du logiciel scientifique « Bernese 5.0 ». Bernese est un logiciel de traitement des données GNSS (GPS et GLONASS) de haute précision, développé à l'institut astronomique de l'Université de Bern (AIUB). Le module BPE permettant l'automatisation des procédures de calcul a été utilisé moyennant le script PPP (Precise-Point-Positioning). Ce script permet le calcul des coordonnées a priori d'un ensemble de stations sur la base d'une analyse PPP. La durée minimale d'observation pour le calcul d'une Position PPP fiable est de 2 à 3 heures (dans notre cas environ 8 heures) avec 4 satellites ou plus et un bon GDOP (Geometric Dilution of Precision).

Le PPP intègre les modèles de correction des erreurs GNSS. Il prend ainsi en compte les modèles de corrections atmosphériques (corrections troposphériques et ionosphériques), les erreurs d'antennes et les variations de positions des centres de phase. Il utilise également les orbites précises de l'IGS (International GNSS Service), ainsi que les décalages d'horloges des satellites GNSS et des modèles de surcharges océaniques précis (grille FES2004). Notons que lors de ce traitement en mode PPP, le masque d'élévation considéré était de 5° et l'intervalle de traitement à 10 s.

Les coordonnées géodésiques des stations primaires, une fois déterminées, ont été utilisées comme points fixes pour la détermination des coordonnées des points formant l'ossature des réseaux GNSS secondaires. Le logiciel utilisé pour cette opération est le Trimble Business Center (TBC). Le TBC est un logiciel pour le traitement et l'analyse des données topographiques, satellitaires, terrestres et d'imageries enregistrées sur le terrain. Il offre la possibilité de choisir le mode de traitement. Les paramètres suivants ont été utilisés lors du traitement des observations des réseaux GNSS secondaires : constellations utilisées : GPS/GLONASS, intervalle de traitement : 10s, masque d'élévation : 10°, éphémérides : radiodiffusées, paramètres météo (pression et température) standards et résolution des ambiguïtés : fréquence double L1&L2.

La réalisation des 41 point GNSS /Nivelés a été faite par l'une de ces trois approches :

- Soit par le rattachement au NGA des stations secondaires GNSS appartenant au réseau RGS2019 par le procédé de nivellement géométrique moyennant une Station Totale Leica TC16,
- Soit par la détermination par GNSS des coordonnées géodésiques des repères et bornes de nivellement déjà rattachées au NGA,
- Soit par la détermination par GNSS des coordonnées géodésiques des bornes géodésiques (triangulations principales et secondaires, chaîne géodésique axe 3000) déjà rattaché au NGA.

A noter que sur les 41 points considérés, 10 points ont été réalisés par l'utilisation de la première approche (TFT, Alrar et Edjeleh), 7 points par l'utilisation de la deuxième approche (Gassi Touil et Bir Berkine) et enfin 24 points par l'utilisation de la dernière approche.

2. Méthodologie d'analyse

Les altitudes orthométriques de 41 points GNSS/Nivelés sont comparées avec celles interpolées à partir des différents MNT par l'utilisation de la méthode d'interpolation bicubique qui donne de meilleurs résultats. En effet, dans le domaine du traitement et de ré-échantillonnage d'images satellitales, l'approche d'interpolation bicubique est la mieux indiquée que celle d'interpolation bilinéaire ou du plus proche voisin. Contrairement à l'approche bilinéaire qui prend en considération que 4 pixels (2×2) pour l'interpolation, l'approche bicubique considère, quant à elle, un voisinage de 16 pixels (4×4), rendant ainsi les images ré-échantillonnées plus lisses et avec moins d'artefacts d'interpolation.

Par ailleurs, les altitudes interpolées à partir d'un MNT peuvent être affectées par les erreurs systématiques liées au processus de génération du MNT. Pour ne pas perturber l'adéquation de notre analyse, le test de Grubbs [17-19] a été alors appliqué sur les séries d'écart entre les altitudes des points GNSS/Nivelés et celles dérivées des MNT afin de détecter les valeurs aberrantes. Une fois ces valeurs éliminées, la précision de chaque MNT en terme d'EQM est calculée.

A partir d'une série de données y_i classées par ordre croissant, la statistique de Grubbs est calculée pour chaque valeur extrême y_{min} et y_{max} .

$$G = (y_{max} - \bar{y})/s \quad \text{ou bien} \quad G = (\bar{y} - y_{min})/s \quad (1)$$

avec s l'écart-type de la série et \bar{y} sa moyenne.

