

# Validation des mesures gravimétriques terrestres de l'INCT

Benahmed Daho S. A. & <sup>(1)</sup>, Meslem M. A. <sup>(2)</sup>

(1) Centre des Techniques Spatiales, BP 13 – Arzew - 31200– ORAN, Email : d\_benahmed@hotmail.com

(2) Institut National de Cartographie et de Télédétection,  
BP 430 - Hussein-Dey – 16040 - ALGER

**Abstract :** Cet article présente une partie des résultats obtenus dans le cadre du projet de collaboration scientifique entre le Centre des Techniques Spatiales (CTS) et l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) initié en 2011 et clôturé en 2015 portant sur le développement par voie gravimétrique d'un modèle local du géoïde à l'échelle nationale et visant la modernisation du système de référence altimétrique en Algérie (NGA). Cette recherche a démontré clairement que l'utilisation conjointe des mesures GPS et du modèle préliminaire du géoïde est capable de fournir des altitudes orthométriques avec une précision acceptable et que cette alternative reste le seul moyen à envisager pour couvrir le territoire national en repère de nivellement.

Dans cet article, la technique de validation croisée a été utilisée conjointement avec la méthode de collocation par les moindres carrés pour détecter les mesures aberrantes présentes dans les 1355 mesures de gravité ponctuelles fournies par l'INCT. La validation a été appliquée aux anomalies de gravité à l'air libre résiduelles réduites de l'effet du modèle géopotential de référence EGM2008 développé jusqu'à l'ordre et degré 2190 et de l'effet du terrain estimé selon la réduction RTM (Residual Terrain Model). Le taux d'erreur détecté en utilisant cette procédure est de l'ordre de 7% pour une tolérance fixée à 20 mGals. L'analyse des statistiques montre, que des forts pourcentages des écarts se trouvent situés dans l'intervalle [-10 à +10] mGals. Il permet de conclure que les données gravimétriques INCT sont de bonne qualité, et par conséquent, elles peuvent être combinées avec d'autres données de sources différentes disponibles à l'échelle nationale, à condition de procéder à leur homogénéisation avant leur intégration.

**Mots clés :** Collocation par moindres carrés, anomalies de gravité, modèle géopotential, RTM.

## 1. Introduction

Les valeurs de la gravité jouent un rôle important dans la modélisation du champ de pesanteur terrestre qui est utilisé d'une façon permanente dans le calcul précis des orbites des satellites et dans diverses applications en océanographie et en navigation. Elles contiennent également des informations sur la distribution des masses à l'intérieur de la Terre (applications géophysiques), et dans le cas de mesures répétées au cours du temps, sur les variations temporelles de la Terre (applications géologiques). En outre, les problèmes de géodésie physique relatifs à la détermination par voie gravimétrique de la forme réelle de la terre sont formulés et résolus en termes d'intégrales étendues sur la terre entière. Ceci requiert la connaissance d'une manière continue la valeur de la pesanteur en tout point de la surface de la terre. En pratique, on mesure la pesanteur en quelques points seulement, donc il va falloir prédire sa valeur aux points autres que les points de mesure par le moyen d'interpolation et/ou d'extrapolation en utilisant une technique puissante. La gravité étant une quantité fondamentale en physique de la Terre, les mesures effectuées doivent être analysées et validées avant leur exploitation.

La validation des données est une procédure extrêmement stricte qui garantit la qualité et l'intégrité de la banque de données gravimétriques. Elle est appliquée systématiquement, avant intégration dans la banque, à tout ensemble de données, qu'il provienne de sources extérieures ou de nos propres mesures effectuées sur le terrain. Son principe consiste à faire une comparaison

entre les valeurs observées et prédites, estimées par une technique puissante. Dans cet article, la procédure de validation a été appliquée aux 1355 mesures de gravité ponctuelles fournies par l'INCT en utilisant la Collocation par les moindres carrés. Cette méthode à caractère statistique est considérée comme la seule technique capable de fournir, en plus de la valeur de prédiction, l'erreur sur cette estimation qui constitue une information capitale pour procéder à une analyse fiable et rigoureuse des résultats de prédiction obtenus.

## 2. Principe de la Collocation par les moindres carrés

Les premiers éléments de la théorie des moindres carrés sont dus à Legendre (1752-1833-) qui les a utilisés pour des traitements astronomiques portant sur le calcul des orbites des comètes. En 1809, le mathématicien Allemand Gauss (1777-1855) donne les premières bases probabilistes de cette méthode. Depuis d'autres mathématiciens et scientifiques comme Krüger, Tobey, Laplace et Markov ont essayé de généraliser cette méthode originale de traitement. Les applications de cette méthode en astronomie et géodésie reviennent aux travaux du géodésien allemand F. Helmert (1843- 1917).

