P815

Geophysical Prospecting, 1981, 29, 782-789

TECHNIQUE DE MESURE ET D'INTERPRETATION MINIMISANT LES ERREURS DE MESURES EN MICROGRAVIMETRIE*

M. BICHARA, J.C. ERLING et J. LAKSHMANAN**

RESUME

BICHARA, M., ERLING, J.C. et LAKSHMANAN, J. 1981. Technique de Mesure et d'Interprétation Minimisant les Erreurs de Mesures en Microgravimétrie, Geophysical Prospecting 29, 782–789.

Les différentes sources d'erreurs de la mesure gravimétrique sont examinées. Leur connaissance a une importance particulière dans les prospections de surface, dites "microgravimétriques".

Les auteurs démontrent, expériences à l'appui, que toutes précautions prises, la source la plus fréquente d'erreurs de mesure en microgravimétrie est une mauvaise estimation de la dérive.

Les auteurs exposent alors un processus de mesure et d'interprétation dont le but est une meilleure estimation de la dérive. La justification théorique et expérimentale du processus est donnée. La méthode implique une prise de mesure suivant une répartition spatiale aléatoire ou semi-aléatoire. Un cas réel est décrit.

ABSTRACT

Different sources of error influence gavity surveys, particularly shallow "microgravity" surveys. Experiments show that the most frequent source of error in gravimetric prospecting is bad estimation of drift. Better control of drift exists with the field procedure and interpretation technique developed by the authors, as can be shown theoretically as well as experimentally. The method implies a random or semi-random spatial sequence of measurement points. A real case of field prospecting is described.

* Received April 1980, final revision April 1981.

** Compagnie de Prospection Géophysique Française, 77–79 Avenue Victor-Hugo, 92500 Rueil-Malmaison, France.

 0016-8025/81/1000-0782 $02.00

Introduction

En microgravimétrie, on est surtout concerné par l'analyse de l'anomalie résiduelle correspondant à de faibles profondeurs, donc à de hautes fréquences. Or, la valeur de cette anomalie résiduelle dépend largement de la précision de la mesure. D'où la nécessité dans certains problèmes d'atteindre des précisions extrêmes; ceci nous a amené à définir une méthodologie stricte de la prise de mesure, et du dépouillement de celle-ci, que nous exposons ci-dessous.

Les erreurs de mesure sont a priori aléatoires, et par suite leur élimination peut se faire par la reprise de la mesure plusieurs fois. Cela constitue évidemment la technique la plus sûre pour éliminer ces erreurs. Néanmoins, cette technique est très coûteuse, et nécessite, dans le cas où l'on désire une précision de l'ordre de 5 μGal (1 Gal = 1 cm/s^2), de reprendre en moyenne le même point deux et parfois trois fois. Or, une telle précision est dans certains cas nécessaire.

Nous avons donc été amenés à nous poser le problème de la provenance de ces erreurs de mesure. Un examen détaillé de nombreux chantiers réalisés par la C.P.G.F. nous a conduit à conclure qu'une bonne partie de ces erreurs était due à une mauvaise évaluation de la dérive. Les autres sources d'erreur que nous n'examinerons pas ici, sont par ordre d'occurrence décroissante (Seguin 1971):

— erreur de mesure topographique;
— erreur de correction de terrain;
— erreur dans l'estimation de la densité de surface;
— erreur de calcul.

Methodologie de prise de la mesure

Les recommandations générales (particulièrement pour le gravimètre Lacoste et Romberg, modèle D) sont les suivantes:

(a) Prendre la mesure avec l'appareil dirigé dans la même direction par rapport au nord magnétique.

(b) Prendre les mesures dans un laps de temps le plus court possible. Ainsi, il est préférable de prendre 60 mesures en une séance de 8 h qu'en deux séances de 4 h.

(c) Afin de minimiser l'influence des anomalies superficielles, prendre les mesures à une certaine hauteur (que l'on mesurera) du sol. Cela est possible si l'opérateur est muni d'une plate-forme adéquate.

(d) Prendre dans une même séquence, des stations ayant des altitudes les plus proches possible; comme l'ont montré McConnel, Hearty and Winter (1974), la précision des mesures est liée à l'importance de leurs variations.

(e) Prendre dans une même séquence de temps, des stations les plus éloignées possible dans l'espace, de sorte que la répartition finale des points dans l'espace, soit la moins corrélée possible avec le temps.

