

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène

Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En : science de la terre

Spécialité : Géophysique

Par : Rabah HAMIDI

Sujet

***DETERMINATION DU GRADIENT VERTICAL EN QUELQUES SITES DU RESEAU
GRAVIMETRIQUE ABSOLU***

Soutenu publiquement le : 12 Février 2015, devant le jury composé de :

M. A. BOURMATTE	Maitre de Conférences, à (USTHB)	Président
M. M. HAMOUDI	Professeur, à (USTHB)	Directeur de mémoire
M. A. BOUDELLA	Professeur, à (USTHB)	Examineur
M. M. IDRES	Professeur, à (USTHB)	Examineur
M. A. ABTOUT	Directeur de Recherche, au (CRAAG/ALGER)	Examineur

Remerciements

Tous mes remerciements et toutes les expressions de ma profonde et sincère gratitude s'adressent à mon directeur de mémoire, le Professeur HAMOUDI Mohamed, pour m'avoir encadré et conseillé tout au long de de la concrétisation de ce travail et qui m'a témoigné sa confiance et a suivi de près l'évolution de cette étude, avec patience.

Au moment où ce travail s'achève, il m'est un agréable devoir que de remercier tous ceux qui m'ont permis ou aider, de près ou de loin, de l'accomplir et de le mener à bien.

Je souhaiterais remercier chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font : Mr. A. BOURMATTE, d'avoir bien voulu présider ce jury, MM. A. BOUDELLA, A. ABTOUT, A. et M. IDRES d'avoir bien voulu accepter la responsabilité d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui m'ont initié ou appris la gravimétrie, que ce soit à l'INCT, au CRAAG, à l'USTHB (FSTGAT), au FHC, au CTS, à l'ORB (Belgique), à l'ECGS (Luxembourg) ou à l'IPGS (Strasbourg).

Je remercie également l'ensemble des personnes, à L'INCT et à la FSTGAT de tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Je n'oublie pas d'avoir une pensée pour mon défunt père qui n'a pas pu voir ce jour-là.

Enfin j'adresse mes chaleureux remerciements à toute ma famille, ma chère mère, mes chers sœurs et frères, ma femme, mes enfants (Med Abderraouf, Mustafa Abderrahim, Serine et Ahmed Sayed Ali).

Merci Mon Dieu

HAMIDI Rabah

SOMMAIRE

1. Introduction :	1
2. Travaux en Gravimétrie Absolue :	3
2.1. Description du gravimètre absolu FG5-111 :	3
2.1.1. Historique :	3
2.1.2. Conception : Composantes et Fonction :	3
2.1.3. Principe de Fonctionnement du Gravimètre Absolu FG5 :	4
2.2. Equation du mouvement de la chute libre :	5
2.3. Corrections géophysiques :	5
2.3.1. Marées terrestres :	5
2.3.2. Surcharge océanique :	5
2.3.3. Pression atmosphérique :	5
2.3.4. Mouvement du pôle :	6
2.4. Protocole de mesures :	6
2.5. Traitement des données :	7
2.5.1. Campagne 2001 :	7
2.5.2. Campagne 2012 :	22
2.5.3. Comparaison :	34
3. Travaux en Gravimétrie Relative :	36
3.1. Introduction :	36
3.2. Les Instruments de Mesure Relative :	36
3.2.1. Principe des Gravimètres à Ressort :	36
3.2.2. Les Gravimètres Astatés (ou instables) :	37
3.2.3. Description du système MVR (Maximum Voltage Rétroaction) :	38
3.2.3.1. Objectif du système MVR :	39
3.3. Etalonnage des gravimètres :	40
3.3.1. Fonction d'étalonnage :	40
3.3.2. Détermination de la fonction d'étalonnage	41
3.4. La dérive instrumentale :	45
3.4.1. Le calcul de la dérive :	46
3.5. Etude du Gradient Vertical par des Mesures Gravimétriques à deux Niveaux :	47
3.5.1. Le Modèle Mathématique :	47
3.5.2. Mesures Gravimétriques à deux niveaux différents :	48
3.5.3. Réduction des données :	49
3.5.4. Analyse de données (cas de Bechar) :	53
3.5.5. Rattachement	55
3.6. Interprétation :	56
4. Conclusions :	58
5. Bibliographie	59

1. Introduction :

Avec l'astronomie, les mathématiques, le géomagnétisme et la géodésie la gravimétrie est une discipline très ancienne. En effet, les premières tentatives de détermination de la pesanteur remontent aux années 1700 (Cazenave et Feigl, 1994). Jusqu'à l'introduction du Système International (SI), l'unité fondamentale officielle de la gravimétrie était le gal, en hommage à Galilée. Un gal correspond à l'unité d'accélération dans le système CGS ou encore à la force d'attraction d'une masse unitaire dans le même système : $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$.

Deux grandes familles d'instruments de mesure gravimétrique permettent d'appréhender la pesanteur sur Terre : les gravimètres absolus et les gravimètres relatifs. Les gravimètres absolus mesurent g en utilisant des standards métrologiques de longueur et de temps. Les premiers gravimètres absolus étaient des pendules simples, la valeur de g est en effet liée à la longueur du fil pendulaire et à la période d'oscillation.

Depuis le milieu du siècle dernier, les gravimètres absolus à chute libre, ou balistiques, ont pris le pas sur les gravimètres pendulaires. Le principe de ces instruments est de déterminer g à partir de la trajectoire d'un objet (sa position en fonction du temps), les distances et les temps étant reliés à des étalons S.I. (Faller, 1965 ; Niebauer et al, 1995)

La figure ci-après, tirée de Torge (1959) et publiée par Tanner et al. (1982), montre l'évolution de la précision des mesures de la pesanteur depuis plus de 3 siècles.

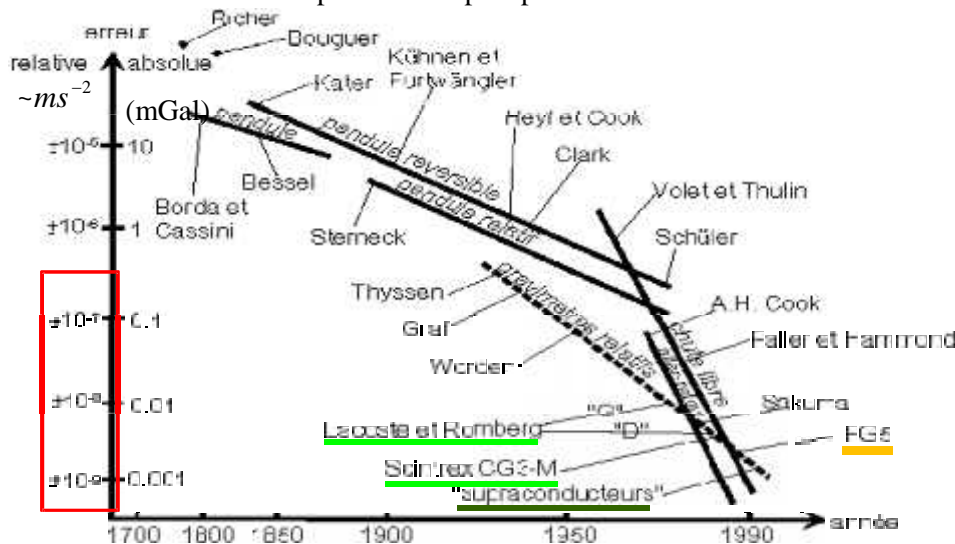


Figure 1. Précisions relative et absolue en mGal des gravimètres depuis le 17^{ème} siècle, d'après Torge (1989) et Niebauer (1995).

En effet, grâce aux progrès réalisés ces dernières années en métrologie, les gravimètres absolus sont arrivés à une précision de quelques 10^{-9} pour des mesures effectuées en stations fixes. Evidemment les gravimètres de ce type demeurent encore très coûteux et exigent beaucoup de soins des opérateurs qui les utilisent.

Les gravimètres relatifs, sont pour la plupart basés essentiellement sur l'utilisation de ressorts. Les gravimètres les plus performants, de type LaCoste & Romberg (ressorts), sont limités à une précision de l'ordre de 10^{-8} ($\pm 10 \mu\text{Gal}$) sur des différences de pesanteur ajustées par moindres carrés entre stations distantes de quelques dizaines de kilomètres. Ils sont, en gravimétrie, les instruments les plus maniables et les plus économiques.

A l'instar d'autres pays, en Algérie, plusieurs travaux gravimétriques ont été effectués par des organismes publics ou privés, que ce soit pour le compte des travaux géodésiques en réalisant des

réseaux gravimétriques ou pour la prospection gravimétrique par la réalisation des grilles selon les besoins.

Parmi ces travaux citons brièvement ceux de Lagrula (1951) qui avait réalisé pour la première fois un réseau de bases gravimétriques de premier ordre composé de 59 stations. Les mesures ont été effectuées grâce au pendule inversé de Holweck-Lejay dont la précision était de 0.2 à 0.3 mgal (Lagrula, 1951). Les travaux de Idres (1983) ont permis d'implanter un réseau de bases gravimétriques composé de 74 stations. Pour cela, deux gravimètres relatifs de type Worden (le N° 774 et le N° 1112) ayant une précision de 0.01 mgal ont été employés. La campagne gravimétrique de Zerdazi en 1986, pour le compte de l'EREM, a permis d'améliorer, au moins régionalement la couverture gravimétrique. Ce travail repose sur presque 7896 points observés dans la région du Mole d'Ain M'Lila et couvre une surface de 29500 km².

De nombreux levés gravimétriques ont été réalisés pour le compte de compagnies minières et/ou pétrolières mais d'extensions limitées et ne couvrent pas l'ensemble du territoire. En l'absence de réseau d'ordre zéro, aucune homogénéisation des données ne peut être fiable. Ce n'est qu'en 2001 qu'un tel réseau a vu le jour.

Le présent mémoire a pour objet de présenter les résultats de traitement de deux campagnes gravimétriques absolues. La campagne de 2001 contient 12 stations absolues où la mesure de la pesanteur a été réalisée à l'aide du gravimètre FG5-111, avec une précision moyenne des mesures de 1.5 µGal. Celle de 2012 contient 3 stations absolues où la mesure de la pesanteur a été réalisée à l'aide du gravimètre FG5-206 avec une précision moyenne des mesures de 1.2 µGal également. Compte tenu du fait que le gravimètre absolu FG5 donne la valeur de g à une hauteur de 130 cm, le rattachement du réseau absolu au sol doit être effectué à l'aide de la détermination du gradient vertical. Pour cela, nous avons utilisé les gravimètres relatifs de type LaCoste & Romberg model G de l'INCT notamment le G1140, le G1152, le G856 et le G857 équipés du système électronique MVR (Maximum Voltage Retroaction).

La comparaison des résultats de mesures absolues des deux campagnes 2001 et 2012 permet, entre autre, de suivre l'évolution temporelle du champ gravitationnel bien qu'en 2012 la réobservation n'a été réalisée qu'en trois points parmi les douze stations du réseau absolu initial. Les données du réseau absolu pourront toujours être exploitées lors d'études aussi bien géodésiques que géophysiques.

Le présent manuscrit est structuré en deux chapitres. Ainsi, le premier chapitre est consacré à la présentation du réseau gravimétrique absolu réalisé avec les gravimètres FG5-111 et FG5-206 et à leurs caractéristiques techniques, aux différentes corrections appliquées avant d'aboutir à une mesure absolue en une station quelconque. Dans ce chapitre sont décrites les deux campagnes de 2001 et 2012 ainsi que les traitements des mesures collectées. Le second chapitre est consacré à la gravimétrie relative. Y est décrit le gravimètre de type LaCoste & Romberg model G équipé du système MVR. Cette partie décrit également l'étalonnage des gravimètres et les différentes corrections, ainsi que l'étude du gradient vertical (VG) grâce à des mesures gravimétriques à deux niveaux. Le modèle mathématique utilisé, la réduction des données, leur analyse et leur interprétation, sont par ailleurs décrits. La présentation des résultats de traitement et la comparaison des données gravimétriques absolues des deux campagnes de 2001 et 2012 sont aussi décrites dans cette partie. Le mémoire s'achève par des conclusions.

2. Travaux en Gravimétrie Absolue :

En 2001, l'Algérie s'est dotée d'un réseau de gravimétrie absolu, qualifié de réseau d'ordre zéro. Pour cette campagne la précision moyenne des mesures est de $1.5 \mu\text{Gal}$. La durée moyenne d'occupation est de l'ordre de 14 heures en chaque point du réseau, pour les douze (12) sites absolus. Un site supplémentaire a été installé pour l'étalonnage des gravimètres au niveau du CFP, à Alger (Bologhine).



Figure 2 : Répartition Géographique des stations du réseau Gravimétrique Absolu de l'Algérie (carte INCT)

2.1. Description du gravimètre absolu FG5-111 :

2.1.1. Historique :

Le gravimètre absolu FG5 est une nouvelle génération de gravimètre basée sur la technologie développée au cours des trente dernières années par James Faller et ses collègues du National Institute of Standards and Technology (NIST). Débutant avec un système interférométrique, en lumière blanche, établi en 1962, Faller et ses collègues ont sans cesse amélioré la conception des instruments en y utilisant la lumière cohérente. Ce gravimètre avait été le résultat de collaborations entre différentes institutions internationales.

2.1.2. Conception : Composantes et Fonction :

Le system FG5 (voir Figure 3) se compose de :

- Une chambre à vide, pour la chute libre,
- Un interféromètre à Laser Hélium-Néon (He-Ne),
- Un ressort dit 'superspring',
- Un contrôleur de système,
- L'électronique.



Figure 3 : Le gravimètre absolu FG5-111 (station absolue du CRAAG)

Le gravimètre absolu FG5 est un instrument transportable qui mesure l'accélération verticale de la pesanteur (g), avec une précision et une exactitude élevées. Une masse en forme de coin de cube est en chute libre à l'intérieur de la chambre à vide. L'interféromètre est utilisé pour surveiller la position de cette masse en chute libre. Le ressort appelé 'superspring' est un dispositif d'isolement utilisé pour fournir une référence pour la mesure de la pesanteur. Un ordinateur (contrôleur du système) permet une interface utilisateur flexible. Il commande le système, l'acquisition des données, leur analyse, et enfin l'enregistrement des résultats.

2.1.3. Principe de Fonctionnement du Gravimètre Absolu FG5 :

Le mode opératoire du FG5 est simple dans son concept (Niebauer et al. 1995). Une masse de test (coin de cube) est lâchée verticalement sur une distance d'environ 20 centimètres par un dispositif mécanique dans la chambre à vide (voir Figure 4). Le FG5 utilise un interféromètre à laser He-Ne pour déterminer exactement la position de la masse d'essai (coin de cube) durant sa chute libre. L'accélération de la masse est calculée directement à partir de la trajectoire mesurée.

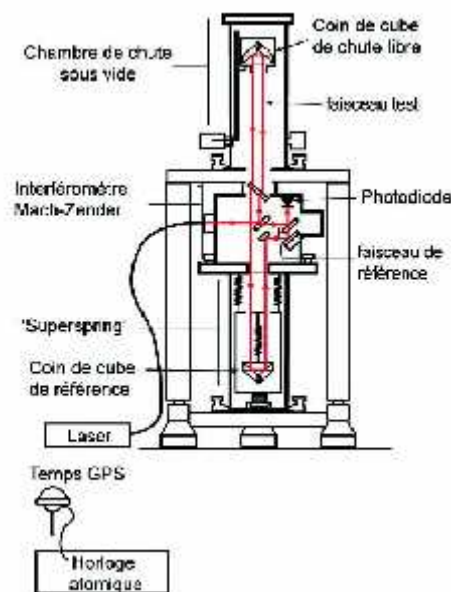


Figure 4 : Principe de fonctionnement du FG5 d'après Niebauer et al. (1995), modifié par Jacob (2010).

L'interféromètre à laser produit des franges optiques d'interférence durant la chute de la masse. Les franges sont comptées et chronométrées à l'aide d'une horloge atomique pour obtenir des paires précises (temps, distance). Ces données sont ajustées à une trajectoire parabolique et déterminent une valeur mesurée pour g . Cette méthode de mesure est absolue car elle est purement métrologique et se fonde sur des normes de longueur et de temps. La mesure de la distance est donnée par la fréquence stabilisée du laser Néon-Hélium (He-Ne) utilisé dans l'interféromètre. Une horloge atomique à rubidium fournit la mesure du temps utilisé pour la synchronisation précise.

2.2. Equation du mouvement de la chute libre :

L'équation générale du mouvement de la chute libre est donnée par l'expression suivante :

$$z(t) = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g_0 t^2 + \frac{1}{6} \chi v_0 t^3 + \frac{1}{24} g_0 \chi t^4 + \dots$$

Où : (t_i, z_i) sont les 700 observations de temps et position durant la chute libre.

z_0 (Position initiale), v_0 (vitesse initiale) et g_0 : (valeur de la pesanteur à la position initiale) sont les trois paramètres à estimer. Des 700 franges d'interférence, seules les franges 30 à 630 sont réellement utilisées pour calculer la trajectoire de la masse.

Une fois la valeur de la pesanteur estimée à la position initiale, différentes corrections géophysiques sont appliquées aux mesures afin d'établir la valeur absolue du champ au point de mesure.

2.3. Corrections géophysiques :

2.3.1. Marées terrestres :

Les mouvements relatifs de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre provoquent une variation de l'amplitude et de la direction de la pesanteur à la surface de la Terre (Melchior, 1983). Cette variation temporelle de la pesanteur est directement reliée aux positions de la Lune et du Soleil. Il faut considérer trois effets :

- l'attraction directe des deux astres ;
- la déformation élastique de la Terre ;
- la redistribution de masse à l'intérieure de la Terre.

Les valeurs de marées terrestres ont été obtenues par l'utilisation du modèle ETGTAB de calcul réalisé par Wenzel (1996), permettant de calculer ces données en fonction de la latitude et longitude du site d'étude.

2.3.2. Surcharge océanique :

Les effets de surcharge océanique sont calculés suivant la méthode décrite dans le papier de Farrell (1972). Cette méthode est donnée par la relation de Donghui et al. (1999) :

$$u g_{load} = \sum_j f_j A_j \cos(\check{S}_j t + t_j + \sim_j - \Phi_{cj})$$

Avec :

- A et Φ : sont respectivement l'amplitude et la phase
- f et \sim : sont les paramètres qui dépendent de la longitude du nœud lunaire.
- t : est l'argument astronomique de la marée.