L'avancée significative vient de Kalman en 1960, qui a étendu le champ d'application des moindres carrés en introduisant la matrice de variance covariance, en admettant que le vecteur des paramètres varie avec le temps à travers le second membre, et en résolvant le problème par pas. Cette manière de procéder a été utilisée et améliorée par d'autres auteurs tels que Fail, Tapley et Schutz. D'autres comme Uotila, Krakiwsky et Kouba ont montré que tout problème de moindres carrés peut être résolu en parties pour l'amélioration de l'estimation initiale par des termes correctifs.

Finalement les travaux indépendants de Krarup en 1969 et Moritz en 1972 ont joué un rôle important dans la modification et l'élargissement de la méthode initiale des moindres carrés que Moritz a dénommée, par la suite, méthode de collocation. C'est une méthode à caractère probabiliste qui permet d'obtenir les représentations locales les

plus probables du champ de pesanteur à partir d'une part, des données partielles disponibles qui peuvent être hétérogènes et d'autre part, de l'exploitation des propriétés statistiques des mesures et des signaux à estimer. Dans cette méthode, on estimera en plus du vecteur des paramètres, une variable aléatoire modélisable appelée "signal" qui exprime la différence entre la réalité et le modèle qui s'y adapte.

La méthode de la collocation par moindres carrés ne nécessite pas la connaissance d'un modèle mathématique précis auquel le signal obéirait. Cette particularité est intéressante en gravimétrie où les perturbations ( $\zeta, T, N, g, \dots$ ) dues aux accidents de relief sont considérées comme des quantités aléatoires.

La méconnaissance du modèle mathématique est palliée par une exploitation des propriétés statistiques du signal. On considère a priori le signal et les mesures  $\mathbf{I}$ , comme des grandeurs aléatoires de valeur moyenne nulle.

Soient  $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_q)^T$  le vecteur des observations  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_m)^T$  et le vecteur des signaux, deux quantités aléatoires centrées.

On considère également, les matrices de covariance suivantes :

$\mathbf{C}_{II} = \text{Cov}(\mathbf{I}, \mathbf{I}) = \mathbf{E}\{\mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^T\}$  : Matrice autocovariance des observations, de dimension  $\mathbf{q} \times \mathbf{q}$ ,

$\mathbf{C}_{sI} = \text{Cov}(\mathbf{s}, \mathbf{I}) = \mathbf{E}\{\mathbf{s} \cdot \mathbf{I}^T\}$  : Matrice des covariances croisées entre  $\mathbf{I}$  et  $\mathbf{s}$ , de dimension  $\mathbf{m} \times \mathbf{q}$ ,

$\mathbf{C}_{ss} = \text{Cov}(\mathbf{s}, \mathbf{s}) = \mathbf{E}\{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^T\}$  : Matrice autocovariance du signal, de dimension  $\mathbf{m} \times \mathbf{m}$

Où  $\mathbf{E}\{\cdot\}$  représente l'espérance mathématique.

Le problème consiste à trouver la meilleure estimation  $\hat{\mathbf{s}}$  du signal  $\mathbf{s}$  sur la base des données disponibles sachant que la dépendance entre  $\mathbf{I}$  et  $\mathbf{s}$  n'est pas exprimée par un modèle fonctionnel, mais uniquement par le biais des matrices de variance-covariance.

Une estimation linéaire du vecteur  $\mathbf{s}$  sera de la forme :

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{I} \quad (1)$$

Où  $\mathbf{H}$  est une matrice rectangulaire de dimension

$\mathbf{m} \times \mathbf{q}$  à déterminer de manière à minimiser chacun des termes diagonaux de la matrice de covariance de l'erreur ( $\boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}$ ), telle que :

$$\mathbf{C}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} = \text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{E}\{\boldsymbol{\varepsilon}.\boldsymbol{\varepsilon}^T\} = \mathbf{E}\{(\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}).(\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s})^T\} .$$

Les termes diagonaux de cette matrice représentent les variances  $\sigma_k^2$  de l'erreur, telle que :

$$\sigma_k^2 = \mathbf{E}\{\boldsymbol{\varepsilon}_k^2\} = \mathbf{E}\{(\hat{s}_k - s_k)^2\} .$$