L'élément maximal ou minimal dans l'ensemble de données est considéré comme aberrant si la valeur de la statistique correspondante dépasse la valeur critique estimée à partir de la distribution de *Student*. Le test de Grubbs est réalisé de manière itérative, alternativement à l'extrémité haute et à l'extrémité basse de la série jusqu'à ce qu'aucun point aberrant ou douteux ne soit plus détecté.

3. Résultats et analyse

Les altitudes à l'emplacement des 41 points GPS/Nivelés ont été calculées à partir des MNT globaux par la méthode d'interpolation bicubique et comparées à celles mesurées et rattachées au NGA. Le tableau 2 donne les écarts entre les altitudes NGA et celles interpolées à partir des modèles ETOPO1, GLOBE, GTOPO30, SRTM (30" et 3") et GMTED (30", 15" et 7.5").

Les statistiques sur les écarts entre les altitudes NGA et celles interpolées à partir des différents MNT globaux sont données par le tableau 3. L'analyse de ces écarts montre que le modèle SRTM 3" est le mieux précis : écart-type de 7,460 m et EQM de 7,382 m. Près de 95,12 % des points présentent des écarts compris entre -10 et 10 m.

Afin de détecter et d'éliminer les points douteux, le test de Grubbs a été appliqué sur les écarts entre les altitudes des 41 points NGA et celles interpolées à partir des MNT globaux. Les écarts jugés inacceptables sont indiqués dans le tableau 2 avec des cellules grisées.

Les statistiques sur les écarts entre les altitudes NGA et celles interpolées à partir des différents MNT globaux estimées après élimination des points douteux sont données par le tableau 4.

Après élimination des deux points ("1" situé à TFT et "VII" situé à Zarzaitine) la qualité du modèle SRTM à 3" s'est nettement améliorée : écart-type de 3,534 m au lieu de 7,460 m et EQM de 3,596 m au lieu de 7,382 m. La localisation des deux points aberrants ("1" et "VII") sur l'imagerie Google Earth avec les courbes de niveau du SRTM 3" est donnée par les figures numérotées 2 et 3, respectivement. Ces deux points détectés appartiennent à l'origine aux réseaux géodésiques classiques (triangulation complémentaire et triangulation principale, respectivement) ; voir tableau 2. Par conséquent, ils sont placés sur les sommets de monticules pour que les mesures topométriques angulaires et de distances puissent être effectuées entre les points géodésiques. De ce fait, l'interpolation des altitudes de ces points à partir du SRTM reste peu précise compte tenu des dénivelées importantes entre les points géodésiques et leur voisinage immédiat (dénivelées d'un ordre supérieur à 40 mètres ; voir les figures 2 et 3). En éliminant les deux points douteux détectés, la qualité du modèle SRTM à 3" s'est améliorée considérablement.

Tableau 2

Ecarts en mètre entre les altitudes NGA et celles interpolées à partir des différents MNT