2.3.3. Pression atmosphérique :

Les variations de la pression atmosphérique sont dues à la redistribution permanente des masses dans l'atmosphère. L'expression utilisée pour calculer l'effet de la pression atmosphérique est la suivante :

$$C_p = A(P_0 - P_n)$$

Avec C_p = correction de la pression atmosphérique (μGal)

A = facteur d'admittance de la pression atmosphérique. La valeur dépend de chaque station et est comprise entre 0.30 et 0.42 $\mu\text{Gal}/\text{mbar}$. Nous utiliserons la valeur de 0.3

$\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ suivant les recommandations de l'Association Internationale de Géodésie (Résolution N°8, 1983).

P_0 = pression atmosphérique mesurée (mbar)

P_n = pression nominale au site qui se calcule suivant :

$$P_n = 1013.25 \left(1 - 0.0065 \frac{h_m}{288.15} \right)^{5.2559}$$

Avec P_n = pression nominale (mbar)

h_m = altitude par rapport au niveau de la mer (m)

2.3.4. Mouvement du pôle :

Le pôle de rotation de la Terre décrit à la surface un mouvement circulaire d'une amplitude d'une vingtaine de mètres et de périodes principalement journalières, annuelles et de 430 jours (Période de Chandler). En raison de ce mouvement, la latitude d'un point à la surface de la Terre varie en fonction de la position du pôle. Cela entraîne une modification de l'accélération centrifuge et donc de la pesanteur. Les corrections ne dépassent pas en général plus de $\pm 5 \mu\text{Gal}$ (dépendant de la latitude du point considéré) (Francis, 2001). La position du pôle est déterminée pour chaque jour par l'IERS (International Earth Rotation Service) par des techniques spatiales. Les valeurs sont en accès libre sur le site Web de l'IERS. L'expression analytique de cette correction (Wahr, 1985) est donnée par :

$$u_g = -1.164 \dot{S}^2 a^2 \sin \{ \cos \{ (x \cos \} - y \sin \})$$

Avec : u_g = correction pour le mouvement du pôle (μGal)

S = vitesse angulaire de la rotation de la Terre (radian/seconde)

a = rayon équatorial de l'ellipsoïde de référence (m)

$\{$ = latitude de la station

$\}$ = longitude de la station

x, y = coordonnées du pôle suivant la convention de l'IERS (radian)

2.4. Protocole de mesures :

Le gravimètre est piloté par ordinateur. La séquence de mesures est programmée par l'opérateur. En général, l'intervalle de temps entre deux mesures consécutives est de 10 secondes. La chute libre se fait sur une distance de l'ordre de 20 cm et dure environ 0.175 seconde. Durant la chute libre, le gravimètre FG5-111 fournit en moyenne 400.000 franges d'interférence dont 700 sont enregistrées sur le disque dur de l'ordinateur.

On effectue 100 mesures qui forment un set. Notons qu'il faut presque 17 minutes pour obtenir un set de 100 mesures avec un temps d'échantillonnage de 10 secondes.

2.5. Traitement des données :

Toutes les mesures qui ont été effectuées lors de la campagne 2001 ont été retraitées, dans ce travail, par le même logiciel qui a été utilisé lors de la campagne de 2012. Ce logiciel g7, est fourni par le constructeur Micro-g Solutions de l'instrumentation absolue.

Ce logiciel de traitement donne des résultats par set (1 set = 100 chutes). Ce qui m'a conduit à traiter les données des quatre stations du CRAAG, de Bechar, de Ghardaïa et d'Oran, par chute, de façon à utiliser la loi de distribution normale des valeurs obtenues afin d'éliminer les observations erronées et tenir compte uniquement des bonnes observations. Ceci permet d'obtenir de meilleurs résultats.

Les valeurs de pesanteur sont systématiquement corrigées des quatre effets géophysiques décrits précédemment. Chaque valeur de série (set) représente la moyenne arithmétique des chutes individuelles (drop). L'écart-type des valeurs de série est pris comme incertitude sur la détermination finale de g.

2.5.1. Campagne 2001 :

- Site d'Alger (CRAAG) :

Au laboratoire de gravimétrie du CRAAG, et comme étant la station de référence historique, les observations ont été effectuées en deux sessions s'étendant sur presque 43h 3mn 30sec. La première session d'observations a commencé le Samedi 07 avril 2001 à 14h, jour d'installation du gravimètre jusqu'au 09 avril 2001 à 6h30min. Elle a duré 40 heures sans arrêts et a permis la réalisation de 44 sets repartis sur trois (03) jours de travail ce qui donne 4400 valeurs de g. La deuxième session d'observation a été effectuée le Dimanche 15 avril 0 14h jusqu'à 17h, elle a duré 3h 3min 30sec avec la réalisation de 6 sets ce qui donne 600 valeurs de g. L'ensemble de g (μGal) obtenus à l'aide du gravimètre FG5-111 au niveau du site absolu du CRAAG est 5000.

La distribution des données de g (μGal) pour la station absolue du CRAAG pour l'ensemble des 5000 valeurs de g fournies par le FG5-111 en fonction du nombre d'observations est représentée dans la figure suivante :

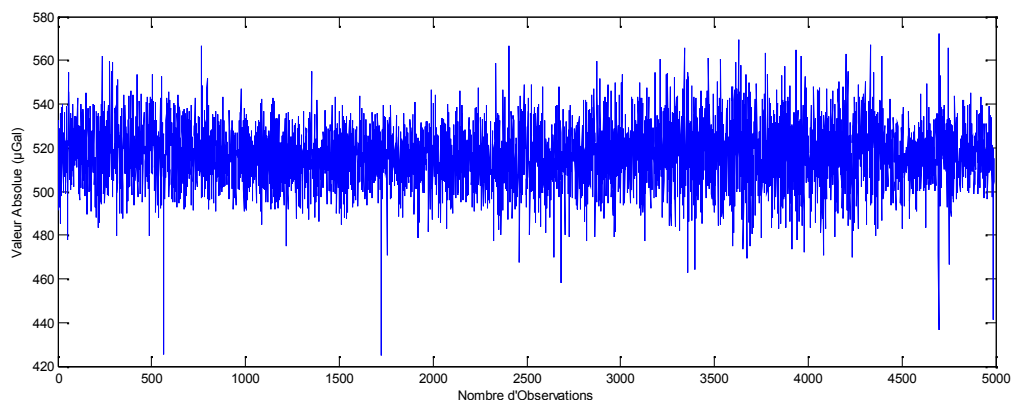


Figure 5 : Données brute du FG5-111 à la station de Bouzareah (CRAAG, Alger).

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 424.8 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 572.4 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 147.6 \mu\text{Gal},$$

Ainsi que l'ordre de précision = $\pm 14.3 \mu\text{Gal}$,

Nous constatons que ces paramètres sont très élevés notamment l'ordre de précision, ceci nous a conduit à traiter les données brutes de la station absolue du CRAAG de façon à minimiser ces paramètres afin d'obtenir la valeur absolue moyenne de g (μGal) la plus précise possible.

Après avoir éliminé les valeurs aberrantes, les résultats de la distribution normale des données de g en fonction du nombre d'observations sont représentés dans la figure suivante :

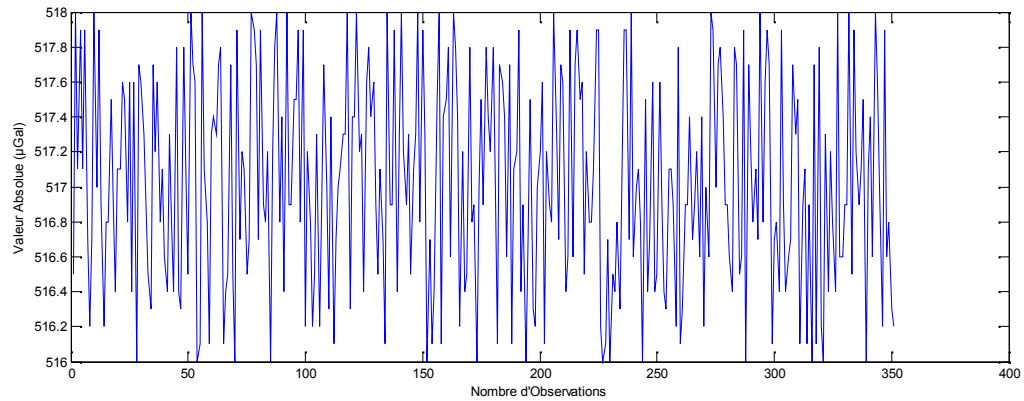


Figure 6 : Données traité du FG5-111 à la station de Bouzareah (CRAAG, Alger).

Les résultats obtenus sont :

$$g_{\min} = 516 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 518 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 2 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 0.6 \mu\text{Gal}$,

Il est aisé de constater que la sélection des mesures permet d'obtenir des valeurs de g avec une précision meilleure que celle fixée par les normes d'usine du Gravimètre absolue FG5-111 et qui est de l'ordre de $1 \mu\text{Gal}$.

Les résultats de traitement des données de la première session avec les deux différentes valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal/cm}$ puis $3.086 \mu\text{Gal/cm}$ en utilisant le logiciel $g7$ fournie par Microg Solution sont représentés dans les figures suivantes :

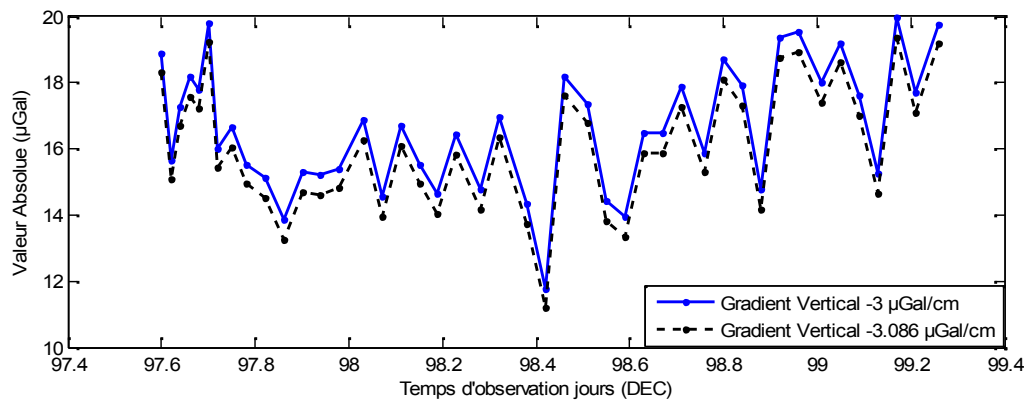


Figure 7 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

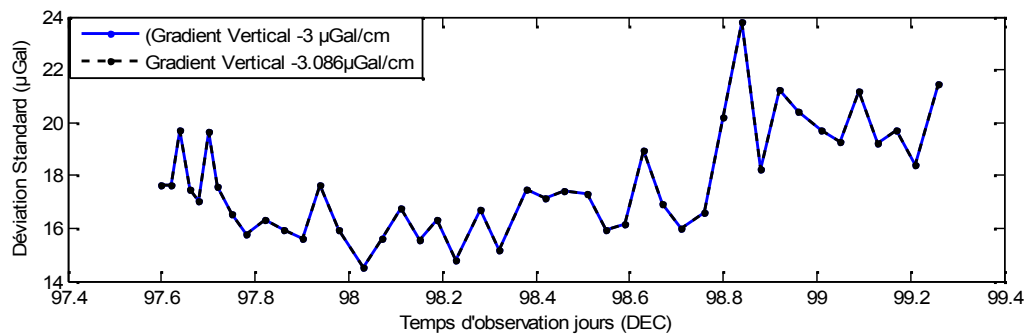


Figure 8 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical -3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical -3.086 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	16.6	16.04
Déviati on Standard (μGal)	1.9	1.9

Tableau 1 : Résultats de traitement avec le g7 (site du CRAAG)

- Site d'Adrar :

A Adrar, les observations ont été effectuées en une seule session s'étendant sur presque 8h. Les observations ont commencé le 26 avril 2001 à 22h27min10sec, jour d'installation du gravimètre jusqu'au 27 avril 2001 à 5h40min30sec. Durant cette période, 19 sets ont pu être réalisés.

les résultats de traitement des données au niveau de la station d'Adrar avec les deux différentes valeurs du gradient vertical de -3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ et -3.086 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures ci-dessous :

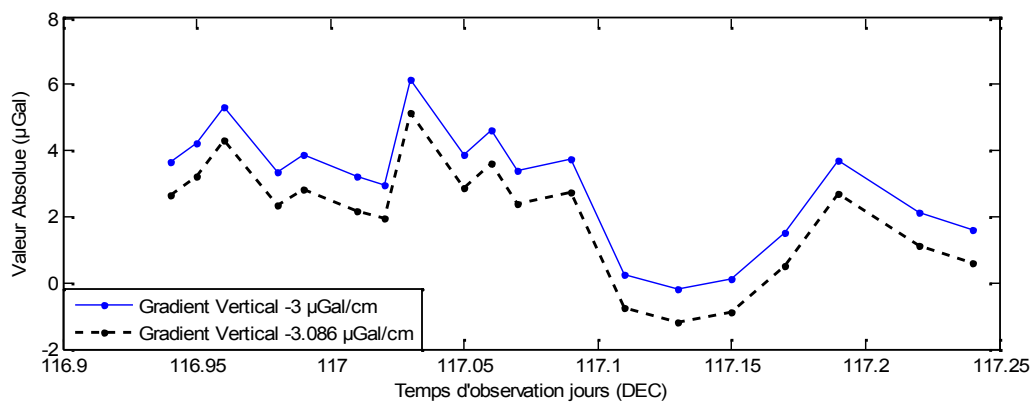


Figure 9 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

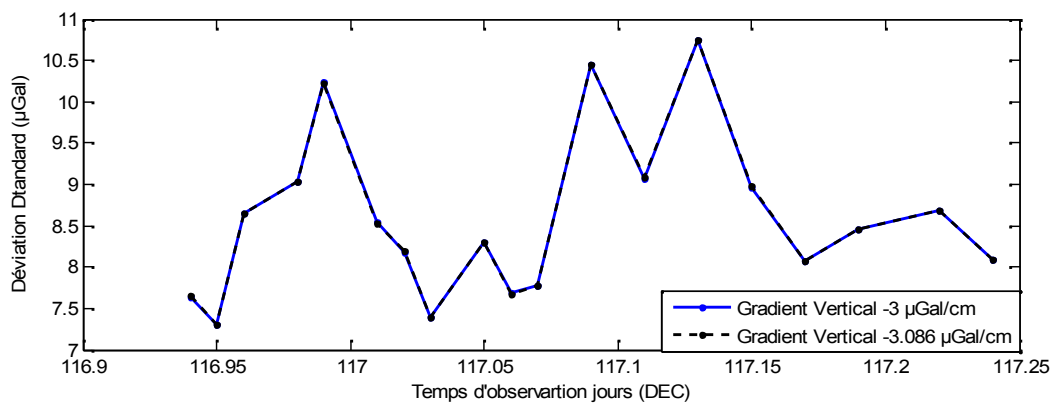


Figure 10 : Déviati on standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical -3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical -3.086 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	3.0	2.0
Déviati on Standard (μGal)	1.7	1.7

Tableau 2 : Résultats de traitement avec le g7 (site d'Adrar)

- Site de In Amenas :

A In Amenas, les observations ont été effectuées en une seule session d'une durée d'environ 1h. Les observations ont commencés le 12 avril 2001 à 16h28min17sec jour d'installation du gravimètre jusqu'à 17h28min21sec, avec la réalisation de 3 sets.

les résultats du traitement des données de la station d'In Amenas avec les deux différentes valeurs du gradient vertical : $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

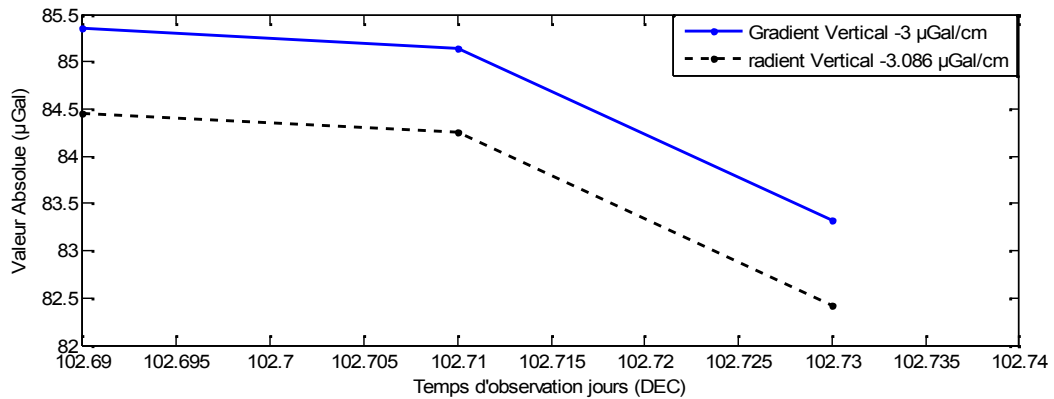


Figure 11 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

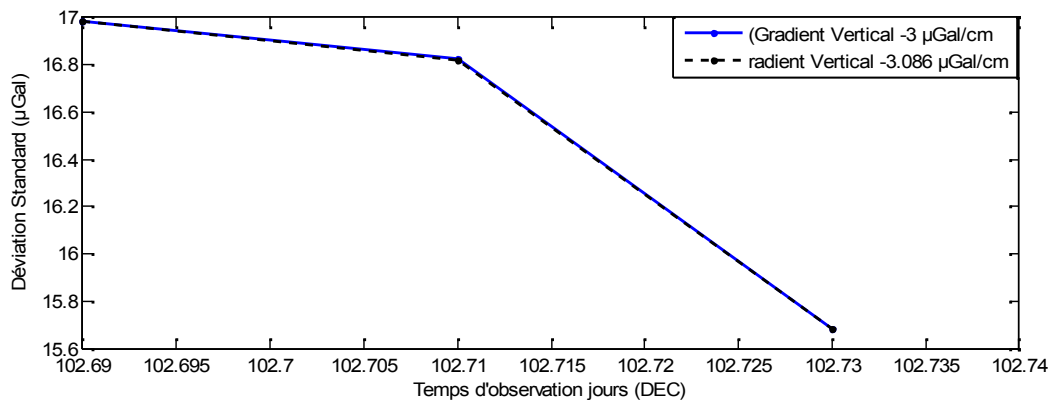


Figure 12 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	84.6	83.7
Déviation Standard (μGal)	1.1	1.1

Tableau 3 : Résultats de traitement avec le g7 (site d'In Amenas)

- Site de Bordj Badji Mokhtar :

A Bordj Badji Mokhtar, les observations ont été effectuées en une seule session s'étendant sur presque 10h. Les observations ont duré du 25 avril 2001 à 22h53min06sec, au 26 avril 2001 à 08h08min11sec. Durant cet intervalle de temps 24 sets ont pu être réalisés.