L'expression du produit  $\boldsymbol{\varepsilon}.\boldsymbol{\varepsilon}^T$  est donnée par :

$$\boldsymbol{\varepsilon}.\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\mathbf{H}.\mathbf{l} - \mathbf{s})(\mathbf{H}.\mathbf{l} - \mathbf{s})^T = \mathbf{H}.\mathbf{l}.\mathbf{l}^T.\mathbf{H}^T - \mathbf{s}.\mathbf{l}^T.\mathbf{H}^T - \mathbf{H}.\mathbf{l}.\mathbf{s}^T + \mathbf{s}.\mathbf{s}^T ,$$

dont l'espérance mathématique fournit la matrice de covariance de l'erreur :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} &= \mathbf{E}\{\boldsymbol{\varepsilon}.\boldsymbol{\varepsilon}^T\} = \mathbf{H}.\mathbf{E}\{\mathbf{l}.\mathbf{l}^T\}.\mathbf{H}^T - \mathbf{E}\{\mathbf{s}.\mathbf{l}^T\}.\mathbf{H}^T - \mathbf{H}.\mathbf{E}\{\mathbf{l}.\mathbf{s}^T\} + \mathbf{E}\{\mathbf{s}.\mathbf{s}^T\} \\ &= \mathbf{H}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}.\mathbf{H}^T - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{H}^T - \mathbf{H}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{s}} + \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{s}} + (\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}).\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}.(\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1})^T \quad (3)$$

ceci depuis la relation :

$$\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{s}} = \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}^T = \mathbf{E}\{\mathbf{l}.\mathbf{s}^T\} .$$

L'expression (3) est constituée d'une partie constante  $\mathbf{A}$  et une partie  $\mathbf{B}$  qui dépend de  $\mathbf{H}$  telles que :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{s}} , \\ \mathbf{B} &= (\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}).\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}.(\mathbf{H} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1})^T \end{aligned}$$

La matrice  $\mathbf{B}$  est définie positive et par conséquent ses termes diagonaux sont toujours positifs. Pour que la variance de l'erreur de la matrice  $\mathbf{C}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}$  soit minimale, il faut choisir  $\mathbf{B}=\mathbf{0}$ , et on aura :

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}$$

Sous ces conditions, l'estimation optimale de  $\mathbf{s}$  est donnée par la formule :

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{H}.\mathbf{l} = \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}.\mathbf{l} \quad (4)$$

et sa matrice de covariance se réduit à :

$$\mathbf{C}_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} - \mathbf{C}_{\mathbf{s}\mathbf{l}}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{l}}^{-1}.\mathbf{C}_{\mathbf{l}\mathbf{s}} \quad (5)$$

### 3. Description de données gravimétriques fournies par l'INCT

Les mesures gravimétriques utilisées, dans le cadre de ce travail, ont été exécutées et fournies par l'INCT. Ce réseau dont la précision a priori est de 0.02 mGals, comporte 1355 points matérialisés, distants de 30 Km environ et nivelés par le procédé de nivellement de précision. Dans le calcul des anomalies à l'air libre correspondantes, nous avons appliqué une correction atmosphérique recommandée par l'Association Internationale de Géodésie pour éliminer l'influence des masses atmosphériques (IAG, 1971). La répartition géographique des mesures gravimétriques utilisées, dans le cadre de ce travail, est représentée sur la Figure 1. On notera la présence des vides dans la couverture gravimétrique du pays notamment dans ses parties sud et centrale qu'il conviendrait de les combler aussi bien pour satisfaire les besoins de la géodésie que ceux de la géophysique et de la géologie.

### 4. Procédure de validation

La collocation est en général appliquée localement, et on traite alors des quantités résiduelles (observations et signal) par rapport à une représentation en harmoniques sphériques du potentiel disponible jusqu'à un degré et ordre donnés. Dans ce contexte, et afin d'améliorer l'exactitude de l'interpolation, on peut diminuer la variabilité des anomalies gravimétriques en retranchant des anomalies de pesanteur la composante ver-