C'est ce dernier point (e) que nous explicitons ci-après, en nous basant sur le principe suivant: pour des mesures situées en des points suffisamment espacés, mais prises dans un même intervalle de temps, il n'existe aucune raison a priori pour que ces points se distinguent par la valeur de leur résiduel des points qui leur sont voisins dans l'espace, mais éloignés dans le temps.

Si ces points représentent des valeurs systématiquement différentes de leurs voisins, il faudrait conclure à une mauvaise interpolation de la dérive. La formulation mathématique de ce principe est donnée ci-dessous.

Bases Mathematiques

On suppose que les mesures sont prises suivant une maille rectangulaire régulière et suivant un ordre aléatoire ou semi-aléatoire.

Rappels et définitions

Notons par $g(x, y, t)$ la valeur de l'anomalie de Bouguer au point (x, y), t étant l'instant de la prise de mesure.

$$g(x, y, t) = Kg_m(x, y, t) + (0{,}3086 - 0{,}0418\sigma) \times (z - z_B) + \lambda(x, y) + C(x, y) - g_A(x_B, y_B, t)$$

où
K est le coefficient d'appareil,
g_m la valeur mesurée,
σ la densité adoptée,
z l'altitude du point (x, y),
z_B l'altitude du point base,
λ la correction de latitude,
C la correction de terrain,
g_A valeur à la base au même instant t, est défini par:

$$g_A(x_B, y_B, t) = Kg_m(x_B, y_B, t) + \lambda(x_B, y_B) + C(x_B, y_B).$$

x_B, y_B étant les coordonnées du point base, il est évident que si $g_m(x_B, y_B, t)$ est mal estimé à l'instant t, la valeur $g(x, y, t)$ serait, par la même, fausse.

Dans cette formulation, toutes les unités de longueur sont en mètres, toutes les valeurs de l'attraction gravifique, en centièmes de milligals.

La dérive $d(t)$ est définie par

$$d(t) = Kg_m(x_B, y_B, t).$$

$d(t)$ est une valeur estimée; nous désignons par $\delta(t)$ l'erreur sur $d(t)$.
Soit:
— $\delta g(x, y, t)$ l'anomalie résiduelle au point (x, y), t étant l'instant de prise de la mesure. Nous avons fait figurer le temps t comme argument pour tenir compte de l'erreur de dérive.

— $E(x, y)$ un estimateur de l'anomalie résiduelle au point (x, y). L'estimateur que l'on a adopté a été pris égal à la moyenne des cinq points entourant le point (x, y).

$$E(x, y) = (\delta g(x + \Delta x, y, t_1) + \delta g(x - \Delta x, y, t_2) + \delta g(x, y - \Delta y, t_3) + \delta g(x, y + \Delta y, t_4) + \delta g(x, y, t))/5,$$

où Δx, Δy représentent la maille de mesure en x et en y; t_1, t_2, t_3, t_4, t, les temps où ces mesures ont été effectuées.

Première hypothèse

Le lecteur constatera que le temps ne figure pas comme argument de l'estimateur E; ceci résulte du fait que t_1, t_2, t_3, t_4 et t étant très différents, l'erreur de dérive en ces temps est aléatoire; son estimateur est donc nul d'où, notre première hypothèse:

"Pour une séquence adéquate de la prise de mesure, l'estimateur $E(x, y)$ est indépendant du temps".

On définit alors $\mu(t)$ par

$$\mu(t) = E(x, y) - \delta g(x, y, t).$$

$\mu(t)$ est une fonction du temps qui devrait présenter un caractère aléatoire (bruit blanc) indépendant du temps. En effet, s'il n'y a aucune erreur de dérive, $\delta g(x, y, t)$ est le "vrai" résiduel au point (x, y) et $\mu(t)$ représente la différence entre une fonction et son estimateur en des points séparés dans l'espace.

Deuxième hypothèse. Soit $e(t)$ la valeur moyennée de $\mu(t)$ sur une fenêtre mobile de dimension ΔT:

$$e(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=j_0}^{i=j_0+K-1} \mu(t_i)$$

où les t_i appartiennent *à* l'intervalle $[t - \Delta T/2, t + \Delta T/2]$.

Notre seconde hypothèse est la suivante:

"$e(t)$ représente une estimation de $\delta(t)$" (erreur sur la dérive).

Cette hypothèse résulte de deux constatations:

(a) Si $\delta(t)$ est nul ou très petit, $\mu(t_i)$ étant à répartition aléatoire, $e(t)$ est (pour un ΔT adéquat) très petit.