Comme pour les stations décrites ci-dessus, les résultats du traitement des données avec les deux différentes valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

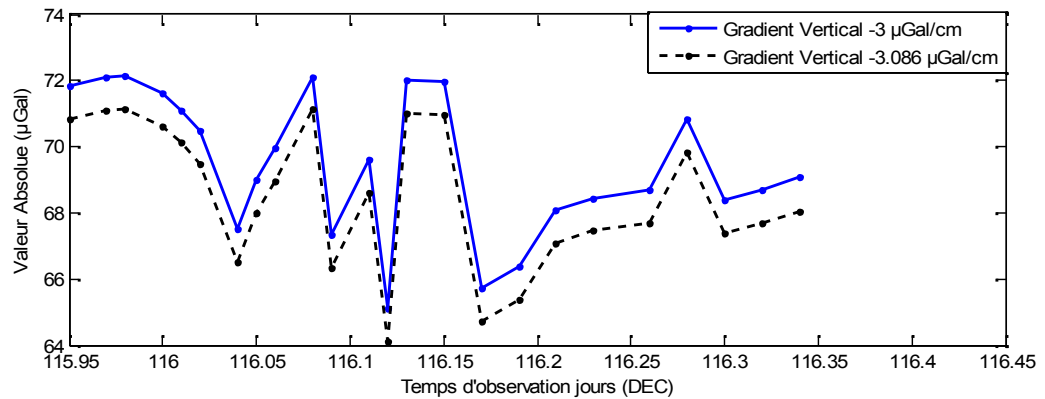


Figure 13 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

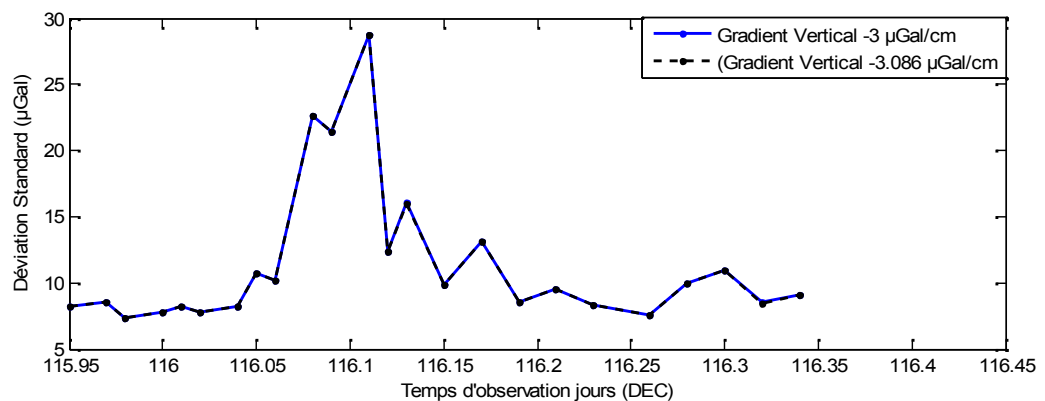


Figure 14 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	69.5	68.5
Déviatiion Standard (μGal)	2.2	2.2

Tableau 4 : Résultats de traitement avec le g7 (site de Bordj Badji Mokhtar)

- Site de Bechar :

A Bechar, les observations ont été effectuées en une seule session s'étendant sur presque 17h. Les observations ont eu lieu du 21 avril 2001 à 14h26min37sec au 22 avril 2001 à 07h38min15sec, avec la réalisation de 25 sets ce qui donne au total 2500 valeurs de g.

La distribution des données de g pour cette station absolue pour l'ensemble de 2500 valeurs fournies par le FG5-111 en fonction du nombre d'observations est illustrée par la figure 15 ci-dessous :

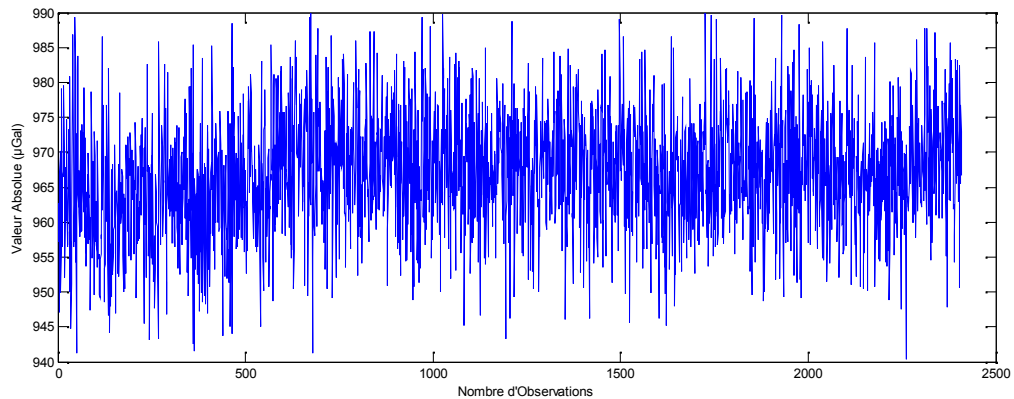


Figure 15 : Données brute du FG5-111 à Bechar.

L'analyse de la distribution des mesures fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 940.4 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 990 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 49.6 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 8.5 \mu\text{Gal}$,

Il est aisé de constater que la dispersion des mesures est élevée. Il est donc nécessaire de retraiter les données de la station absolue de Bechar de façon à minimiser les erreurs et établir la valeur absolue moyenne de g la plus précise.

Après avoir éliminé les valeurs présentant un écart-type supérieur à 2σ , la distribution normale des données de g en fonction du nombre d'observations est représenté en figure 16. Nous pouvons remarquer l'amélioration de la variation autour de la valeur moyenne.

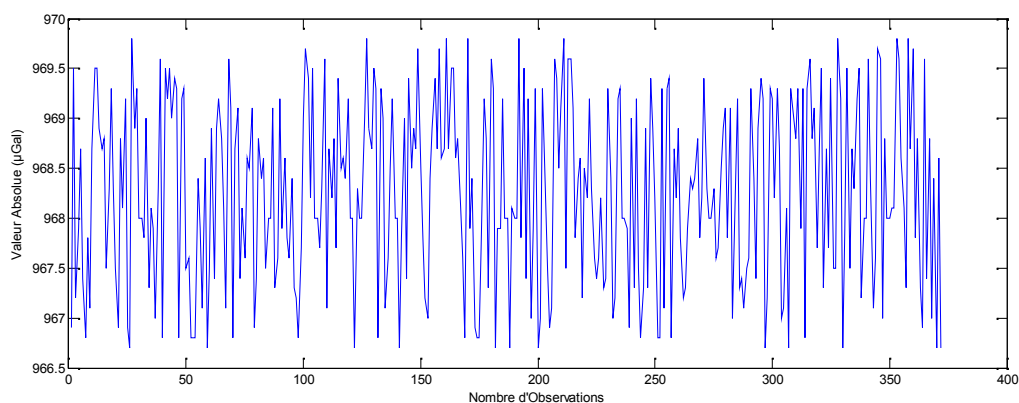


Figure 16 : Données du FG5-111 filtrées à la station de Béchar

Les résultats obtenus sont :

$$g_{\min} = 966.7 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 969.8 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 3.1 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 0.9 \mu\text{Gal}$,

La précision ainsi obtenue est compatible avec celle du Gravimètre absolu FG5-111 qui est de l'ordre de $1 \mu\text{Gal}$.

Les résultats du traitement des données au niveau de la station de Béchar avec les deux différentes valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal/cm}$, $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

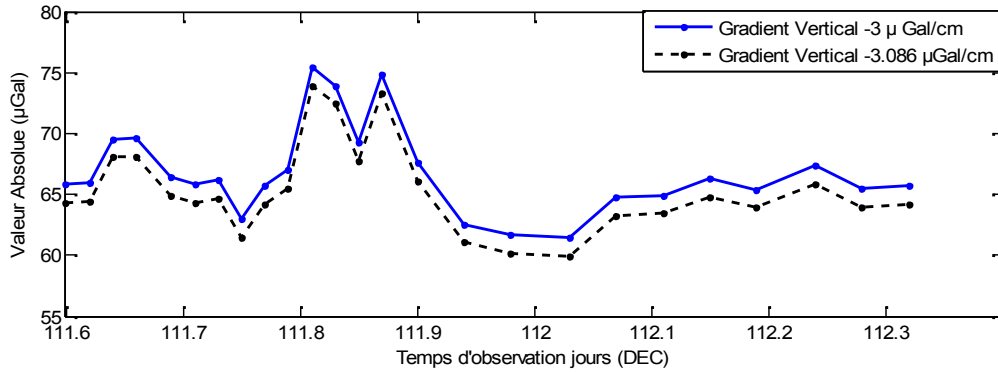


Figure 17 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

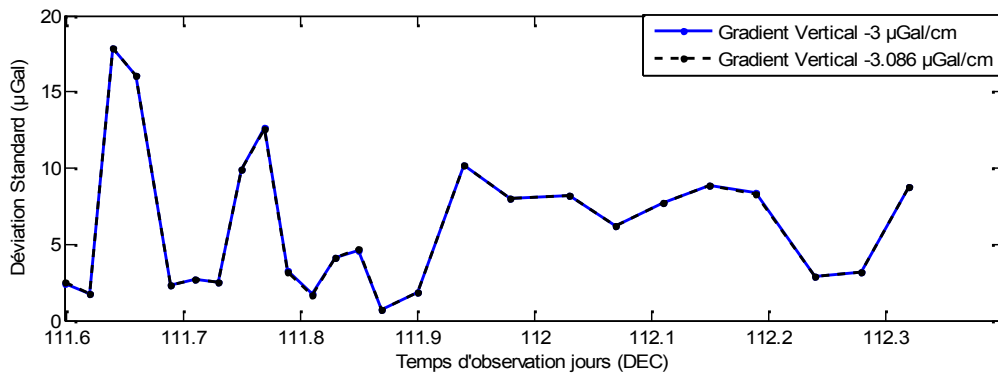


Figure 18 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal/cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$
Valeur Absolue (μGal)	66.9	65.8
Déviation Standard (μGal)	1.6	1.6

Tableau 5 : Résultats de traitement avec le g7 (site de Bechar)

- Site de Constantine :

A Constantine, les observations ont été effectuées en une seule session de presque 10h. Les observations ont eu lieu du 21 avril 2001 à 15h54min30sec au 22 avril 2001 à 00h26min50sec. 19 sets ont pu être réalisés.

Les résultats de traitement des données avec les deux différentes valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

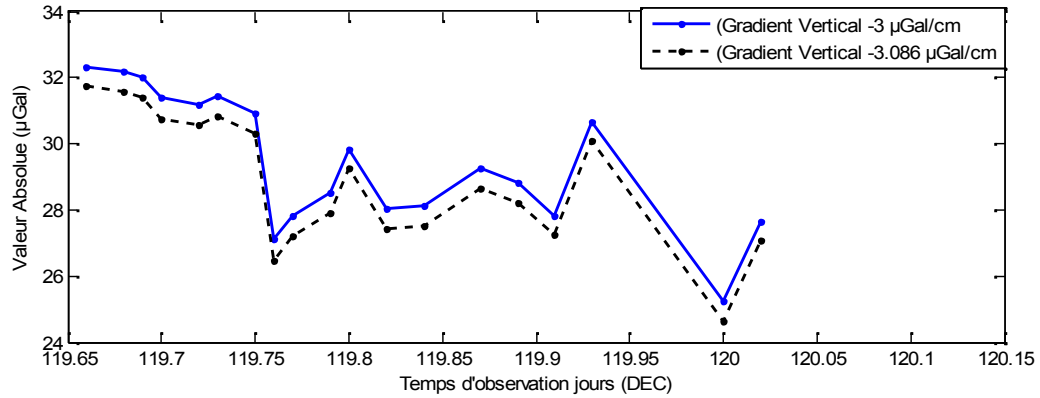


Figure 19 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

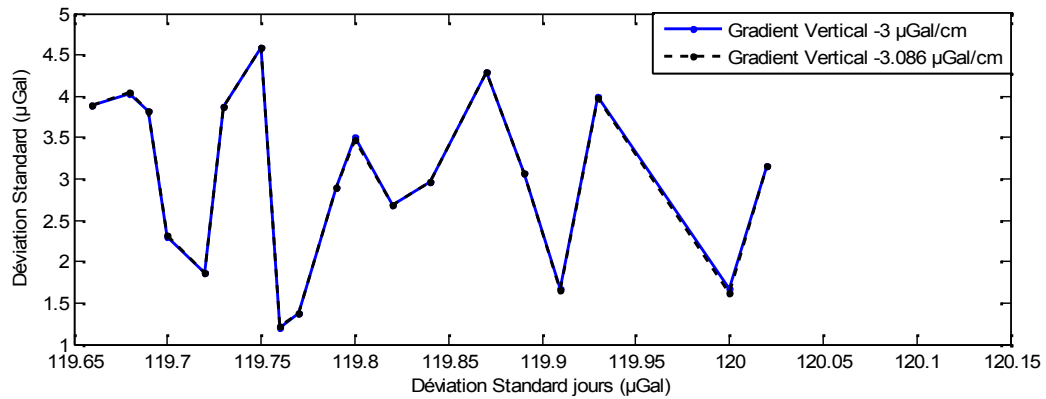


Figure 20 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	29.5	28.9
Déviation Standard (μGal)	2.0	2.0

Tableau 6 : Résultats de traitement (site de Constantine)

- Site de Djanet :

A Djanet, les observations ont été effectuées en une seule session de 3h. Les observations ont débuté le 29 avril 2001, dès l'installation du gravimètre, à 21h54min10sec et ont duré jusqu'au 30 avril 2001 à 02h57min30sec. 10 sets de mesures ont pu être ainsi réalisés.

De même que pour les stations déjà décrites, les résultats obtenus pour les deux valeurs de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ du gradient vertical sont représentés dans les figures ci-dessous :

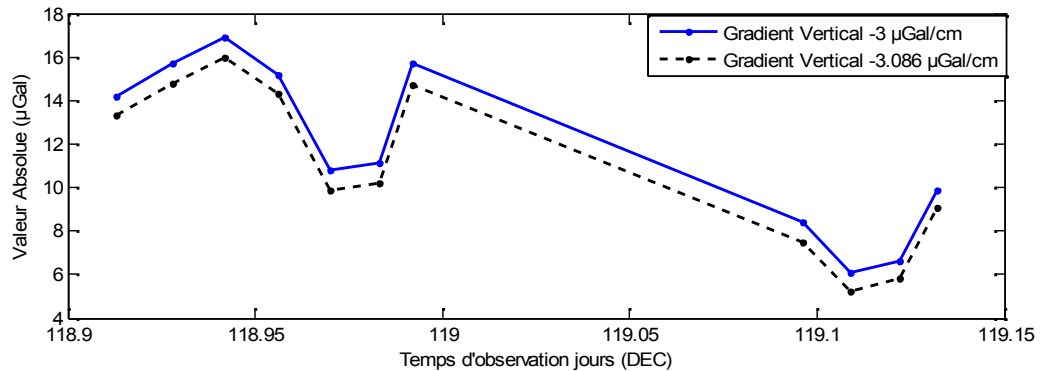


Figure 21 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

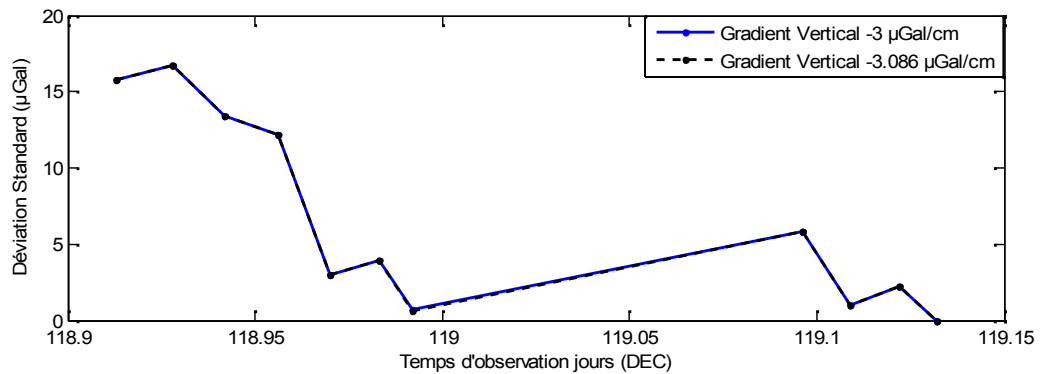


Figure 22 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	11.9	10.9
Déviati on Standard (μGal)	3.9	3.9

Tableau 7 : Résultats de traitement avec le g7 (site de Djanet)

- Site de Ghardaïa :

A Ghardaïa, les observations ont été effectuées en une seule session qui s'étend sur presque 21h. Les observations ont commencé le 10 avril 2001, jour d'installation du gravimètre à 15h23min10sec jusqu'au 11 avril 2001 à 15h08min10sec, avec la réalisation de 29 sets, ce qui donne en total 3000 valeurs de g.