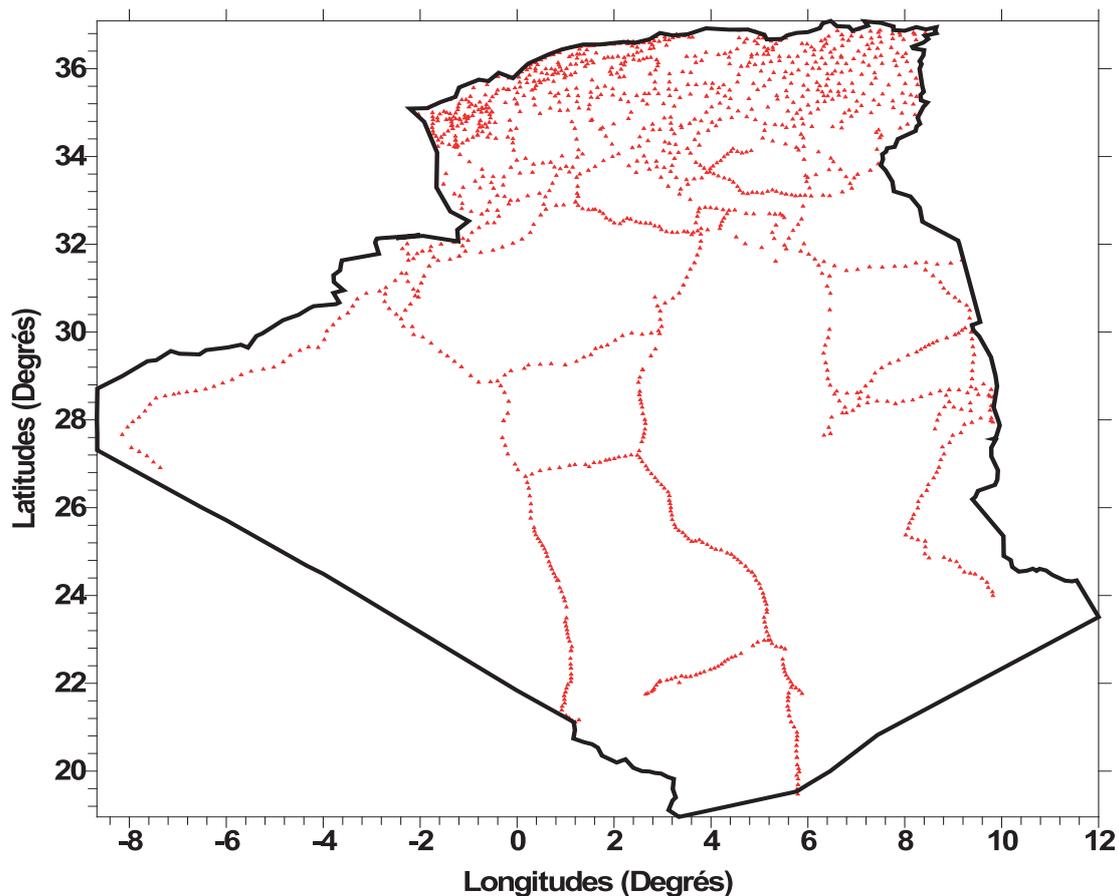


Fig. 1 Répartition géographique des mesures de gravité INCT.

ticale de l'attraction gravitationnelle du terrain. En outre, on peut modéliser les anomalies des zones lointaines et réduire le domaine d'intégration à une calotte de quelques centaines de kilomètres de rayon en utilisant un modèle de champ global à grande longueur d'onde développé en harmoniques sphériques. Au cours du calcul, les trois gammes de longueurs d'ondes (grandes, moyennes et petites) sont traitées séparément. Les grandes longueurs d'ondes, données par le modèle géopotential global, sont notamment soustraites des données locales afin d'isoler leurs composantes aux plus hautes fréquences. De même, les courtes longueurs d'ondes s'obtiennent par intégration numérique à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) dont la finesse du pas influencera la précision des calculs. En fonction de la disponibilité et des variations de la topographie, on choisira un pas de 5 à 1 km, voire mieux, et un débordement du MNT par rapport aux données gravimétriques d'au minimum

une demi-longueur d'onde caractéristique du modèle géopotential utilisé.

La technique utilisée est celle de retrait-restauration. La procédure de retrait consiste à retrancher des anomalies à l'air libre observées  $\Delta g_{FA}$  son contenu basse et haute  $\Delta g_{RTM}$  fréquences pour obtenir des anomalies résiduelles  $\Delta g_{res}$ .

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{GM} - \Delta g_{RTM}$$

Le modèle **EGM2008** développé en harmoniques sphériques jusqu'au degré et ordre 2190, a été adopté comme modèle de référence pour retirer les contributions des grandes longueurs d'onde sur les différents paramètres du champ de gravité Terrestre (Pavlis et al., 2012). Ce modèle est développé jusqu'au degré 2159 et qui contient des coefficients en harmoniques sphériques supplémentaires jusqu'au degré 2190 et ordre 2159 pour transformer les anomalies de hauteur en

ondulations du géoïde. EGM2008 a été obtenu à partir de la combinaison, au sens d'un ajustement par les moindres carrés, du modèle géopotential PGM2007B et d'un ensemble d'anomalies de pesanteur moyennes sur des cellules de 5 minutes d'arc ( $\approx 9$  Km à l'équateur). Les anomalies de pesanteur utilisées sont obtenues à partir des mesures gravimétriques terrestres sur les continents et de mesures d'altimétrie radar sur les satellites (GEOS-3 et SEASAT) au niveau des océans. Sa précision reste tributaire de la qualité des données intégrées dans sa détermination.