(b) Si l'erreur sur la dérive $\delta(\tau) = \alpha =$ constante pour $\tau \in \,]t - \Delta T/2, t + \Delta T/2[$, $\delta(\tau) = 0$ pour τ à l'extérieur de cet intervalle.

Alors:

$$\delta g(x, y, \tau) = \delta g(x, y) \text{ vrai} + \alpha,$$

$$E(x, y) = E(x, y) \text{ vrai} + \alpha/5,$$

$$E(x, y) - \delta g(x, y, \tau) = E(x, y) \text{ vrai} - \delta g(x, y) \text{ vrai} + 4\alpha/5,$$

or $E(x, y)$ vrai $- \delta g(x, y)$ vrai a un caractère aléatoire, d'où le résultat que:

$e(t) \simeq 4\alpha/5$ qui représente une "estimation" de α.

Expérimentalement, on a procédé comme suit: Si $e(t)$ est petit $|e(t)| < \varepsilon$Gal on estime qu'au temps t, la dérive est correcte, autrement on modifie la dérive d'une quantité égale à

$e(t) - \text{signe}\,(e(t)) \cdot \varepsilon$Gal.

Une question se pose quant au choix de ΔT, et de la limite inférieure ε. En fait, le choix de ces paramètres dépend des conditions de la prospection. En particulier, ce choix dépend de la fréquence de prise de mesure pour ΔT et du soin pris à les effectuer pour ε. En microgravimétrie, la fréquence de prise de mesure est souvent de l'ordre de 8–10 mesures par heure, et le soin pris à les exécuter très élevé, d'où les valeurs adoptées de $\Delta T = 60$ min et de $\varepsilon = 0.3 \times 10^{-5}$ Gal. Dans le cas d'une prospection à grande maille, on prendra évidemment ΔT plus grand. Notons toutefois que l'application de cette méthodologie ne se justifie essentiellement que dans les cas où l'erreur admise est inférieure à 2 centièmes de milligals, et où l'espacement faible des points de mesure permet d'opérer suivant un ordre semi-aléatoire, c'est-à-dire en prospection microgravimétrique.

Traitement des Mesures (fig. 1)

Le traitement complet des mesures est un traitement automatique; néanmoins, un traitement manuel est toujours possible. Les calculs sont faits au fur et à mesure à l'aide d'un mini-ordinateur de chantier. Nous décrivons ci-dessous les points importants du traitement automatique.

L'utilisateur introduit les mesures brutes effectuées. Chaque point est détaillé par l'heure de prise de mesure, sa situation topographique, et la valeur de la mesure. L'ordinateur détecte alors les points repris, et détecte s'il s'agit de la base ou d'une sous-base. Une première estimation de la dérive est alors effectuée en tenant compte des tables luni-solaires et des lectures à la base.

On établit alors une première carte de Bouguer et une première carte de l'anomalie régionale par les méthodes classiques. La carte du résiduel de Bouguer étant déterminée par soustraction, on classe tous les points chronologiquement et on examine pour chacun la moyenne du résiduel des points pris dans un intervalle de temps de 60 min entourant ce point; si le nombre de points pris dans cet intervalle est suffisamment grand (> 8), et si de plus, la dispersion spatiale de ces points est assez grande, on examine la valeur de ce résiduel moyenné dans le temps; s'il est fortement négatif ou fortement positif, on conclut à une mauvaise estimation de la dérive, et on modifie alors la valeur de la dérive en ce point d'une quantité prise au plus égale au résiduel moyenné dans le temps, et limité par l'exigence d'une courbe de dérive possédant des propriétés de régularité suffisantes.

L'exemple donné dans la partie expérimentale ci-dessous est, nous le pensons, assez clair à ce propos.

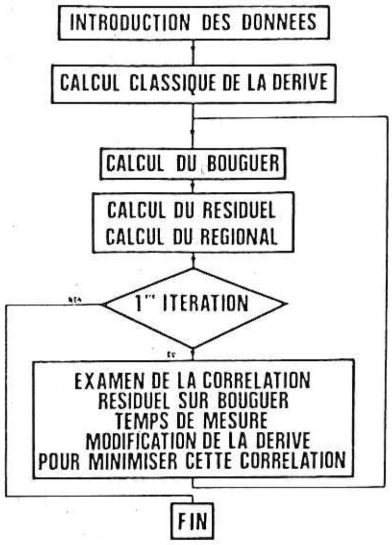

Fig. 1. Organigramme du traitement effectué.