La distribution des mesures de g au site de Ghardaïa pour l'ensemble de 3000 valeurs de g fournies par le FG5-111 est représentée sur la figure 23 ci-dessous :

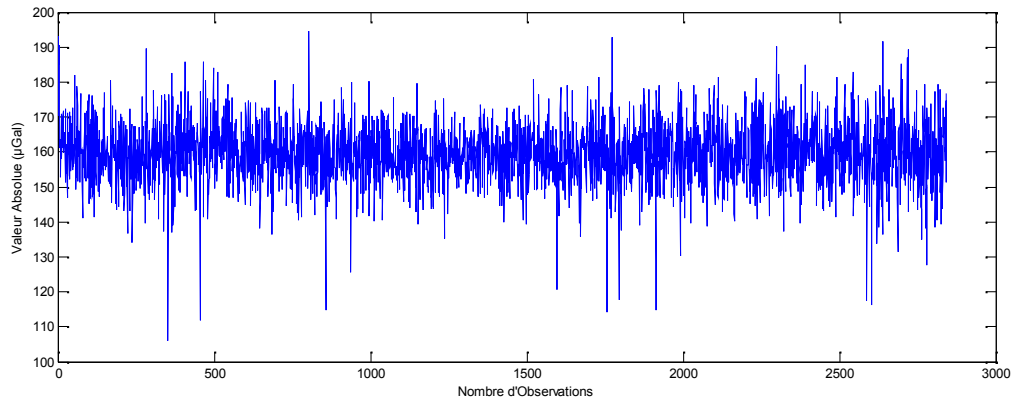


Figure 23 : Données brutes du FG5-111 à Ghardaïa

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 106.1 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 194.6 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 88.5 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 8.8 \mu\text{Gal}$.

On constate que la distribution des mesures présente une dispersion élevée. Une sélection des mesures est donc au préalable nécessaire pour en améliorer la qualité.

Après avoir éliminé les valeurs qui présentent une dispersion supérieure à 2σ , les résultats de la distribution normale des données de g (μGal) en fonction du nombre d'observations sont représentés dans la figure suivante :

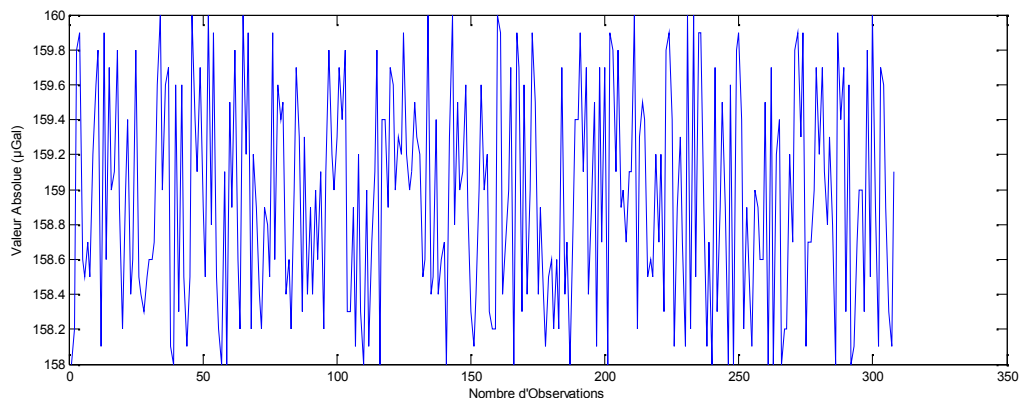


Figure 24 : Données traité du FG5-111 à Ghardaïa

Les résultats obtenus sont donc :

$$g_{\min} = 158 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 160 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 2 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 0.6 \mu\text{Gal}$.

Il est aisé de constater l'amélioration des statistiques de la distribution des mesures. Elles sont ainsi compatibles avec les spécifications du FG5-111 de point de vue précision.

Les résultats du traitement des données pour deux différentes valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$, et de $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

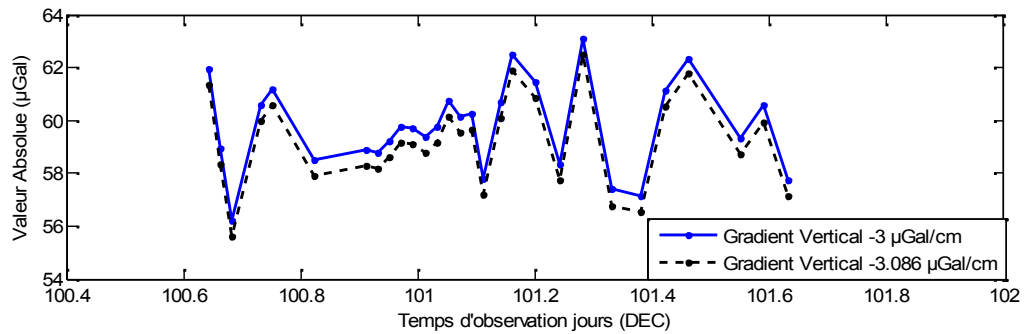


Figure 25 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

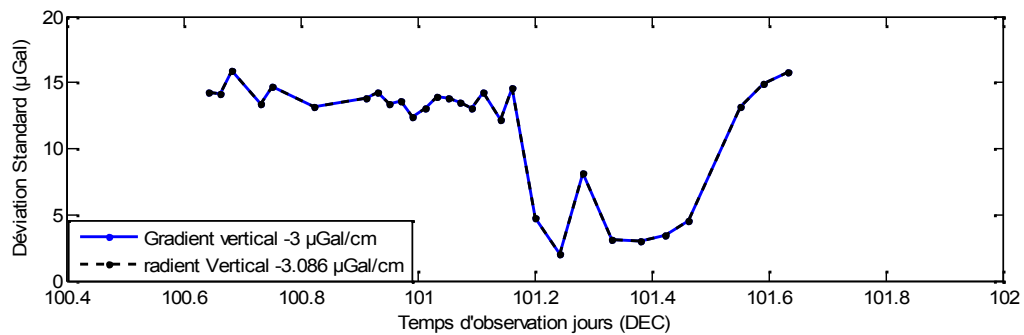


Figure 26 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	59.8	59.2
Déviati on Standard (μGal)	1.7	1.7

Tableau 8 : Résultats de traitement avec le g7 (site de Ghardaïa)

- Site d'Oran :

A Oran, les observations ont été effectuées en une seule session d'environ 16h. Les observations ont commencés le jour d'installation du gravimètre le 19 avril 2001 à 12h07min10sec et ont duré jusqu'au 20 avril 2001 à 06h23min10sec, avec la réalisation de 22 sets. 2200 valeurs de g ont ainsi pu être collectées.

La distribution des 2200 valeurs de g est illustrée par la figure 27 :

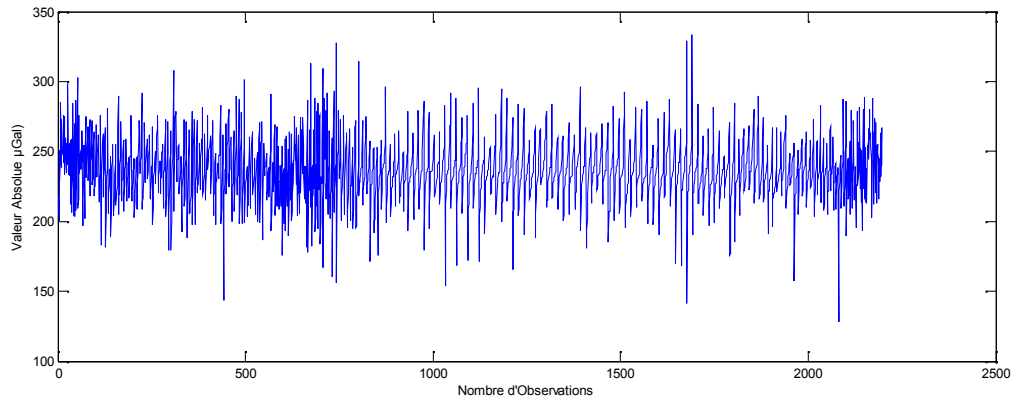


Figure 27 : Données brutes du FG5-111 au site d'Oran

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 128.1 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 333.3 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 205.2 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 21.6 \mu\text{Gal}$.

Dans ce cas également, la distribution des mesures présente une importante dispersion. Après avoir éliminé les valeurs aberrantes, la distribution des données de g est représentée dans la figure 28. Nous constatons une nette amélioration de la qualité des mesures. :

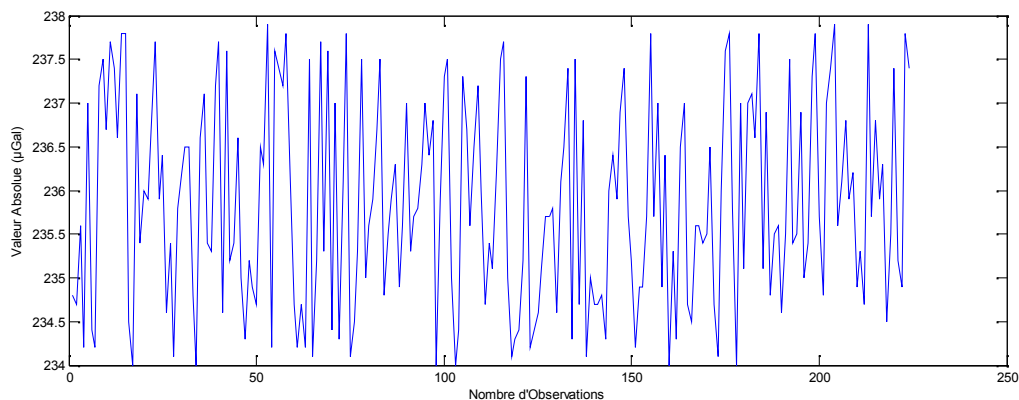


Figure 28 : Données traitées du FG5-111 au site d'Oran

Les résultats obtenus sont :

$$g_{\min} = 234 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 237.9 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 3.9 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 0.9 \mu\text{Gal}$.

La précision ainsi obtenue est très proche de ce qui est attendu des résultats établis avec ce type de gravimètre.

Les résultats de traitement des données avec les deux valeurs de $-3 \mu\text{Gal/cm}$ et de $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$ du gradient vertical sont représentés dans les figures suivantes :

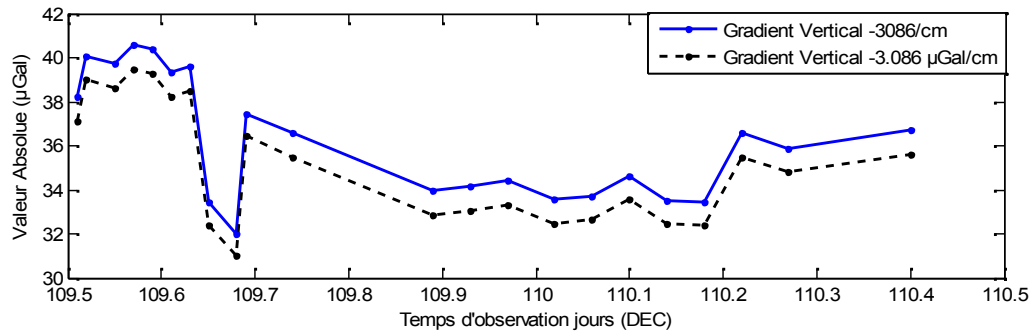


Figure 29 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

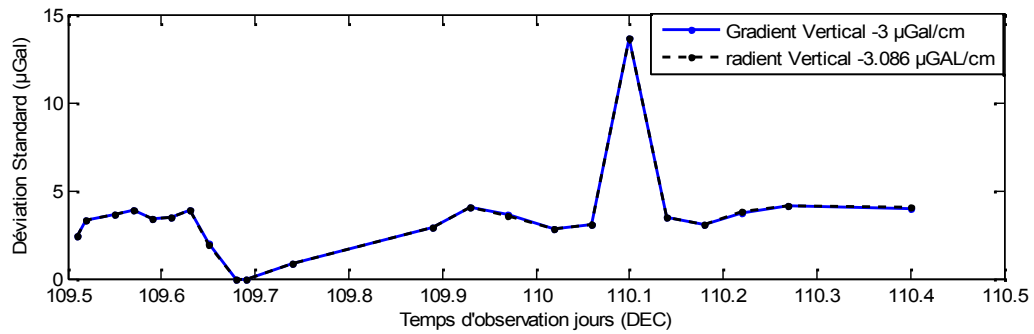


Figure 30 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal/cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$
Valeur Absolue (μGal)	36.3	35.2
Déviation Standard (μGal)	2.8	2.8

Tableau 9 : Résultats de traitement avec le g_7 au site d'Oran

- Site d'In Salah :

A In Salah, les observations ont été effectuées en une seule session dont la durée était d'environ 14h. Les observations ont commencé dès l'installation du gravimètre le 16 avril 2001 à 18h10min19sec. Elles se sont terminées le 17 avril 2001 à 07h38min10sec, avec la réalisation de 21 sets.

Comme pour les stations décrites précédemment, Les données ont été traitées avec les deux valeurs du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal/cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$. Les résultats sont représentés respectivement dans les figures suivantes :

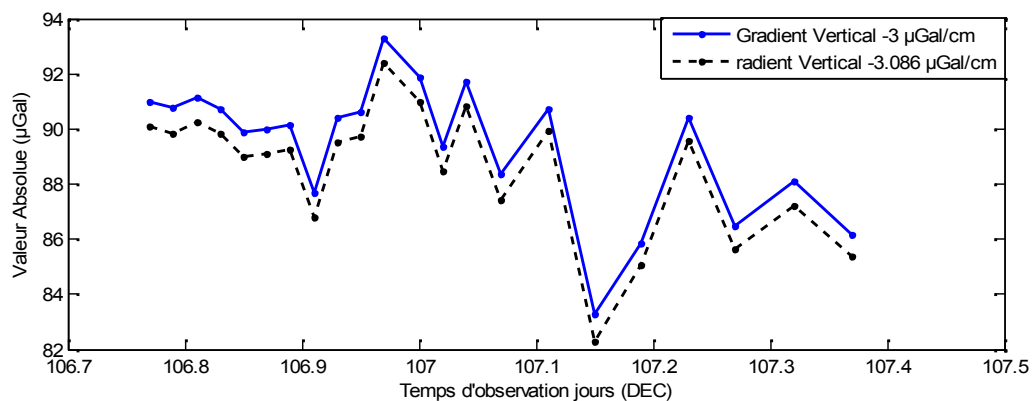
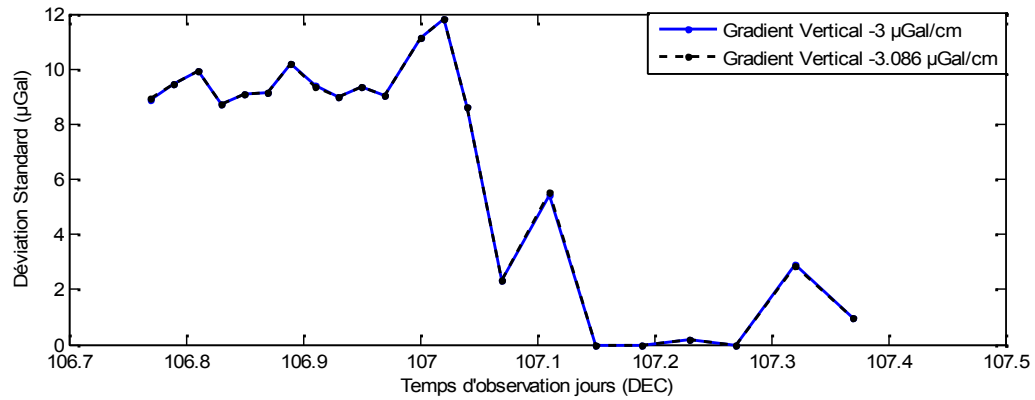


Figure 31 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

Figure 32 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

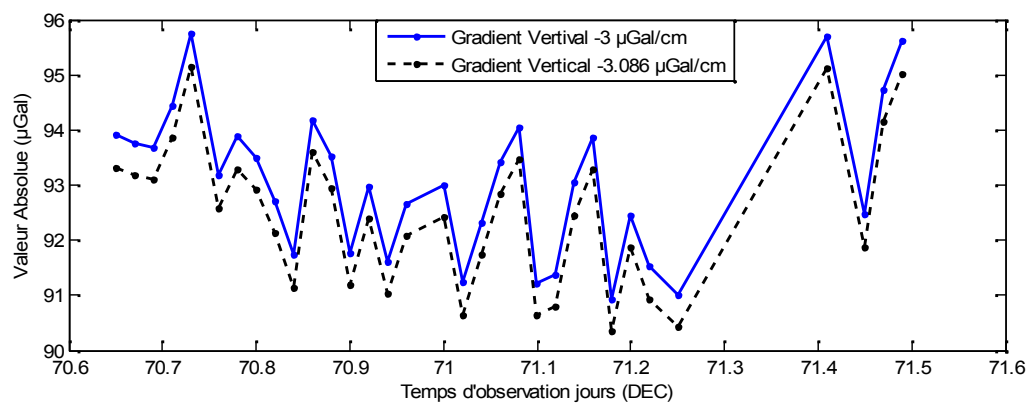
	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	89.5	88.7
Déviation Standard (μGal)	2.4	2.4

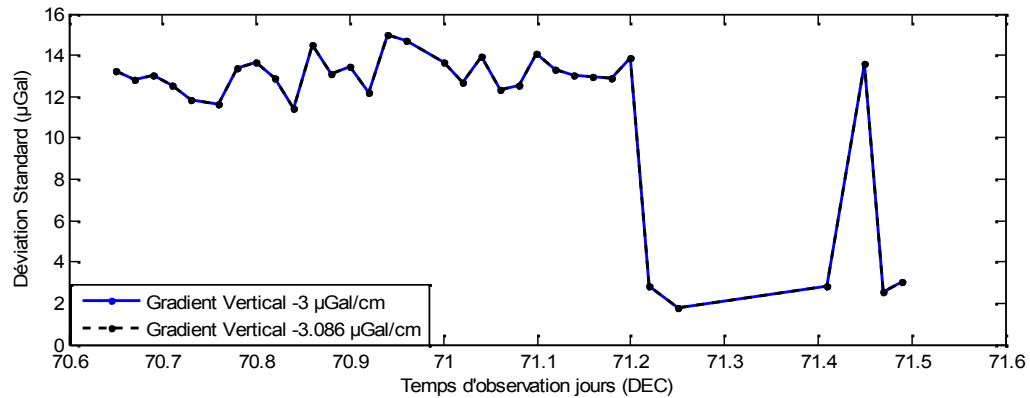
Tableau 10 : Résultats de traitement avec le g7 (site de In Salah)

- Site de Tamanrasset :

A Tamanrasset, les observations ont été effectuées en une session unique d'environ 18h. Les observations ont commencé le 11 mars 2001 à 15h38min10sec le jour de l'installation du gravimètre. Elles se sont achevées le 12 mars 2001 à 11h51min30sec. Elles ont permis de réaliser 34 sets.