Les corrections de terrain ont été calculées selon le modèle résiduel de terrain (RTM) en utilisant deux grilles d'élévations MNE fin et large de résolution 15" x 15" et 30" x 30" ; dérivées à

partir des données SRTM, lesquelles ont été utilisées jusqu'à des distances de 20km et 100 km, respectivement. La surface de référence de résolution 5' x 5'; nécessaire pour la réduction RTM, a été formée à partir du MNE fin en utilisant le programme TCGRID du Logiciel **GRAVSOFT**. Soit  $\Delta g_{pred}$  l'anomalie prédite par la méthode de Collocation à partir d'un ensemble de valeurs  $\Delta g_{red}$ . Cette valeur est donnée par (Moritz, 1980) :

$$\Delta g_{pred} = C_{\Delta g} \cdot C^{-1} \cdot \Delta g_{res} \quad (6)$$

où  $C_{\Delta g}$  est le vecteur de covariance entre les observations  $\Delta g_{res}$  et les prédictions  $\Delta g_{pred}$ ,  $C$  est la somme de la matrice de covariance des quantités  $\Delta g_{res}$  et de la matrice de variance-covariance du bruit associé.

Les statistiques, en mGals, des données réduites sont résumées dans la Table 1.

**Table 1.** Statistiques des anomalies à l'air libre résiduelles (Processus de retrait).

Anomalies	Minimum	Maximum	Moyenne	$\sigma$
$\Delta g_{FA}$	-98.65	100.15	12.299	34.309
$\Delta g_{FA} - \Delta g_{EGM2008}$	-171.424	90.054	-2.204	20.166
$\Delta g_{res} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{GM2008} - \Delta g_{RTM}$	-116.242	89.756	0.410	18.928

Après l'opération de retrait, on obtient des anomalies résiduelles beaucoup plus lisses que les anomalies gravimétriques observées. Les anomalies résiduelles ainsi obtenues ont une variabilité (déviatoin standard) atténuée. La déviatoin standard des données se réduit de 34.309 mGals à 18.928 mGals (une réduction de 45%).

La validation a été appliquée aux anomalies à l'air libre résiduelles de l'INCT en utilisant la méthode de collocation par les moindres carrés dans laquelle, le modèle de Gauss-Markov

avec ses paramètres ajustés a été adopté comme modèle local de covariance pour exprimer la corrélation entre les données utilisées et les signaux à estimer. Les données résiduelles ont été divisées en deux ensembles disjoints A et B, à condition qu'ils aient la même distribution. Pour ce faire, un échantillonnage avec un pas de 15' sur ces données, a été effectué (il ne s'agit pas de valeurs moyennes). La distribution géographique des deux ensembles A et B est représentée sur la Figure 2.