Id, Point	Localité	ETOP01	GLOBE	GTOPO	SRTM	SRTM	GMTED	GMTED	GMTED
		1'	30"	30"	30"	3"	30"	15"	7.5»
1	TFT - Triangulation Complémentaire	85,85	82,926	91,036	71,686	39,777	77,288	38,469	47,989
12	TFT - Triangulation Complémentaire	-0,726	9,814	6,049	-0,292	-2,513	-1,398	-3,899	-3,853
28	TFT - Triangulation Complémentaire	10,756	3,932	-2,969	4,678	-2,148	-0,151	2,295	-6,195
IV	TFT - Triangulation Principale	2,045	-4,415	-10,510	-1,346	-2,068	-2,222	-3,426	-2,073
LV	TFT - Triangulation Principale	37,403	22,608	18,517	23,051	7,911	14,020	2,733	0,933
CTS1	TFT - GPS/Nivelé	-7,049	-0,281	-6,235	-2,332	-2,169	-1,161	-1,657	-2,792
CTS2	TFT - GPS/Nivelé	2,859	16,463	10,548	0,936	-1,689	1,132	-0,802	-1,779
XIV	TFT - Triangulation Principale	9,426	-3,129	-3,834	5,323	-3,800	-0,737	-2,803	-2,942
XXI	TFT - Triangulation Principale	-2,031	-0,666	3,314	-3,020	-4,170	-5,205	-3,520	-3,438
IGN11	TFT - GPS/Nivelé	-11,491	-10,405	-4,304	-3,821	-1,994	-1,199	-1,992	-1,890
IGN63	TFT - GPS/Nivelé	2,501	-0,964	-13,757	0,313	-0,858	-10,144	-0,543	-0,504
XLIX	TFT - Triangulation Principale	-2,305	-7,219	-10,694	-3,001	-5,158	-4,283	-6,424	-4,457
XXXI	TFT - Triangulation Principale	45,319	14,559	16,311	12,691	0,521	5,882	7,909	-3,005
XXXV	TFT - Triangulation Principale	25,715	28,771	24,156	21,155	2,698	15,230	4,110	9,755
IGN10	Alrar - GPS/Nivelé	-4,156	2,451	-7,975	-2,511	-0,937	-2,881	3,078	-2,500
IGN13	Alrar - GPS/Nivelé	-3,903	-0,256	-3,523	-3,119	-4,332	-2,021	-1,715	-4,400
IGN18	Alrar - GPS/Nivelé	-5,193	12,964	7,067	-4,089	-4,001	-6,137	-7,378	-5,026
IGN1	Edjeleh - GPS/Nivelé	-2,941	16,665	16,937	-2,656	-3,790	-5,396	-3,893	-3,064
IGN8	Edjeleh - GPS/Nivelé	3,410	5,664	2,214	1,363	-1,260	0,467	-0,862	-2,380
IGN13	Edjeleh - GPS/Nivelé	-7,306	-83,663	-83,663	-2,652	-3,280	-2,182	-2,086	-4,437
II	Edjeleh - Triangulation Principale	55,535	-16,558	-16,558	33,025	9,173	21,548	30,468	44,189
III	Edjeleh - Triangulation Principale	-25,615	-126,211	-126,211	-0,327	7,478	1,816	0,748	1,002
VI	Edjeleh - Triangulation Principale	1,002	-112,484	-112,484	1,455	0,180	-5,053	-2,976	-2,169
3	Zarzaitine - Triangulation Secondaire	15,944	26,826	11,408	6,657	2,056	5,562	5,561	-2,133
B	Zarzaitine - Triangulation Principale	-1,556	10,017	10,017	-1,069	0,739	-3,034	-0,169	0,867
VII	Zarzaitine - Triangulation Principale	20,898	27,514	19,882	13,71	12,147	11,579	8,070	10,516
XXV	Zarzaitine - Triangulation Principale	5,533	12,356	13,721	6,488	2,416	7,015	3,456	3,607
XXVIII	Zarzaitine - Triangulation Principale	3,823	13,651	20,657	3,320	-0,012	0,491	3,923	-1,623
T9	Gassi Touil - Axe 3000	-0,556	13,662	15,470	0,153	-2,732	-0,834	2,761	0,527
T10	Gassi Touil - Axe 3000	0,097	17,088	12,295	-1,343	-3,356	-2,041	-1,898	-1,545
T11	Gassi Touil - Axe 3000	-1,134	12,007	11,821	-0,989	-0,090	0,435	-5,703	-2,154
T12	Gassi Touil - Axe 3000	0,933	9,783	7,672	0,182	-0,213	3,074	-4,457	-4,124
T13	Gassi Touil - Axe 3000	-3,434	9,711	0,825	-6,488	4,742	-1,986	-6,741	-1,388
T14	Gassi Touil - Axe 3000	-4,355	6,933	-10,632	-3,705	-3,591	-6,065	-5,662	-3,134
RN40	Gassi Touil - GPS/Nivelé	-1,469	9,451	8,683	-0,725	0,396	-2,05	-0,747	-0,965
RN51	Gassi Touil - GPS/Nivelé	-0,709	7,66	6,339	-1,351	-5,414	-1,93	-3,713	-1,327
RN56	Gassi Touil - GPS/Nivelé	-2,002	8,634	6,606	-1,005	-2,987	-2,432	-1,855	-6,372
RN60	Gassi Touil - GPS/Nivelé	-1,863	14,385	17,909	-1,97	-2,146	-0,422	-5,159	-1,052
RN75	Gassi Touil - GPS/Nivelé	-1,756	-5,321	-8,709	-1,45	-1,582	-3,221	-2,304	-2,709
LG02	Bir Berkine - GPS/Nivelé	-11,893	-81,452	-81,452	-3,875	-0,155	-3,642	-2,583	-0,265
IGN19	Bir Berkine - GPS/Nivelé	-16,406	-87,225	-87,225	-11,38	-5,957	-14,602	-7,598	-0,661

Tableau 3

Statistiques des différences entre les altitudes NGA et celles interpolées. L'écart type est calculé à l'aide de la méthode « n-1 ». L'erreur quadratique moyenne est calculée à l'aide de la méthode « n ».