Dans ce cas également, les données ont été traitées grâce au logiciel du constructeur. Les résultats de traitement avec $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ et de $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$, les deux différentes valeurs du gradient vertical, sont représentés sur les figures suivantes :

Figure 33 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

Figure 34 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats du traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

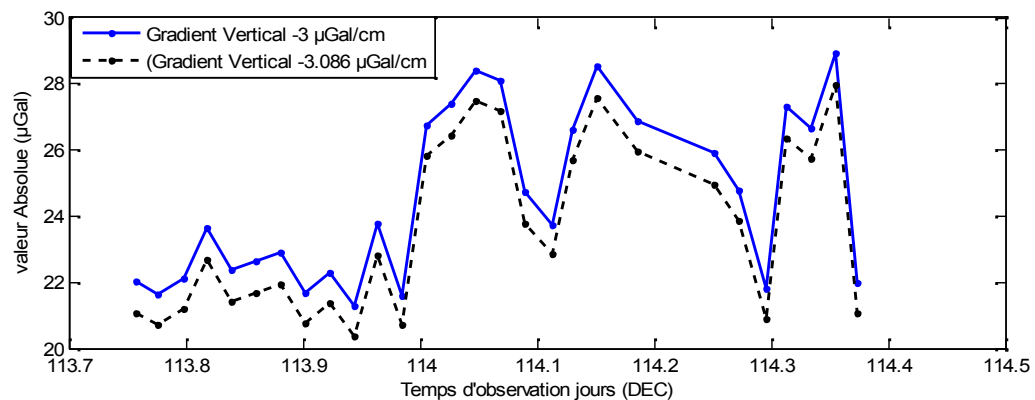
	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal/cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$
Valeur Absolue (μGal)	93.0	92.5
Déviation Standard (μGal)	1.4	1.4

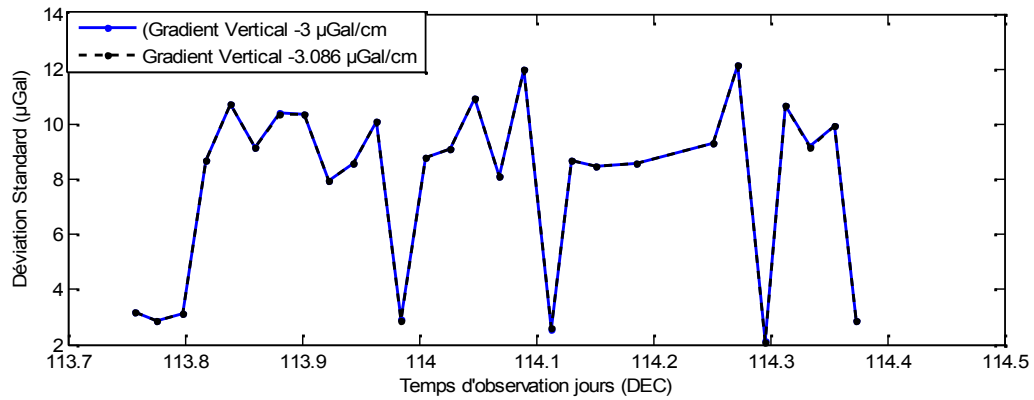
Tableau 11 : Résultats de traitement des observations (site de Tamanrasset)

- Site de Tindouf :

A Tindouf, les observations ont été effectuées en une seule session s'étendant sur environ 15h. Les observations ont commencé le 23 avril 2001 à 18h08min10sec, jour d'installation du gravimètre et se sont terminées le 24 avril 2001 à 9h01min30sec. Elles ont permis la réalisation de 28 sets.

Comme pour les autres stations, les données ont été traitées avec les deux différentes valeurs de $-3 \mu\text{Gal/cm}$ et $-3.086 \mu\text{Gal/cm}$ du gradient vertical. Les résultats sont illustrés par les figures suivantes :

Figure 35 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set en fonction du temps.

Figure 36 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Les résultats de traitement des deux cas sont représentés dans le tableau suivant :

	Gradient Vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	24.5	23.6
Déviatiion Standard (μGal)	2.6	2.5

Tableau 12 : Résultats du traitement des observations (site de Tindouf)

2.5.2. Campagne 2012 :

Pour cette campagne, l'acquisition des données gravimétriques a été effectuée à l'aide du gravimètre FG5-206, ayant les mêmes caractéristiques techniques que le FG5-111 utilisé lors de la campagne 2001. Le logiciel g7 de dépouillement des mesures et de traitement des données, nous permettra d'illustrer les différentes étapes nécessaires à la détermination d'une valeur absolue en un site donné. Parmi ces étapes citons :

- les variations temporelles des valeurs des différents sets et incertitude sur la moyenne
- un exemple de la dispersion des valeurs drop et l'écart-type.
- l'ensemble des corrections appliquées : marées solide et océanique, mouvement du pôle, pression atmosphérique, transfert au sol et une correction instrumentale.
- L'ensemble des mesures auxiliaires : température (avec offset), valeur de vide (pompe ionique), position du ressort (superspring), tension du laser, pression atmosphérique.

- Pour le Site d'Alger (CRAAG) :

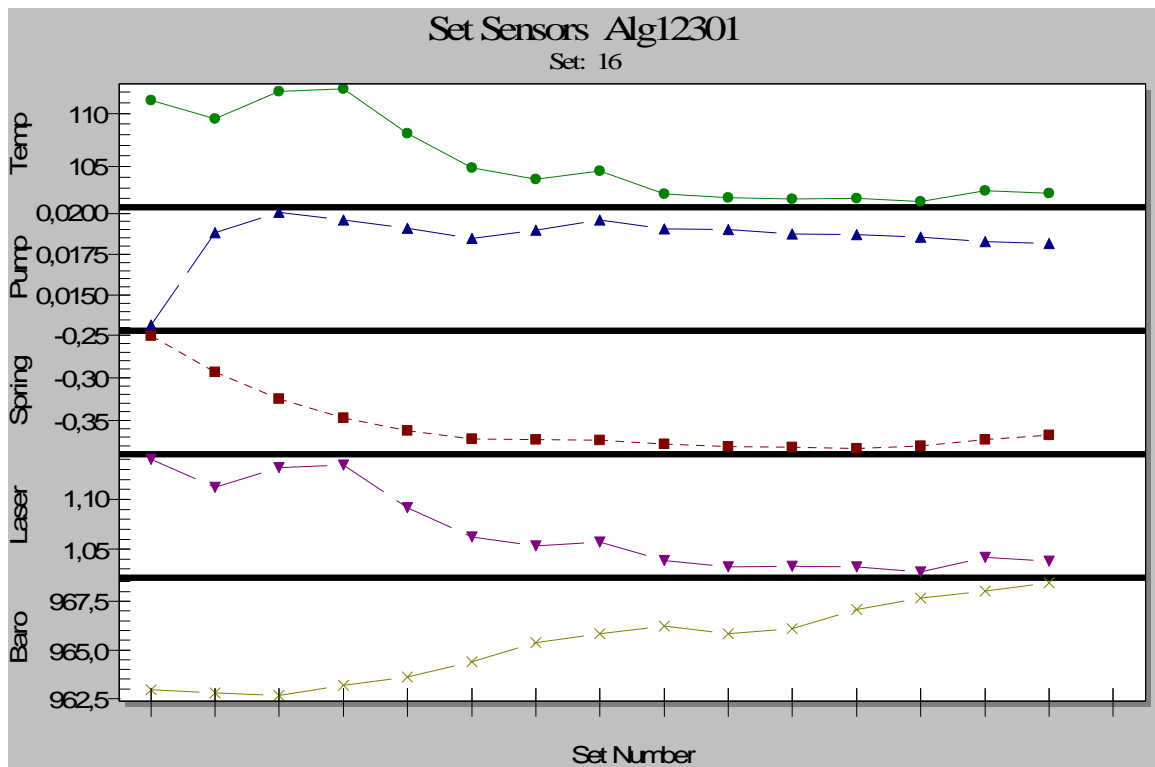


Figure 37 : Ensemble des mesures auxiliaires : température en degré Celsius (avec offset), valeur de vide (pompe ionique) en micro Torr, position du ressort (superspring) en Millivolt, tension du laser en Volt, pression atmosphérique en mbar.

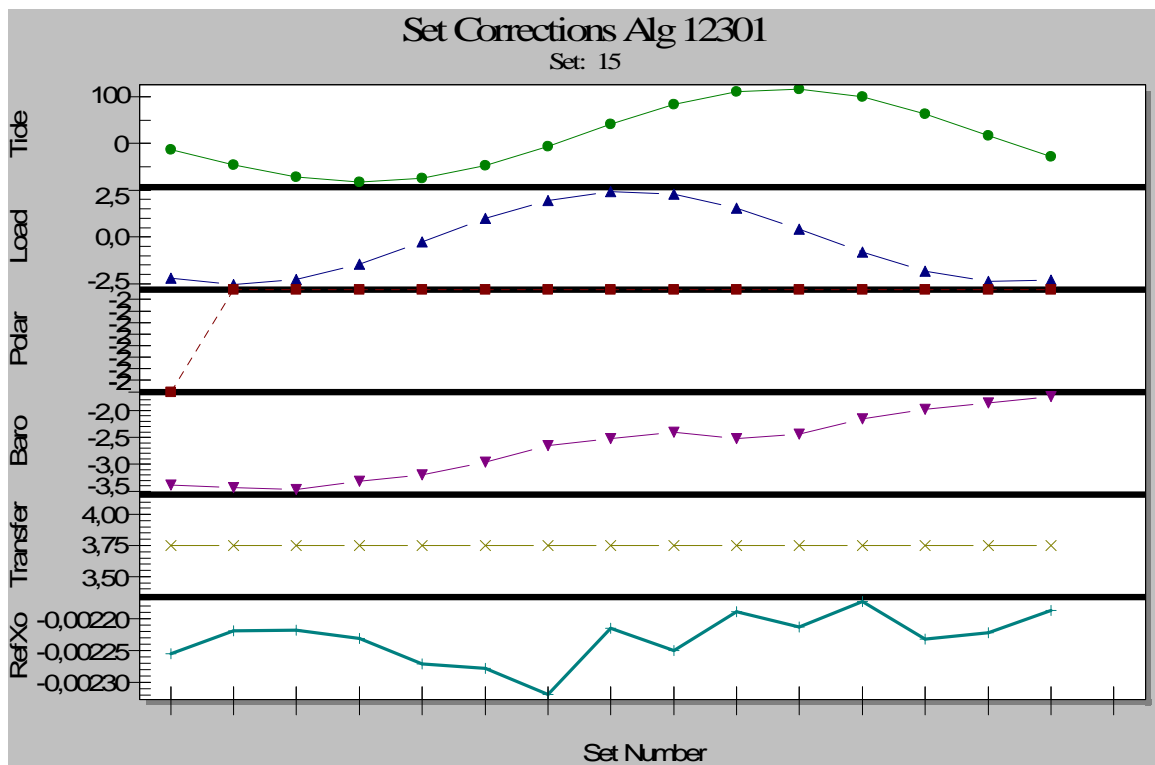


Figure 38 : Ensemble des corrections appliquées en μGal : marées terrestre et surcharge océanique, mouvement du pôle, pression atmosphérique, transfert au sol et une correction instrumentale.

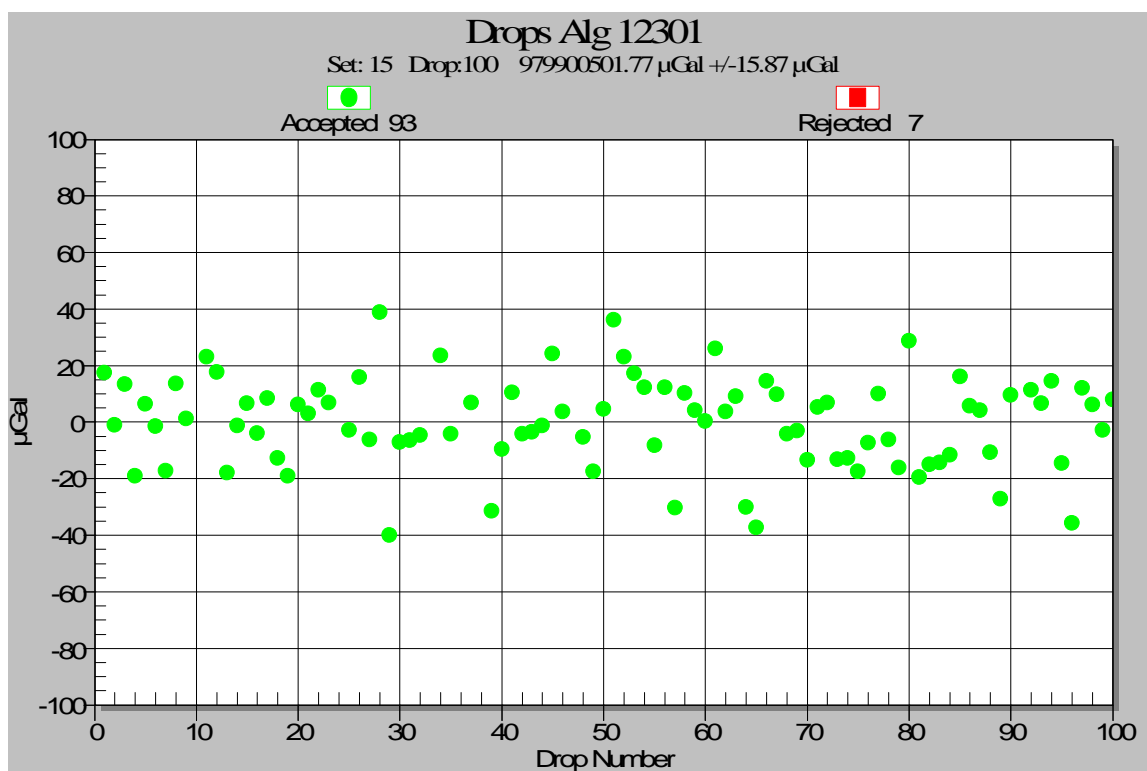


Figure 39 : Exemple de la dispersion des valeurs par drop et leur écart- type

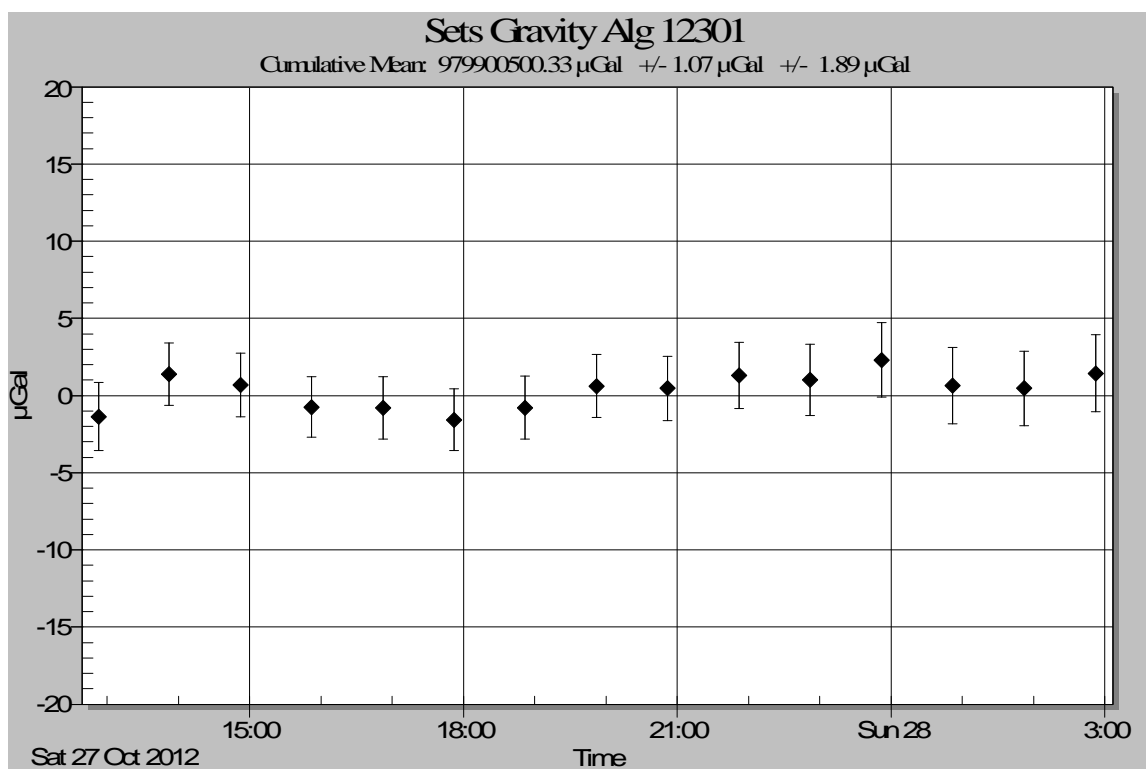


Figure 40 : Variations temporelles des valeurs et incertitude sur la moyenne

La distribution des données de g pour le site du CRAAG et pour l'ensemble de 1500 valeurs fournies par le FG5-206 en fonction du nombre d'observations est représentée dans la figure suivante :

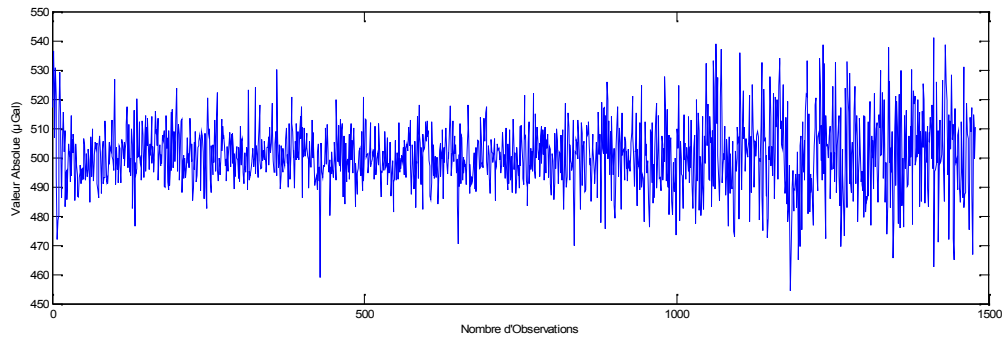


Figure 41 : Données brutes du FG5-206 à la station du CRAAG

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 454.5 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 541.2 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 86.7 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 11.4 \mu\text{Gal}$.