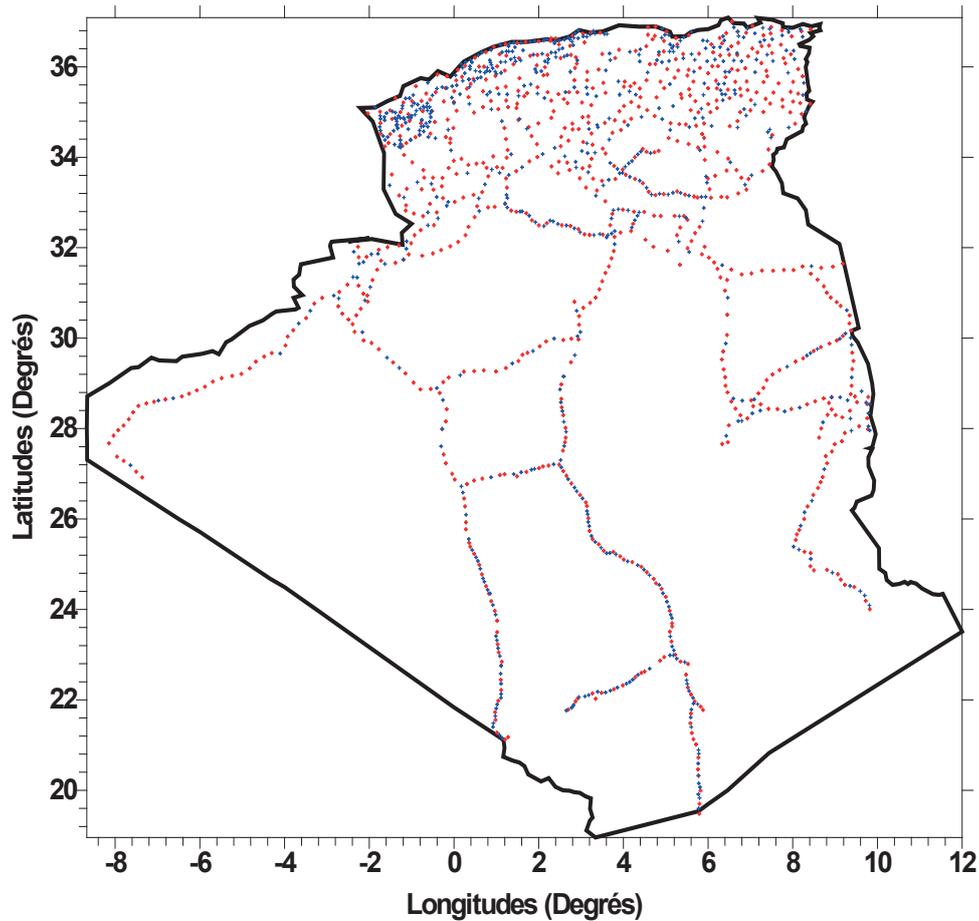


Fig. 2 Distribution géographique des deux ensembles A et B (A en Bleu et B en Rouge).

L'écart type des différences ( $\Delta \mathbf{g}_{\text{res}} - \Delta \mathbf{g}_{\text{pred}}$ ) est donné par :

$$\sigma^2(\Delta \mathbf{g}_{\text{res}} - \Delta \mathbf{g}_{\text{pred}}) = \mathbf{C}_0 - \mathbf{C}_{\Delta \mathbf{g}} \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\Delta \mathbf{g}}^T \quad (7)$$

où  $\mathbf{C}_0$  est la variance des anomalies de gravité. L'observation est considérée comme suspecte si (Tscherning, 1994) :

$$|\Delta \mathbf{g}_{\text{res}} - \Delta \mathbf{g}_{\text{pred}}| > k \cdot (\sigma^2(\Delta \mathbf{g}_{\text{res}} - \Delta \mathbf{g}_{\text{pred}}) + \sigma_{\Delta \mathbf{g}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Où  $k$  est une constante, généralement prise égale à 3 et  $\sigma_{\Delta}$  représente la variance des observations. Les valeurs prédites des anomalies de gravité de l'ensemble B ont été estimées à partir des données de l'ensemble A, puis comparées aux observations de l'ensemble B. La valeur de chaque prédiction est calculée à partir des 5 points les plus proches dans chaque quadrant, en utili-

sant le modèle de covariance de Gauss-Markov implémenté dans le programme **GEOGRID** du logiciel **GRAVSOFT** (Tscherning et al., 1992) et en ayant supposé une erreur de mesure de 0.2 mGals. Cependant, si la différence entre  $\Delta \mathbf{g}_{\text{res}}$  et  $\Delta \mathbf{g}_{\text{pred}}$  est supérieure à un seuil calculé pour chaque ensemble a posteriori selon la formule (8), alors, cette observation est rejetée. De même pour les données de l'ensemble A à partir de l'ensemble B. La procédure est répétée sans les observations erronées et sur tous les points des ensembles A et B. Alors, si la même observation est rejetée, on peut affirmer qu'elle est entachée d'erreur et par conséquent, elle sera éliminée automatiquement. Le taux d'erreur détecté en utilisant cette procédure est de l'ordre de 7% pour une tolérance fixée à 20 mGals. Il est de l'ordre de 2% pour une tolérance calculée de 40 mGals sur la base d'une précision de 0.2 mGals de la mesure. Il permet de conclure que les données

gravimétriques INCT sont de bonne qualité, et par conséquent, elles peuvent être combinées avec d'autres données de sources différentes disponibles à l'échelle nationale (à titre d'exemple, BGI, ENAGEO, .....etc.), à condition de procéder à leur homogénéisation avant leur intégration. Les statistiques des 1255 mesures validées sur 1355 mesures fournies par l'INCT, sont regroupées dans la Table 2. Les écarts entre les observations et les prédictions sont maximums, jusqu'au 20 mGals, dans les régions dépourvues de données. Les Figures 3 et 4 illustrent, respectivement, la distribution géographique des données validées et l'histogramme des différences entre les valeurs observées et celles prédites. Les pourcentages des écarts compris dans les intervalles

[-5 à +5] mGals et [-10 à +10] mGals sont de l'ordre de 58% et 83.1%, respectivement. Enfin, il faut noter que les résultats obtenus restent tributaires de la qualité et de la densité des données utilisées.