Ecart	MNT	ETOPO1	GLOBE	GTOPO	SRTM	SRTM	GMTED	GMTED	GMTED
		1'	30"	30"	30"	3"	30"	15"	7.5»
Min. (m)		-25,615	-126,211	-126,211	-11,38	-5,957	-14,602	-7,598	-6,372
Max. (m)		85,850	82,926	91,036	71,686	39,777	77,288	38,469	47,989
Moy. (m)		5,102	-3,018	-5,641	3,455	0,435	1,783	0,513	0,806
Ecart Type (m)		19,938	39,511	39,321	13,712	7,460	13,760	8,748	10,906
EQM (m)		20,344	39,143	39,246	13,978	7,382	13,707	8,655	10,803
% in [-10;10]		70,732	43,902	39,024	82,927	95,122	82,927	95,122	92,683

Tableau 4

Résultats du test de Grubbs sur les écarts entre les altitudes à un intervalle de confiance de 95 % L'écart type est calculé à l'aide de la méthode « n-1 ». L'erreur quadratique moyenne est calculée à l'aide de la méthode « n ».

Ecart	MNT	ETOPO1	GLOBE	GTOPO	SRTM	SRTM	GMTED	GMTED	GMTED
		1'	30"	30"	30"	3"	30"	15"	7.5»
Nbr. Points rejetés		4	2	2	4	2	2	2	4
% Int. de Grubbs		90,244	95,122	95,122	90,244	95,122	95,122	95,122	90,244
Min. (m)		-25,615	-87,225	-87,225	-11,38	-5,957	-14,602	-7,598	-6,372
Max. (m)		25,715	82,926	91,036	13,71	9,173	15,23	8,07	3,607
Moy. (m)		-0,403	2,947	0,19	-0,196	-0,874	-0,66	-1,229	-2,146
Ecart Type (m)		9,214	29,867	30,16	4,717	3,534	5,733	3,989	2,059
EQM (m)		9,097	29,629	29,771	4,657	3,596	5,697	4,124	2,955

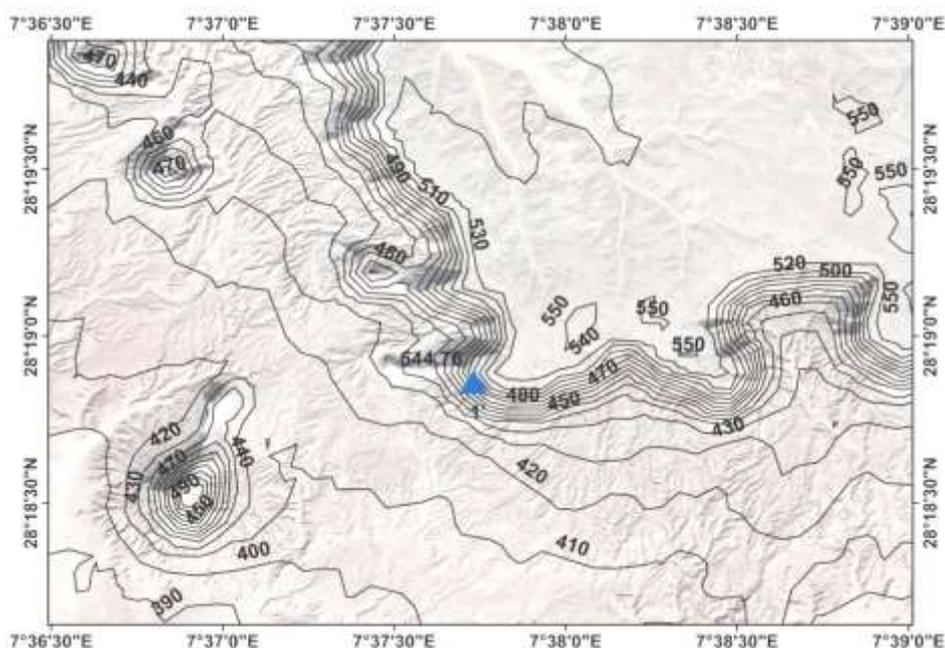


Figure 2 : Localisation du point 1 (TFT) et courbes de niveau SRTM 3"