Nous constatons que les paramètres statistiques des mesures brutes sont très élevés. La précision obtenue est d'un ordre de grandeur supérieure à ce qui est attendu. Il est donc, là-encore, nécessaire de filtrer les mesures en éliminant les outliers, dont l'effet est clairement de dégrader la qualité des observations.

En appliquant la même procédure d'analyse des mesures, nous avons éliminé les valeurs pour lesquelles la dispersion est importante. Les résultats de la distribution des mesures retenues en fonction du nombre d'observations sont représentés dans la figure suivante :

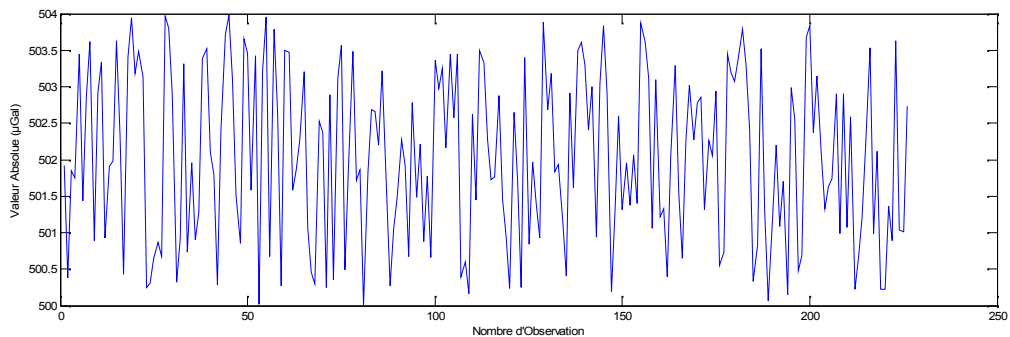


Figure 42 : Données traité du FG5-206 à la station du CRAAG

Les statistiques des résultats obtenus sont :

$$g_{\min} = 500.0 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 503.9 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 3.9 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 1.2 \mu\text{Gal}$.

Dans ce cas également, nous constatons une nette amélioration des mesures obtenues, avec une précision conforme aux normes d'usine du Gravimètre absolue FG5-206 de l'ordre de $1 \mu\text{Gal}$.

Les résultats du traitement des observations de la station du CRAAG avec la valeur du gradient vertical $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures ci-dessous :

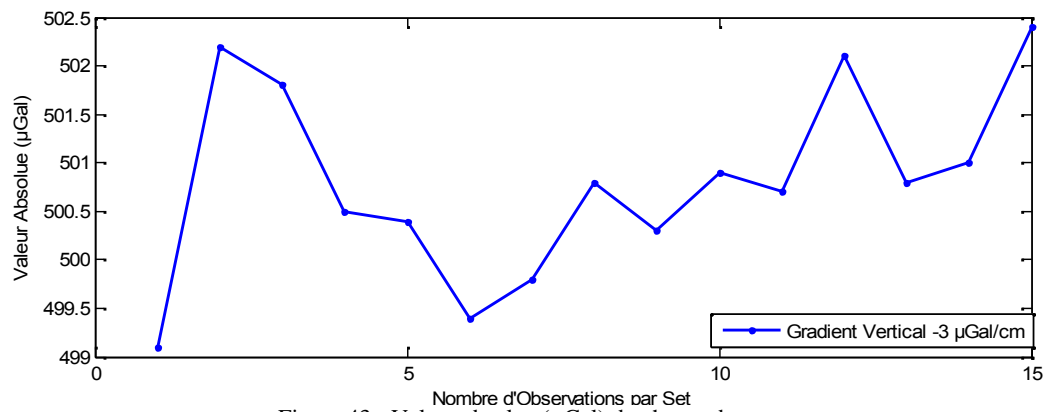


Figure 43 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set

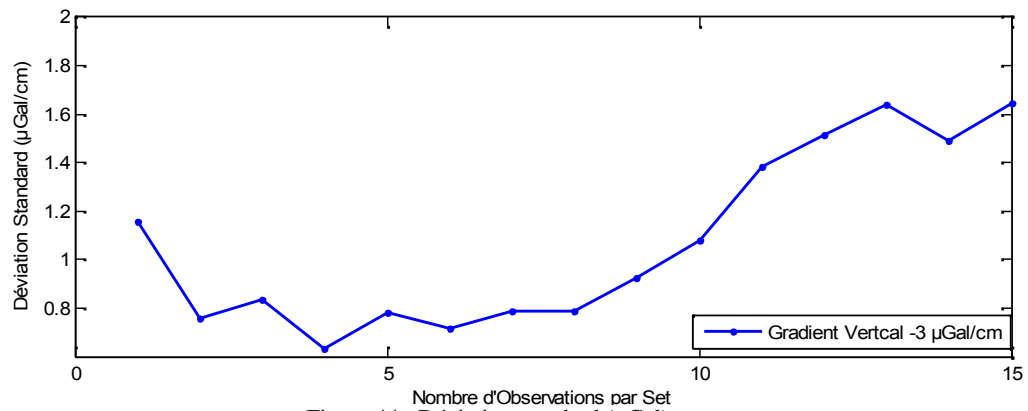


Figure 44 : Déviation standard (μGal) par set

- Pour le site d'Adrar :

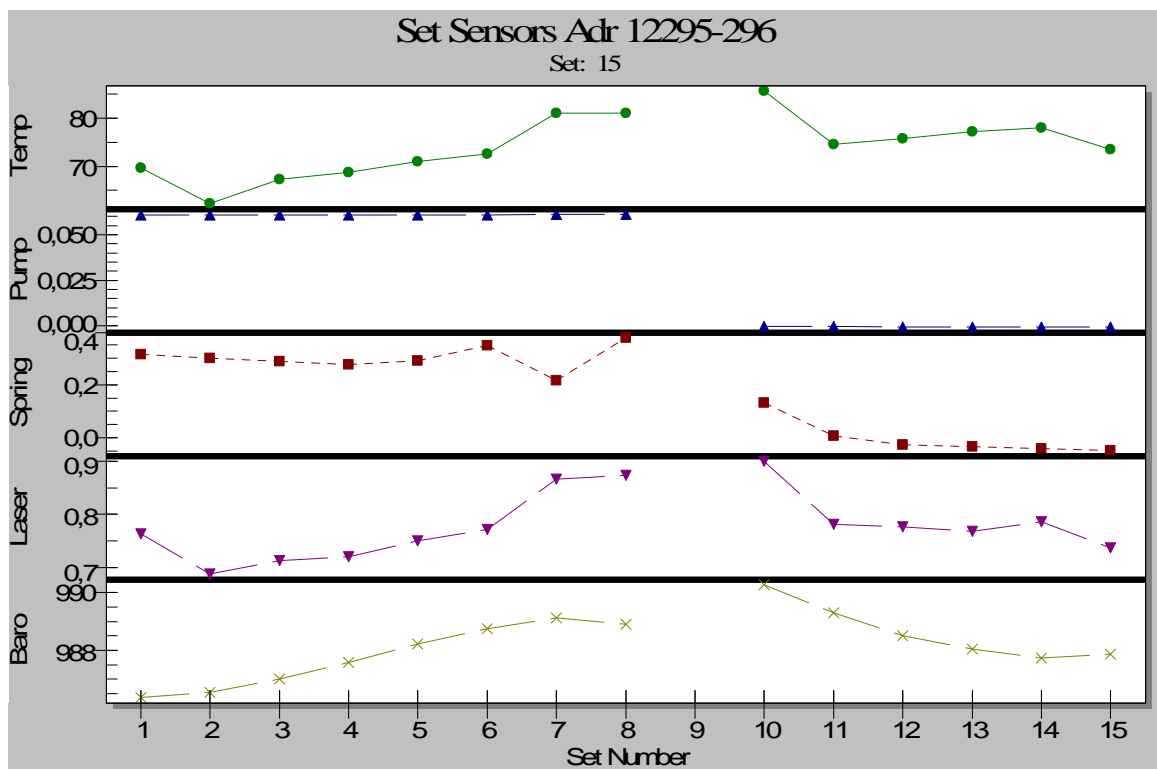


Figure 45 : Ensemble des mesures auxiliaires : température en degré Celsius (avec offset), valeur de vide (pompe ionique) en micro Torr, position du ressort (superspring) en Millivolt, tension du laser en Volt, pression atmosphérique en mbar.

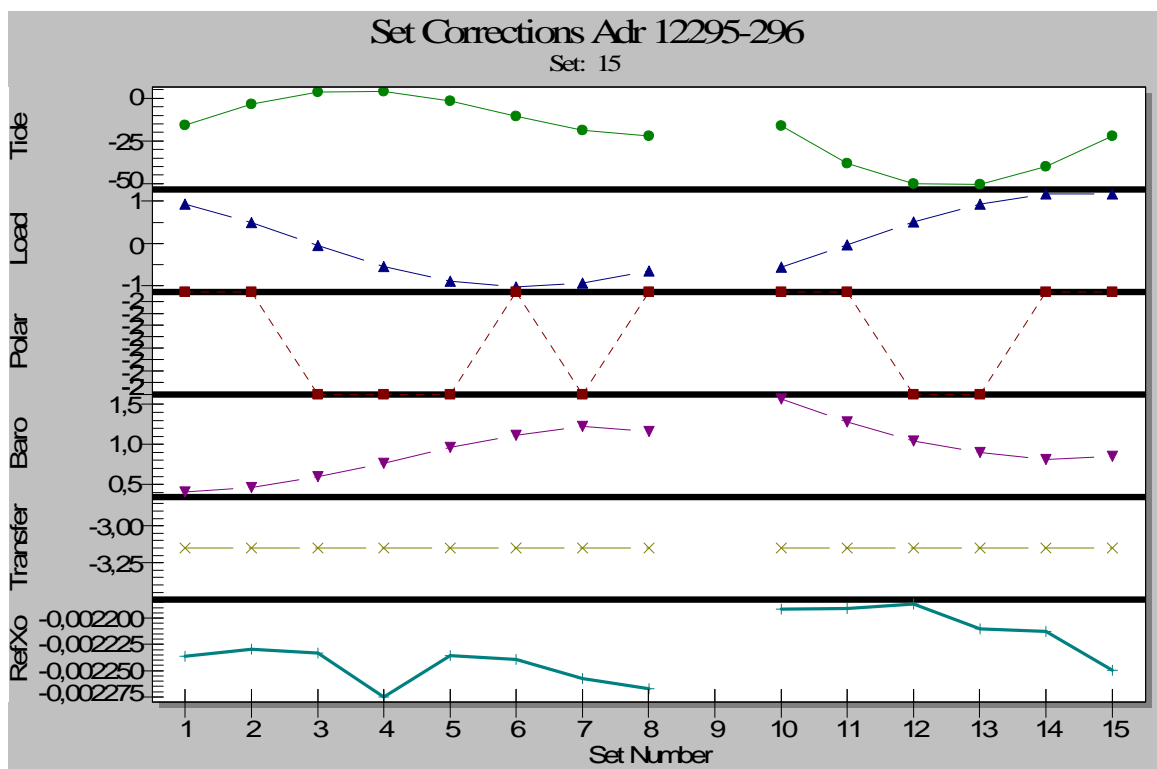


Figure 46: Ensemble des corrections appliquées en μGal : marées terrestre et surcharge océanique, mouvement du pôle, pression atmosphérique, transfert au sol et une correction instrumentale.

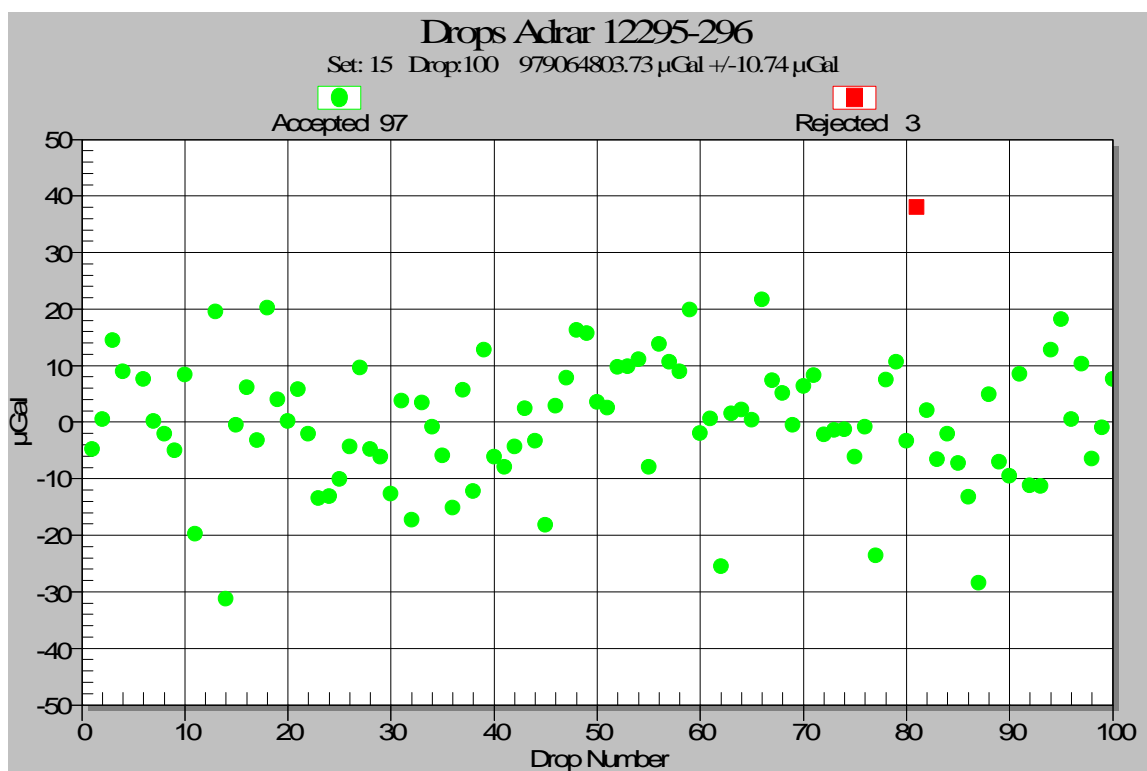


Figure 47 : Exemple de la dispersion des valeurs drop et l'écart-type

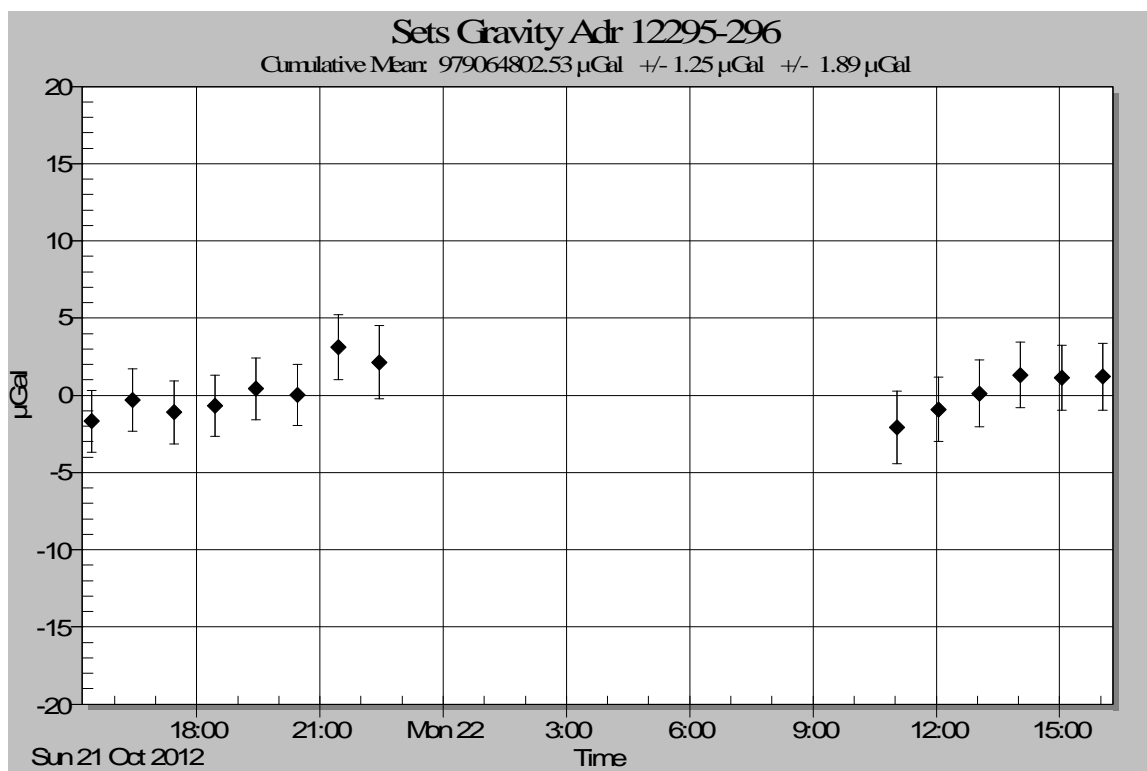


Figure 48 : Variations temporelles d'un jeu de valeurs de gravité et incertitude sur la moyenne

La distribution des 1400 réalisations de g pour le site d'Adrar fournies par le FG5-206 en fonction du nombre d'observations est représentée dans la figure suivante :

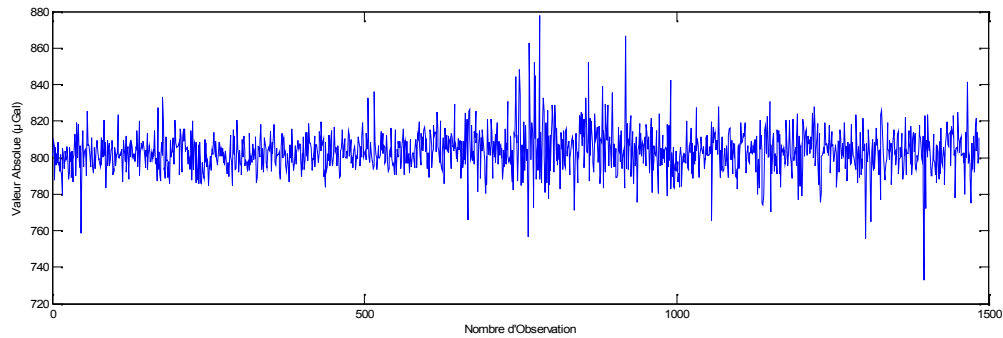


Figure 49 : Données brute du FG5-206 à la station d'Adrar

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 732.6 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 877.8 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 145.2 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 11.1 \mu\text{Gal}$.