### 5. Conclusion

La gravité étant une quantité fondamentale en science de la Terre. Elle est utilisée, généralement, dans la modélisation du champ de gravité terrestre et dans diverses applications liées à la géodésie (détermination de la référence altimétrique ; Géoïde) et de géophysique (recherches minière et pétrolière). De ce fait, et avant son exploitation, cette donnée doit être corrigée des variations temporelles du champ de pesanteur Terrestre, ajustée, homogénéisée et validée dans le but de

Table 2. Statistiques des données validées [mGals]

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
$\Delta g_{res}$	-66.193	74.951	0.723	16.589
$\Delta g_{pred}$	-63.010	77.710	-0.422	15.247
<b>Différence</b>	-19.578	19.961	1.145	7.025

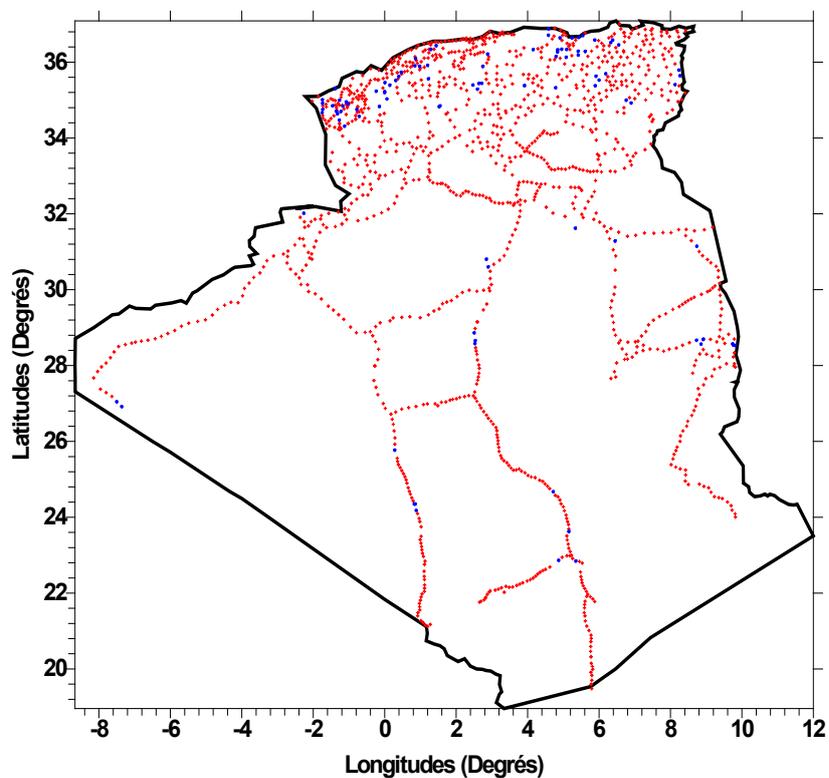
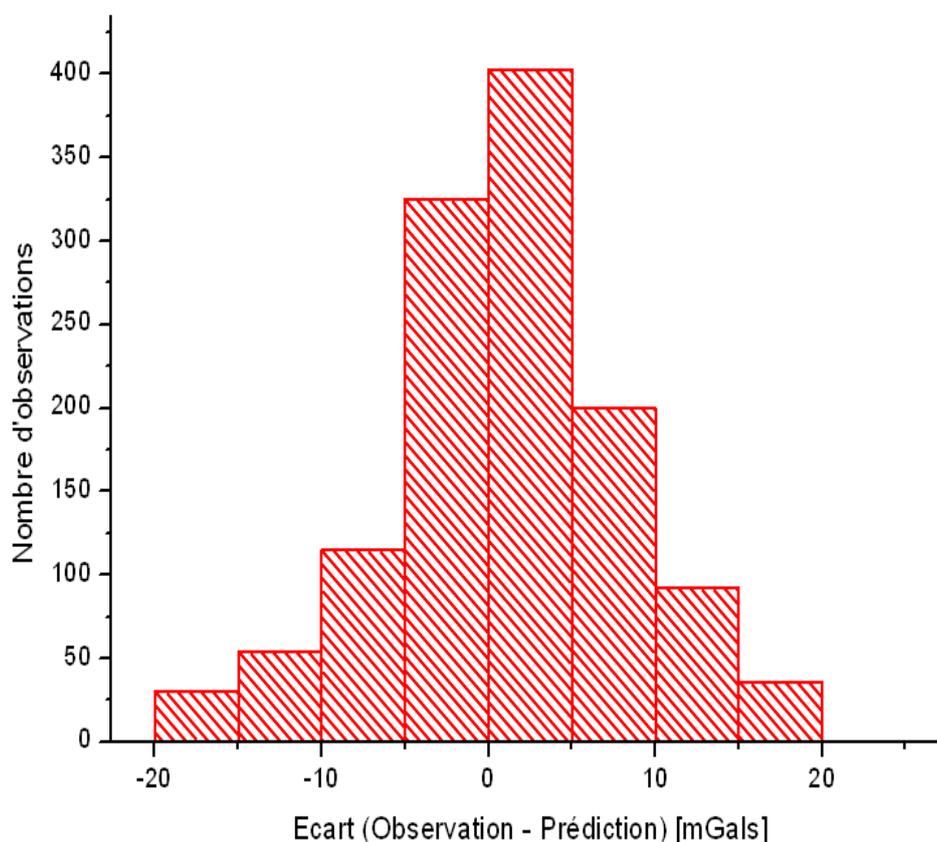