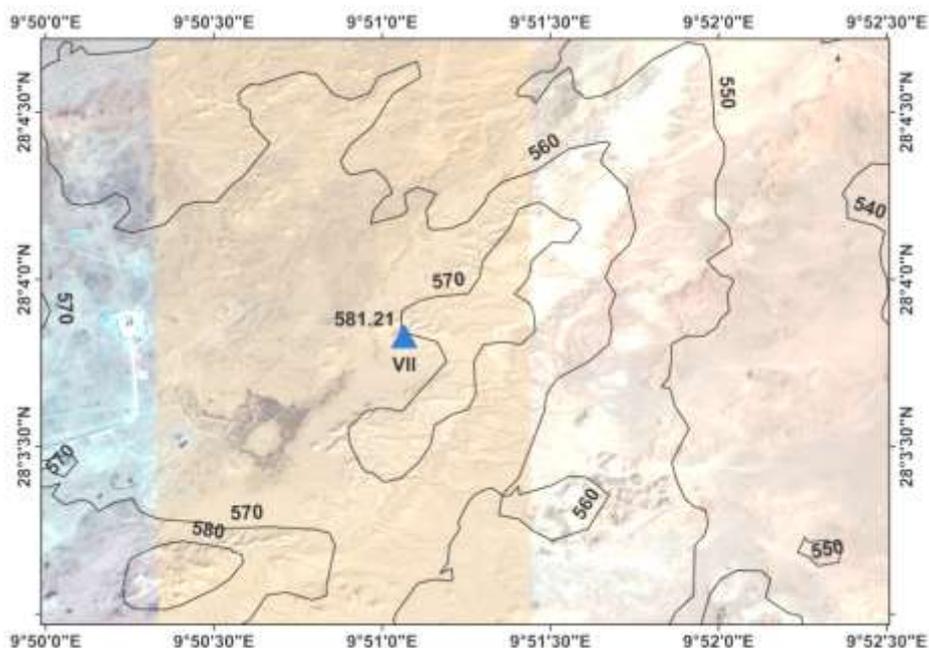


Figure 3 : Localisation du point VII (Zarzaitine) et courbes de niveau SRTM 3"

On note que le modèle GMTED 7.5» semble être plus précis; voir tableau 4. Néanmoins, quatre points ont été éliminés en utilisant ce modèle (''1'' et ''XXXV'' situés à TFFT, ''II'' situé à Edjeleh et ''VII'' situé à Zarzaitine) : écart-type de 2,059 m et EQM de 2,955 m ; voir tableau 4.

Pour ce qui est des MNT à 30" de résolution, la précision offerte par SRTM 30" est meilleure que celle offerte par GLOBE 30", GTOPO 30" et GMTED 30" : écart-type de 4,717 m et EQM de 4,657 m (Tableau 4).

4. Conclusion

L'analyse des écarts entre les altitudes des 41 points GNSS nivelés et celles interpolées à partir des différents MNT globaux montre que les deux modèles SRTM 3" et GMTED 7.5" sont ceux qui offrent une meilleure précision en terme d'Erreur Quadratique Moyenne. Par conséquent ces deux modèles sont recommandés pour la création de grilles de conversion altimétriques. D'autres comparaisons en exploitant un MNT fin (issu de la cartographie de base) et d'autres données GNSS nivelés bien répartis sur l'ensemble du territoire national demeurent souhaitables pour une évaluation rigoureuse de la qualité des MNT.

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt lié à la recherche décrite dans cet article.

Références

- [1] Bouguira, W. (2007) « *Modélisation Numérique de Terrains : Etude de Synthèse et Application* », Mémoire de Magister, option : système d'information et IA distribués. Université de Mentouri. Mémoire soutenue le 26 juin, 143 pages. Disponible sur internet : <https://bu.unc.edu.dz/theses/informatique/BOU4862.pdf> (Accédé le 11/09/2024)
- [2] Berry, P.A.M. Garlick, J.D. and Smith R.G. (2007) Near-global Validation of the SRTM DEM Using Satellite Radar Altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 106 (1), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.011>
- [3] Mukul, M., Srivastava, V. and Mukul, M. (2015) Analysis of the Accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Height Models Using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. *Journal of Earth System Science*, 124, 1343-135721. <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0597-2>
- [4] Robinson, N., Regetz, J. and Guralnick, R.P. (2014) EarthEnv-DEM90: A Nearly-global, Void-free, Multi-scale Smoothed, 90m Digital Elevation Model from Fused ASTER and SRTM Data, ISPRS. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.002>
- [5] Shortridge, A. and Messina, J. (2011) Spatial Structure and Landscape Associations of SRTM error. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1576–1587. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.017>
- [6] Dias, M.F., Miceli, B.S., Seabra, F.M., Santos, P.R.A. and Fernandes, M.C. (2011) Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (DEMs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. In: Proceedings of the 15th

- Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Curitiba, 4110-4117. <https://doi.org/10.14393/rbcv63n1-43731>
- [7] Santos, A.P., "Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística especial" (2010) 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. (Brazilia) <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3733>
- [8] Datta, P.S. and Kirchner, H.S. (2010) Erosion Relevant Topographical Parameters Derived from Different DEMs. A Comparative Study from the Indian Lesser Himalayas. *Remote Sensing*, 2 (8), 1941-1961. <https://doi.org/10.3390/rs2081941>
- [9] Suwandana, E., Kawamura, K., Sakuno, Y., Kustianto, E. and Raharjo, B. (2012) Evaluation of ASTER GDEM2 in Comparison with GDEM1, SRTM DEM and Topographic-Map-Derived DEM Using Inundation Area Analysis and RTK-DGPS Data, *Remote Sensing*, 4 (8), 2419-2431. <https://doi.org/10.3390/rs4082419>
- [10] Athmania, D. and Achour, H. (2014) External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria, *Remote Sensing*, 6 (5), 4600-4620. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>
- [11] Chaieb, A., Rebai, N., Bouaziz, S. (2016) Vertical Accuracy Assessment of SRTM Ver 4.1 and ASTER GDEM Ver 2 Using GPS Measurements in Central West of Tunisia, *Journal of Geographic Information System*, 8: 57-64. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.81006>
- [12] Kolecka, N. and Kozak, J. (2013) Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, 171, 897-91. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0695-5>
- [13] Mouratidis, A., Briole, P. and Katsambalos, K. (2010). SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) Validation by Means of Extensive kinematic GPS Measurements: A Case Study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (23), 6205-6222. <https://doi.org/10.1080/01431160903401403>
- [14] Gómez-Gutiérrez, A. Schnabel, S., Contador, J.F. and García, Marín, R. (2011) "Testing the Quality of Open-access DEMs and their Derived Attributes in Spain: SRTM. GDEM and PNOA DEM", Proceedings of Geomorphometry 2011 Conference: (2011) 53-56, Redlands, CA, USA. Available in: <https://www.geomorphometry.org/2011/>
- [15] Jarihani, A.A., Callow, J.N., Mcvicar, T.R., Nile, T.G.V. and Larsen, J.R. (2015) Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) Selection, Preparation, and Correction for Hydrodynamic Modelling in Large, Low-gradient and Data-sparse Catchments. *Journal of Hydrology*, 524, 489-506.
- [16] Rexer, M., Hirt C. (2014) Comparison of Free High-resolution Digital Elevation Data Sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and Validation Against Accurate Heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213-226.
- [17] Grubbs, F.E. (1950) Sample Criteria for Testing Outlying Observations. *Annals of Mathematical Statistics*, 21, 27-58.
- [18] Grubbs, F.E. (1969) Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples, *Technometrics*, 11(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490657>
- [19] Grubbs, F.E. and Beck G. (1972) Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations. *Technometrics*, 14 (4), 847-854. <https://doi.org/10.1080/00401706.1972.10488981>

Sitographie

- [1] ETOPO Global Relief Model. NOAA - National Centers for Environmental Information [consulté le 19/01/2024]. <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>
- [2] Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30). USGS - Earth Resources Observation and Science (EROS) Center [consulté le 07/12/2023]. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- [3] GLOBE Download the Elevation Tiles. NOAA - National Centers for Environmental Information [consulté le 15/01/2024]. <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltiles.html>
- [4] GMTED2010 Viewer. USGS [consulté le 17/07/2023]. https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/viewer.htm
- [5] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). NASA [consulté le 29/05/2022]. <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>
- [6] SRTM Data version 4. CGIAR Consortium for Spatial Information [consulté le 29/05/2022]. <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>