Clairement le filtrage des mesures aberrantes permettra d'améliorer les statistiques des mesures comme cela avait été le cas pour les observations précédentes. Les résultats de la distribution normale des données de g en fonction du nombre d'observations sont représentés dans la figure suivante.

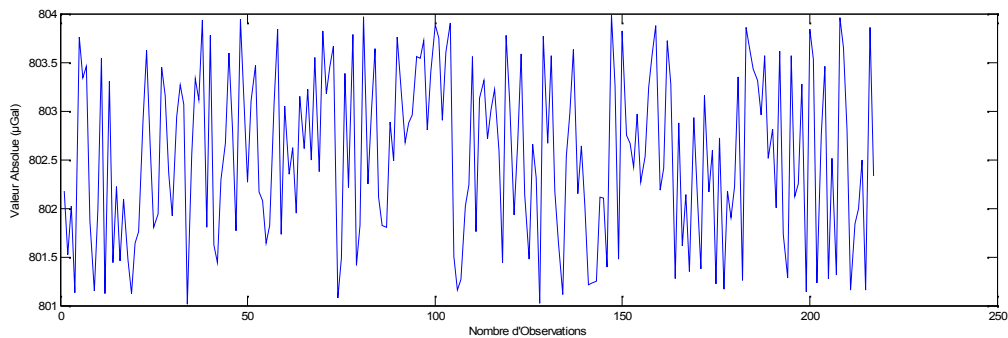


Figure 50 : Données traités du FG5-206 à la station d'Adrar

Les résultats obtenus sont :

$$g_{\min} = 801.0 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 803.9 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 2.9 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 0.9 \mu\text{Gal}$.

La précision des observations retenues est du même ordre de grandeur que la précision attendue pour le Gravimètre absolue FG5-206.

Les résultats de traitement des données de la station d'Adrar pour la valeur du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés dans les figures suivantes :

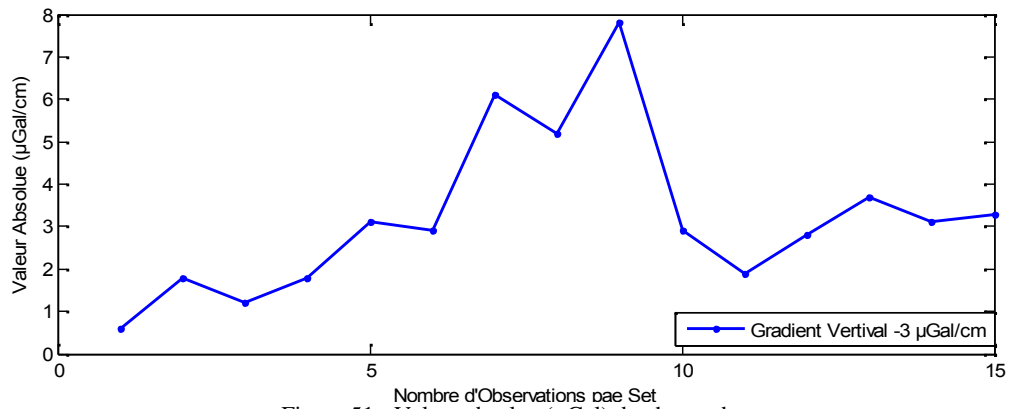


Figure 51 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set.

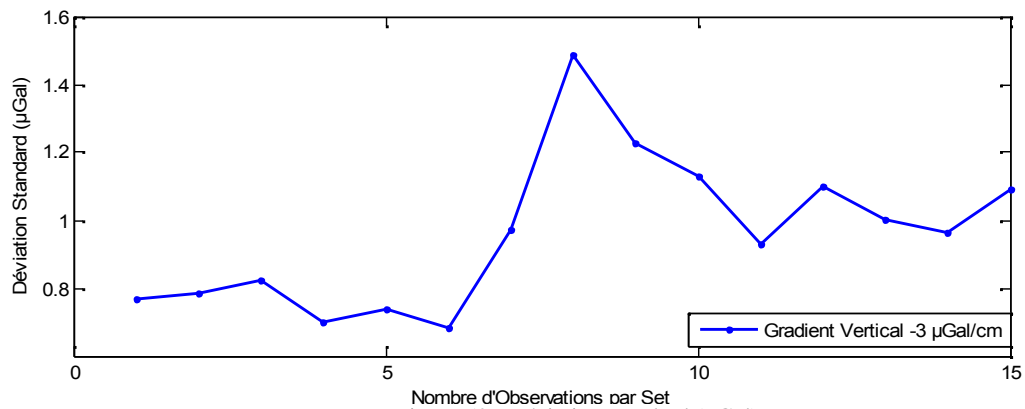


Figure 52 : Déviation standard (μGal) par set

- Pour le site d'In Salah

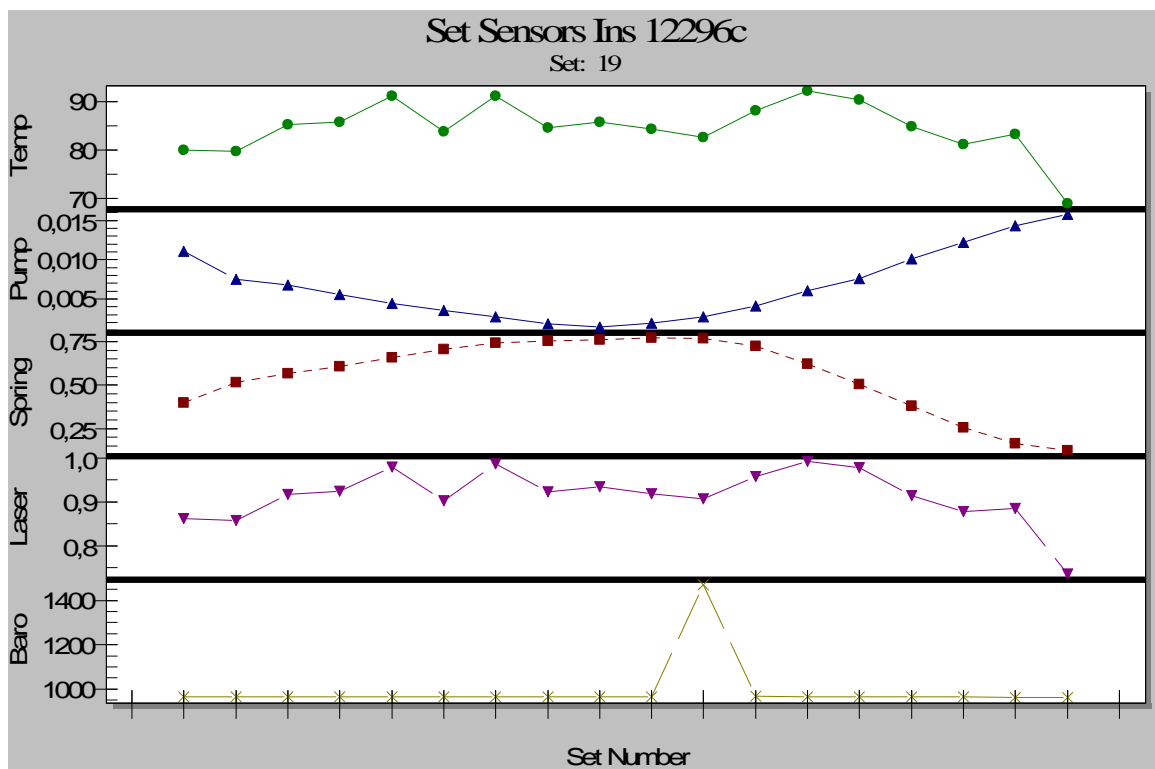


Figure 53 : Ensemble des mesures auxiliaires : température en degré Celsius (avec offset), valeur de vide (pompe ionique) en micro Torr, position du ressort (superspring) en Millivolt, tension du laser en Volt, pression atmosphérique en mbar.

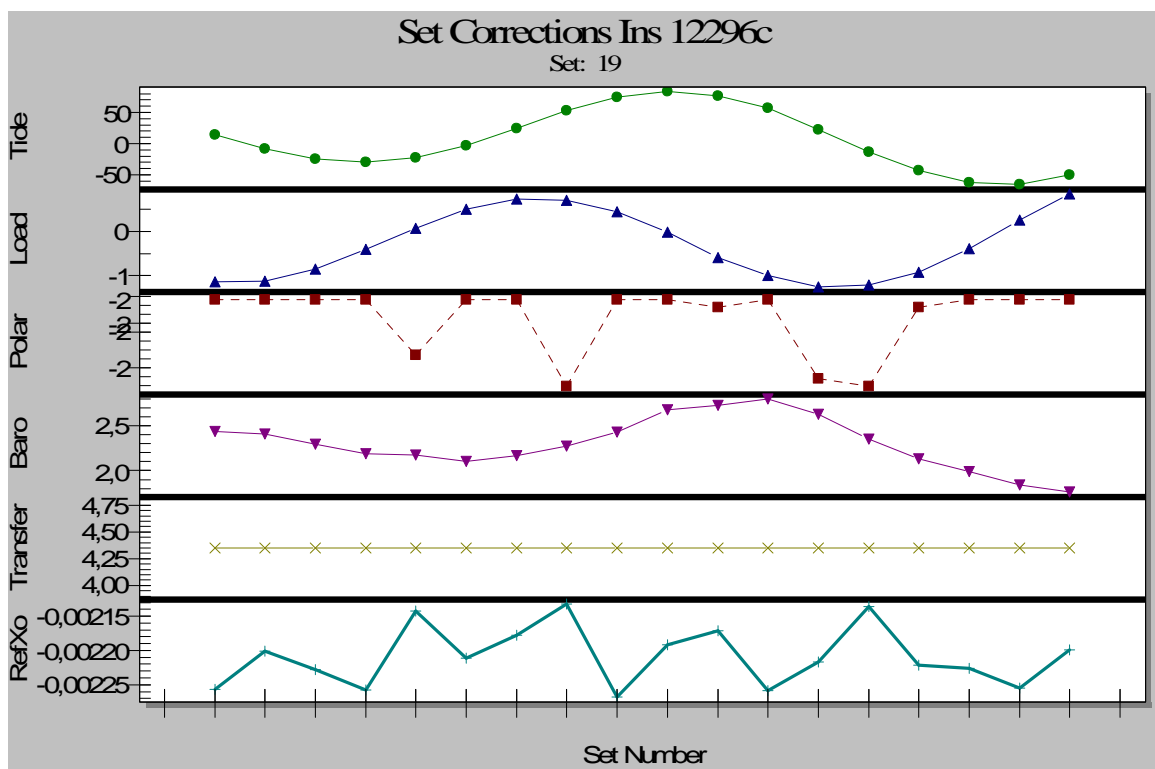


Figure 54 : Ensemble des corrections appliquées en μGal : marées terrestre et surcharge océanique, mouvement du pôle, pression atmosphérique, transfert au sol et une correction instrumentale.

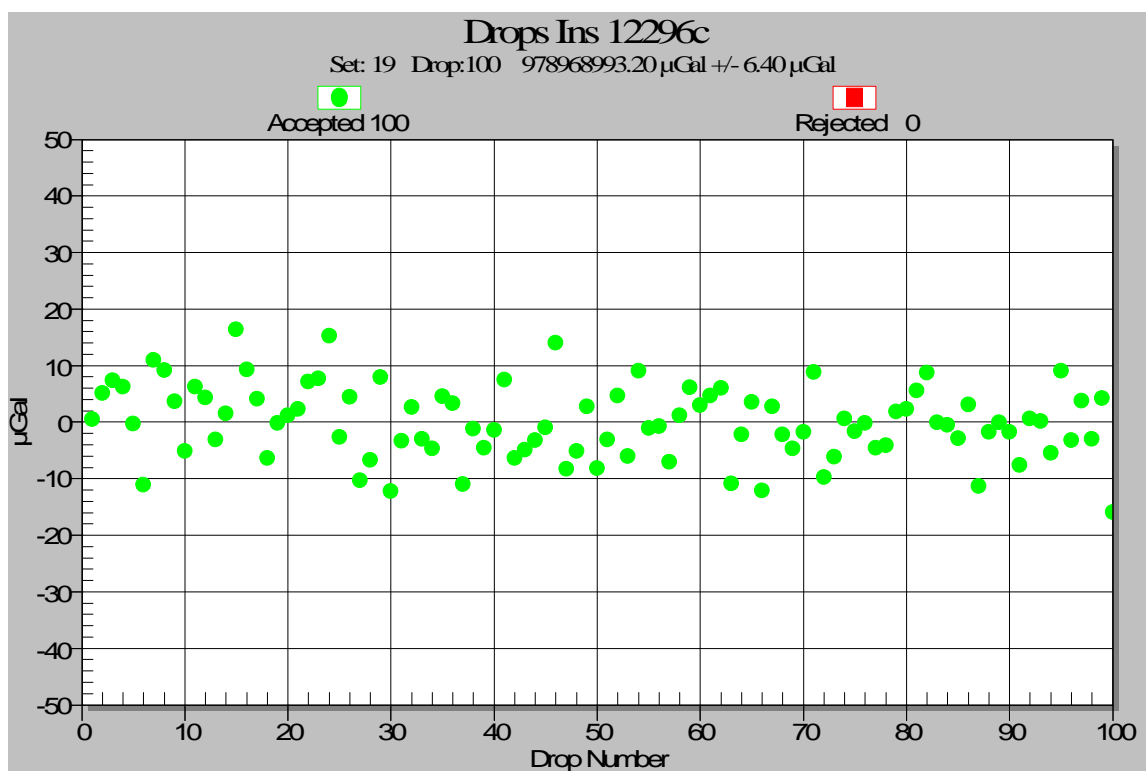


Figure 55 : Exemple de dispersion des valeurs drop et l'écart- type

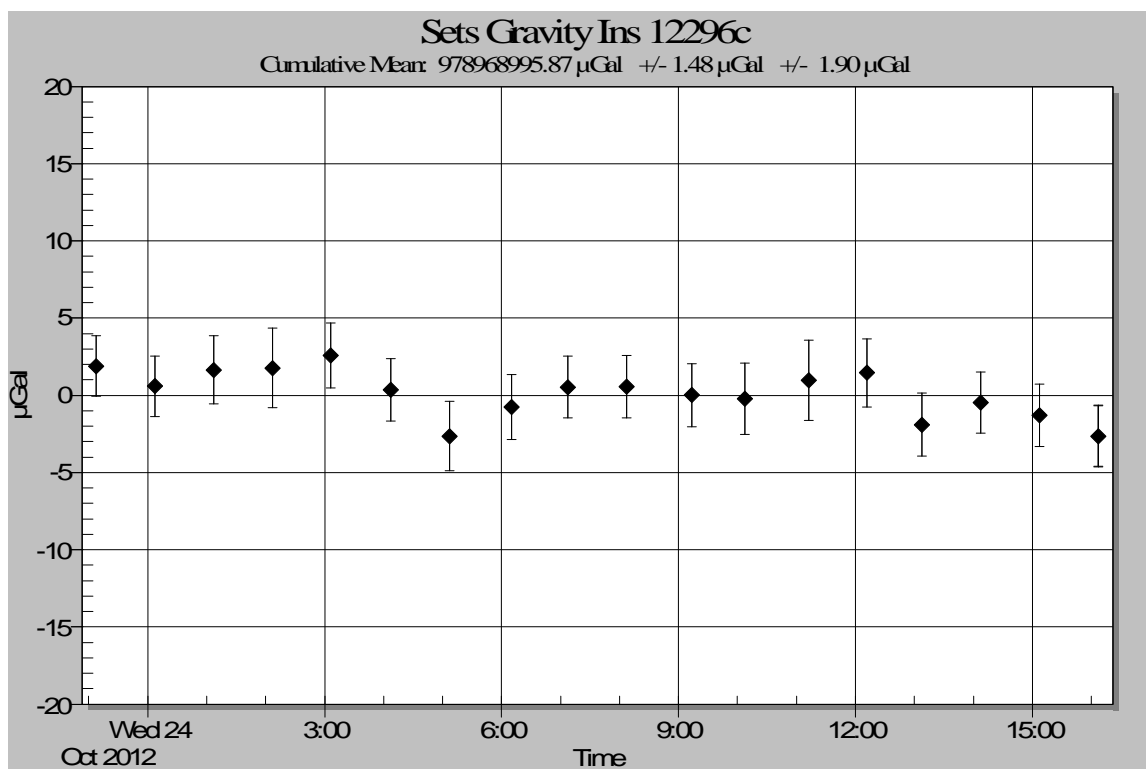


Figure 56 : Variations temporelles d'un jeu de valeurs de g et leur incertitude.

La distribution des 1800 valeurs de g fournies par le FG5-206 pour le site d'In Salah, en fonction du nombre d'observations, est représentée dans la figure suivante :

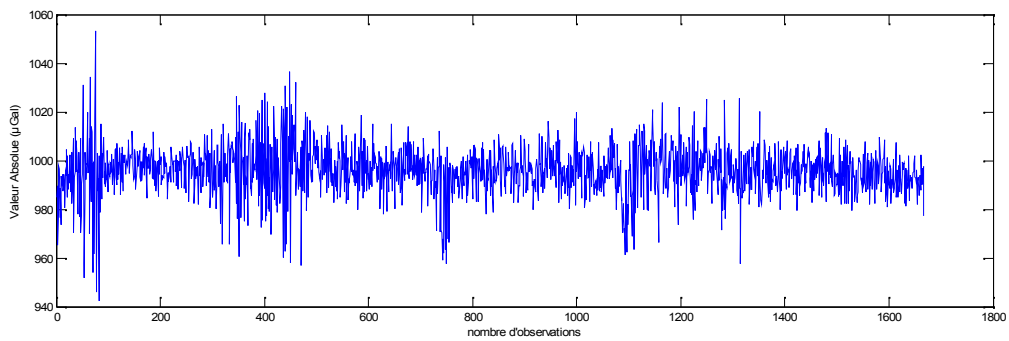


Figure 57 : données brutes du FG5-206 à la station d'In Salah

L'analyse du graphe fait ressortir les paramètres suivants :

$$g_{\min} = 942.3 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 1053.4 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 111.2 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 10.4 \mu\text{Gal}$.