Fig. 3 Distribution géographique des données validées Acceptée (+), Douteuse (●)



**Fig. 4** Histogramme des différences entre observations et prédictions.

fournir un ensemble d'observations cohérentes.

Généralement, ces données sont hétérogènes issues de différentes campagnes d'observation et rattachées aux différents réseaux de base et mal géoréférencées, considérant les différentes techniques de détermination des coordonnées planimétrique et de l'altitude. Donc, il va falloir transformer toutes les mesures gravimétriques dans le même système de référence en utilisant des méthodes de transformation globales ou locales déterminées empiriquement.

La technique de validation croisée a été utilisée conjointement avec la méthode de collocation par les moindres carrés pour détecter les mesures aberrantes présentes dans les mesures de gravité ponctuelles fournies par l'INCT. Cependant et afin de réduire la variabilité des données gravimétriques utilisées, nous avons retiré des anomalies gravimétriques observées leurs hautes et basses fréquences. Pour ce faire, le nouveau et révolutionnaire modèle géopotential global

EGM2008 développé jusqu'au ordre et degré 2190 a été utilisé. En outre, et en l'absence d'un MNT réel et fiable et afin d'évaluer les effets de terrain sur les quantités gravimétriques, nous avons généré un MNE de résolution 15" x 15" à partir des données SRTM. Ce modèle a été employé pour retirer les principales irrégularités locales des données afin d'obtenir un champ lisse, homogène et plus approprié pour la modélisation du champ de pesanteur.

Le taux d'erreur détecté en utilisant cette procédure est de l'ordre de 7% pour une tolérance fixée à 20 mGals. Il est de l'ordre de 2% pour une tolérance calculée de 40 mGals sur la base d'une précision de 0.2 mGals de la mesure. L'analyse des statistiques montre, que des forts pourcentages des écarts se trouvent situer dans l'intervalle [-10 à +10] mGals. Il permet de conclure que les données gravimétriques INCT sont de bonne qualité, et par conséquent, elles peuvent être combinées avec d'autres données de sources

différentes disponibles à l'échelle nationale, à condition de procéder à leur homogénéisation avant leur intégration. Enfin, il faut noter que les résultats obtenus restent tributaires de la qualité et de la densité des données utilisées.

En perspective et afin de procéder à une validation rigoureuse de la donnée gravimétrique, nous suggérons quelques recommandations suivantes :

- Définir des critères stricts à des fins de validation,
- Utiliser un MNT digitalisé de haute résolution et de meilleure qualité au lieu du MNE dérivé à partir des données SRTM. Ceci pour contrôler, d'une part, la précision des altitudes des stations gravimétriques, et d'autre part, pour évaluer la correction topographique.
- Utiliser un modèle réel de densité dans les réductions gravimétriques et dans le nivellement au lieu d'une densité moyenne de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , généralement, employée.

### Références bibliographiques

- IAG, 1971. Geodetic Reference System 1967. Publication spéciale. N° 3 Bulletin Géodésique, Paris.
- Krarpup, T., 1969. A Contribution to the Mathematical Foundation of Physical Geodesy. Publication n° 44, Danish Geodetic Institute, Copenhagen.
- Moritz H., 1980. Advanced Physical Geodesy, H. Wichmann-Abazcus Press, Karlsruhe-Tundridge Wells.
- Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *J. Geophys. Res.*, 117, B04406, doi: 10.1029/2011JB008916.
- Tscherning C. C., 1994. Geoid determination by Least Squares Collocation using GRAVSOF. Lecture notes for the international school for the determination and use of the geoid, Milan, October.
- Tscherning, C. C., Forsberg, R., Knudsen, P., 1992. Description of the GRAVSOF package for geoid determination. Proceedings of First Continental Workshop on the Geoid in Europe, Prague, pp327 - 334.
-