Exemple Pratique

Cet exemple est volontairement simplifié afin que la compréhension du processus soit plus claire, en particulier, on raisonnera en une seule dimension au lieu de deux.

La fig. 2 représente un cas réel (C.P.G.F. étude 1500). Il s'agissait de mettre en évidence l'existence ou l'absence de vides sous une semelle d'un pont autoroutier, l'existence d'une cavité ayant été mise en évidence au cours de travaux. La cavité partiellement injectée se trouvait entre les points *M* et *O*.

L'ordre des prises de mesure était le suivant:

— base,
— *A*, *E*, *I*, *M*, *Q*,
— base,
— *C*, *G*, *K*, *O*,
— base.

Nous désignons par *I1* et *I2* respectivement, les intervalles de prise de mesure des points *AEIMQ* et *CGKO*.

La fig. 2 montre clairement que la valeur de la dérive dans l'intervalle *I1* est surévaluée, alors qu'elle est sous-évaluée dans l'intervalle *I2*. La technique d'interprétation de ce type de couverture alternée de la zone à prospecter permet d'éliminer ces erreurs de dérive.

Il est manifeste que si l'on avait effectué nos mesures dans l'ordre suivant: *ACEGI* puis *KMOQ*, on aurait conclu à l'existence d'une deuxième anomalie relative fictive (de l'ordre de 0,8 à 1 centième de milligal) aux points *EG*.

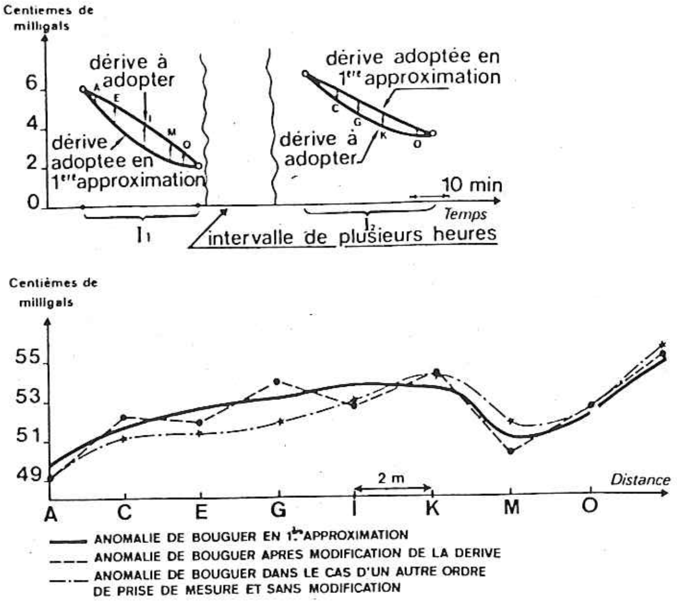

Fig. 2. Exemple de correction de dérive.

CONCLUSION

L'étude que nous avons entreprise nous a permis de systématiser un point de vue intuitif et une constatation expérimentale. La nouvelle méthode de prise de mesure que nous avons mise au point comprend:

— une répartition spatiale des points de mesure aléatoire ou semi-aléatoire
un processus de calcul itératif minimisant simultanément les variations de la dérive dans le temps et de l'anomalie résiduelle dans l'espace. Elle nous permet de réaliser des prospections microgravimétriques avec une précision meilleure que 10 μGal, sans avoir pour autant à reprendre un grand nombre de points. L'écart type entre points repris est couramment inférieur à 5 μGal.

Cette méthode nous a permis de réduire sensiblement le coût d'une prospection microgravimétrique, tout en assurant souvent une meilleure précision de mesure, en comparaison avec les résultats antérieurs. Elle est, bien entendu, limitée à la microgravimétrie, où l'écartement très faible entre points de mesure permet d'opérer suivant un ordre semi-aléatoire, et où la précision exigée est très grande.

ACKNOWLEDGEMENT

L'étude a été menée à bien grâce à l'aide du gouvernement français (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, décision d'aide n° 74.7.1406).

Bibliographie

SEGUIN, M. 1971, La Géophysique et les Propriétés Physiques des Roches, Presses de l'Université Laval, Québec, Canada.

McCONNELL, R.K., HEARTY, D.B. et WINTER, P.J. 1975, An evaluation of the Lacoste-Romberg mode D microgravimeter, Bulletin n° 36, Bureau Gravimétrique International, 1975.