Les mesures contiennent certainement des réalisations erronées dont les effets sont visibles dans la dispersion des valeurs et leur précision. Leur élimination permet d'améliorer la détermination de g .

La distribution des mesures filtrées en fonction du nombre d'observations est représentée dans la figure suivante.

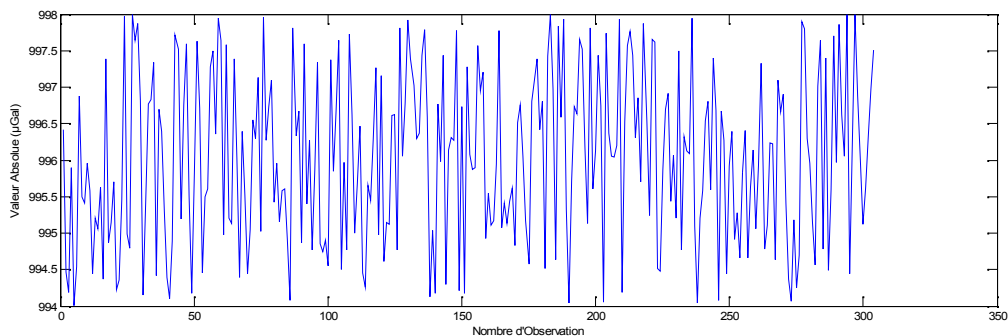


Figure 58 : Données traitées du FG5-206 à la station d'In Salah

Les nouvelles valeurs obtenues pour les statistiques, après nettoyage des mesures, sont :

$$g_{\min} = 998 \mu\text{Gal},$$

$$g_{\max} = 994 \mu\text{Gal},$$

$$\Delta g = (g_{\max} - g_{\min}) = 4 \mu\text{Gal},$$

L'ordre de précision = $\pm 1.2 \mu\text{Gal}$.

La précision obtenue est du même ordre de grandeur que celle du Gravimètre absolue FG5-206 conformément aux spécifications du constructeur ($1 \mu\text{Gal}$).

Les résultats de traitement des données au niveau de la station d'In Salah avec la valeur du gradient vertical de $-3 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ sont représentés respectivement dans les figures suivantes :

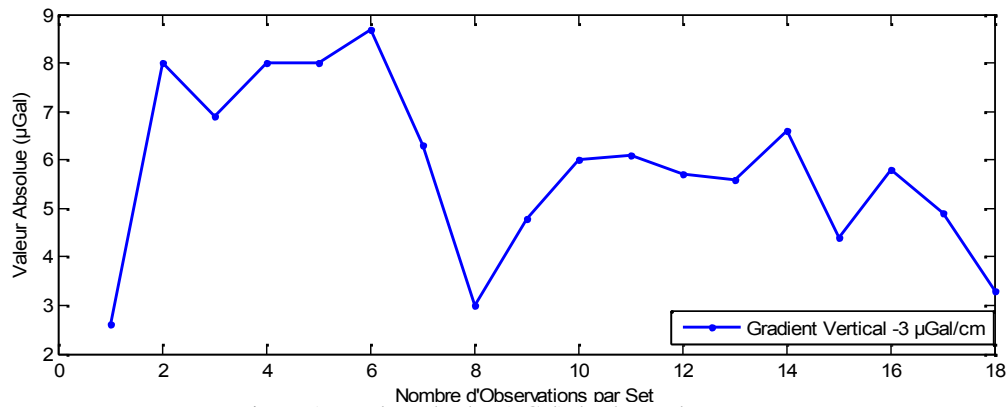


Figure 59 : Valeur absolue (μGal) du champ de pesanteur par set.

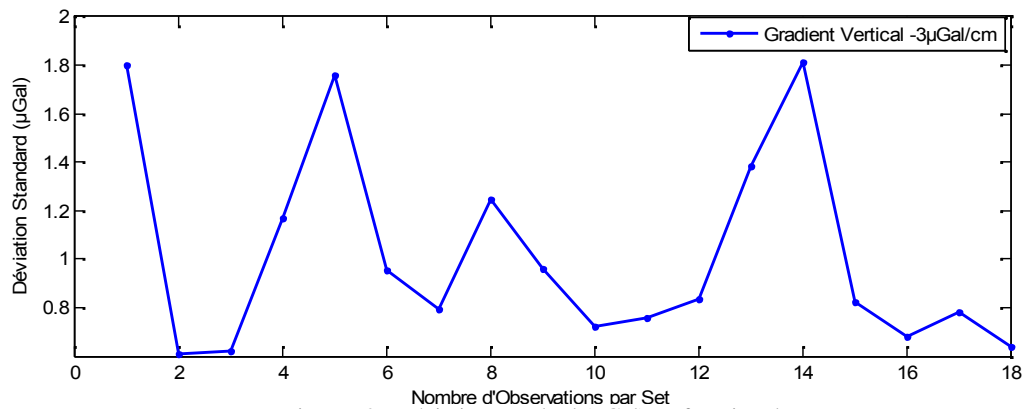


Figure 60 : Déviation standard (μGal) en fonction du temps

Dans le tableau 13 ci-dessous sont regroupés les résultats de traitement des données de trois sites d'Alger (CRAAG), d'Adrar et d'In Salah où ont été réitérées de nouvelles mesures absolues de pesanteur.

Site	Valeur Absolue (μGal)	Déviation Standard (μGal)
Alger (CRAAG)	0.8	1.1
Adrar	3.2	1
In Salah	5.8	1

Tableau 13 : Résultats du traitement avec le g7 des trois sites

2.5.3. Comparaison :

La comparaison des résultats de traitement de 2001 et 2012 de trois sites tel que : Alger (CRAAG), Adrar et In Salah nous a données des différences représentés dans le tableau suivant :

Site	Valeur absolue 2012 (μGal)	Valeur absolue 2001 (μGal)	Différence (μGal)
Alger (CRAAG)	0.8 ± 1.1	16.6 ± 1.9	-15.8
Adrar	3.2 ± 1	3.0 ± 1.7	-0.2
In Salah	95.8 ± 1	89.5 ± 2.4	-6.3

Tableau 14 : Comparaison des résultats

La différence de g au CRAAG est de $-15.8 \mu\text{Gal}$, à In Salah, elle est de $-3.7 \mu\text{Gal}$ ce qui montre un changement entre 2001 et 2012. Dans le cas de la station d'Adrar, la différence n'est guère significative.

La diminution de la valeur de g peut être liée aux phénomènes géophysiques internes

L'interprétation actuelle qui est encore au stade expérimental, est probablement celle liée au transfert de masse. Elle permettra par exemple d'estimer les ressources en eau par l'exploitation des données gravimétriques au sol en combinaison avec les données satellitaires globales telles celles de GRACE et GOCE (Hinderer, 2007).

3. Travaux en gravimétrie relative :

3.1. Introduction :

La valeur absolue de la gravité g devrait être visée au niveau du sol, les mesures absolues et relatives donnent la valeur de g à la hauteur de référence des instruments de mesure. Dans le cas du réseau gravimétrique absolu algérien pour lequel le gravimètre absolu utilisé est de type FG5-111, la valeur absolue de la gravité g est obtenue à 130 cm de hauteur.

Le but de cette étude est d'utiliser le gradient vertical pour ramener la valeur absolue de la gravité g mesurée à la hauteur de l'instrument vers sa valeur au niveau du sol.

Dans le cas des mesures absolues, ou relatives, de grande précision, le rattachement du niveau de référence des instruments au niveau du sol, doit donc être de grande précision. L'utilisation de la valeur normale communément utilisée (correction d'air libre ou de Faye) du gradient vertical de 0,3086 mGal/m n'est pas suffisante.

La valeur réelle du gradient vertical peut être généralement déterminée par des mesures gravimétriques relatives à différentes hauteurs (niveaux). Les gravimètres utilisés dans cette étude sont les gravimètres de type LaCoste & Romberg model G, équipé par le système MVR (Maximum Voltage Retroaction). Ils donnent la différence Δg de la pesanteur entre deux points gravimétriques ou deux niveaux dans le cas de calcul du gradient.

En se basant sur les mesures gravimétriques qui ont été réalisées, à deux niveaux, aux stations gravimétriques absolues d'Alger (CRAAG), de Bechar, d'Oran et de Ghardaïa, il est évident que le gradient vertical n'est pas une fonction linéaire.

La précision de la détermination du gradient vertical dépend du nombre de séries de mesures et aussi du nombre de gravimètres utilisés.

3.2. Les Instruments de Mesure Relative :

3.2.1. Principe des Gravimètres à Ressort :

Les mesures relatives de la gravité visent à déterminer les variations de la pesanteur g d'une station à une autre. La variation de la pesanteur g pour chaque station se mesure par rapport à la base. Ces mesures sont effectuées à l'aide de gravimètres relatifs. Pour avoir l'accélération de la pesanteur il faut mesurer une longueur et un temps. Le principe des mesures relatives consiste à ne mesurer qu'une seule des deux grandeurs, soit un temps, soit un déplacement.

Les gravimètres relatifs pour la mesure de la pesanteur g peuvent être basés sur deux procédés de mesures : soit un procédé dynamique soit un procédé statique.

Les gravimètres dynamiques mesurent un temps tel que la période d'oscillation d'un pendule ou la fréquence d'une corde vibrante (Mathey et Pierrot, 1969).

Les gravimètres statiques déterminent un déplacement. Le principe de ces gravimètres est d'équilibrer la pesanteur par une force antagoniste très stable dont on puisse mesurer de très petites variations. Les changements de la pesanteur vont produire le déplacement d'un repère et on va ramener l'appareil au zéro en agissant sur la force antagoniste. C'est le cas des gravimètres à fil de torsion ou à ressort qui sont actuellement les plus utilisés. On équilibre la force exercée par la pesanteur sur une masse m par celle qui est produite par la torsion d'un ressort auquel la masse est suspendue. Mais des gravimètres barométriques (Haalck, 1953), électromagnétiques (Garry et Henderson, 1967), ou cryogéniques (Prothero, 1967) ont également été conçus.

Pour les mesures sur le terrain, on utilise un système de lecture de zéro. La masse fixée au ressort principal s'étant déplacée sous l'effet d'une variation de la pesanteur, on la ramène à son zéro au moyen d'un ressort auxiliaire appelé ressort de mesure. La tension de ce ressort est commandée par une vis micrométrique calibrée.

Un contrôle régulier du comportement instrumental tout au long de la campagne de mesures reste toutefois nécessaire. Les gravimètres utilisés doivent être étalonnés. En effectuant des liaisons entre quelques points dont on connaît la différence de pesanteur (exemple : les deux points gravimétriques absolues du CRAAG et Z'ghara). L'étalonnage de l'instrument de mesure consiste à déterminer l'équivalent en mGals d'une division du micromètre. Le ressort de mesure permet de compenser des variations de la pesanteur de l'ordre de 100 mGals.

3.2.2. Les Gravimètres Astatisés (ou instables) :

Les Gravimètres instables sont plus précis que les gravimètres stables, et parmi ces gravimètres, on trouve les Gravimètres LaCoste & Romberg, Worden et Scintrex...etc. dans cette étude on ne s'intéressera qu'à l'utilisation des gravimètres LaCoste & Romberg model G équipé avec le système MVR.

Le gravimètre LaCoste & Romberg est un appareil de mesure relative basé sur le principe du ressort de longueur nulle, très sensible, qui ne supporte pas les chocs, les vibrations, les variations de pressions, les températures extrêmes. Malgré cette fragilité apparente, le gravimètre est un des rares appareils qui s'améliore en vieillissant. Cette propriété est certainement le résultat d'une stabilisation des molécules composant le ressort. Le premier modèle construit en 1968 est encore en service et reste parmi les meilleurs gravimètres actuels.

Le LaCoste & Romberg a été développé par LaCoste en 1934. Il est fabriqué en métal de faible extension thermique et il est isolé et thermostatisé à $\pm 0.002^{\circ}C$. Son degré de précision est de l'ordre de $\pm 0.01mgals$. Il a été commercialisé sous divers noms (Askania, Frost, Magnolia, North American).

On distingue deux modèles de gravimètres, le model D et le model G.

Model D : c'est un gravimètre de prospection, destiné pour la microgravimétrie. Il permet des mesures de Δg dans un intervalle de 200 mgal.

Model G : C'est un gravimètre Lacoste qui possède les propriétés suivantes :

Une très large zone de mesure (7000 mGals) ce qui lui permet de mesurer toute différence de g, aussi grande soit-elle, sans perte de précision et sans changement de zone.

Une dérive faible et régulière, moins d'un mGal par mois, grâce à la thermostatisation du système.

Une précision théorique de l'ordre de 0.01 mGal.

Le système se bloque lors des déplacements grâce à la haute sensibilité.

L'appareil est entièrement thermostatisé et compensé pour les variations de pression atmosphérique.

Les facteurs de calibration du gravimètre LaCoste & Romberg dépendent des vis micrométriques et du système de niveau et non pas du ressort. C'est pour cette raison que les facteurs de calibration ne changent pas avec le temps. Ils sont extrêmement constants.

Les gravimètres de l'INCT utilisés pour la détermination du gradient, sont les quatre gravimètres LaCoste & Romberg model G (G1140, G1152, G857et G856) équipés par le système MVR.

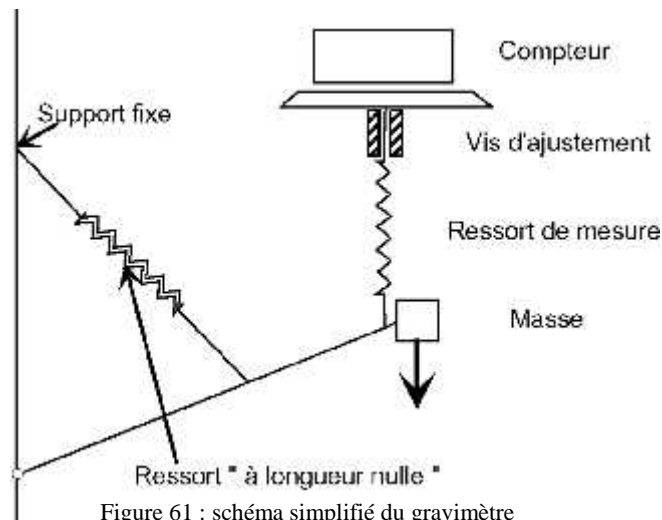


Figure 61 : schéma simplifié du gravimètre

Un gravimètre de type LaCoste & Romberg (voir figure 61) comporte:

- Un ressort en métal dont l'avantage est de présenter une faible dérive instrumentale.
- Un dispositif conçu pour procurer une plus haute sensibilité de mesure.
- Une tige horizontale qui porte la masse à l'une de ses extrémités et pivote autour d'un axe horizontal à l'autre extrémité. La tige elle-même est retenue par un ressort.

Une augmentation de la gravité fera pivoter la tige, par conséquent le ressort s'allonge, mais l'angle β entre le ressort et la tige diminue. La lecture se fait par la restauration de la tige à la position horizontale à l'aide d'une vis micrométrique

- Dispositif optique pour mesurer les variations d'allongement
- Système fragile : capteur doit être impérativement bloqué entre deux mesures (transport)

3.2.3. Description du système MVR (Maximum Voltage Rétroaction) :

Le système MVR (Maximum Voltage Rétroaction) a été conçu exclusivement pour les gravimètres LaCoste & Romberg en 1989 à l'Observatoire Royal de Belgique (Van Ruymbeke, 1989).



Figure 62 : Schéma du Gravimètre LaCoste & Romberg équipé du MVR

Cette option est disponible pour tous les gravimètres des modèles G et D. L'installation de ce système exige cependant le débranchement de la carte CPI (Capacitance beam Position Indicator) déjà installée dans tous les gravimètres.

3.2.3.1. Objectif du système MVR :

Le système MVR est nécessaire pour des mesures précises de la marée terrestre. Ce système applique et ajuste une force pour équilibrer continuellement le changement d'accélération due à la marée terrestre. Ce système permet donc l'observation du spot à la ligne de lecture, quel que soit le lieu d'observation.

Si le gravimètre permet de lire sans tourner le micromètre, les erreurs circulaires et les contres mouvements sont ainsi éliminés. Ceci exige que la position du spot soit déterminée électroniquement et une force se produit pour ramener le spot à la ligne de lecture.

Les figures ci-dessous illustrent l'apport du système MVR pour l'acquisition continue des données de l'accélération du champ de pesanteur grâce à l'enregistrement en temps réel des marées terrestre et au traitement automatique des mesures, en utilisant trois sur les quatre gravimètres dont nous disposons. L'enregistrement a duré deux jours.

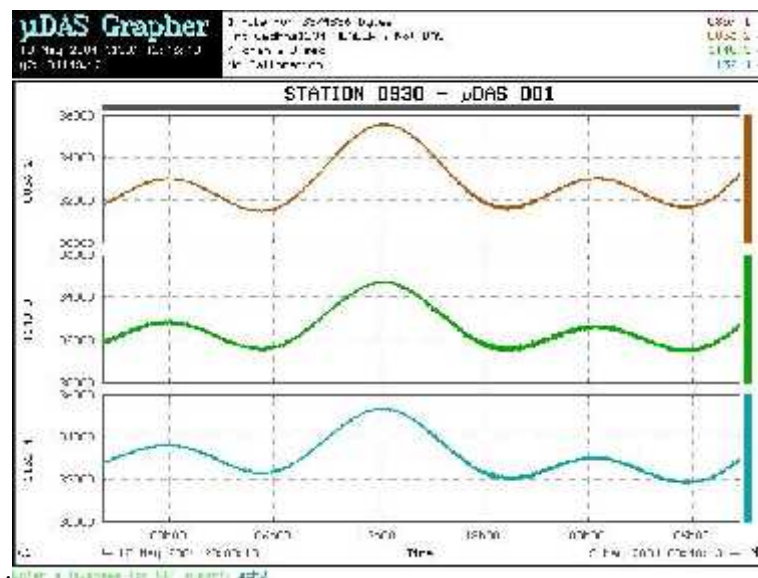


Figure 63 : Enregistrement des marées terrestres par le MVR de trois gravimètres

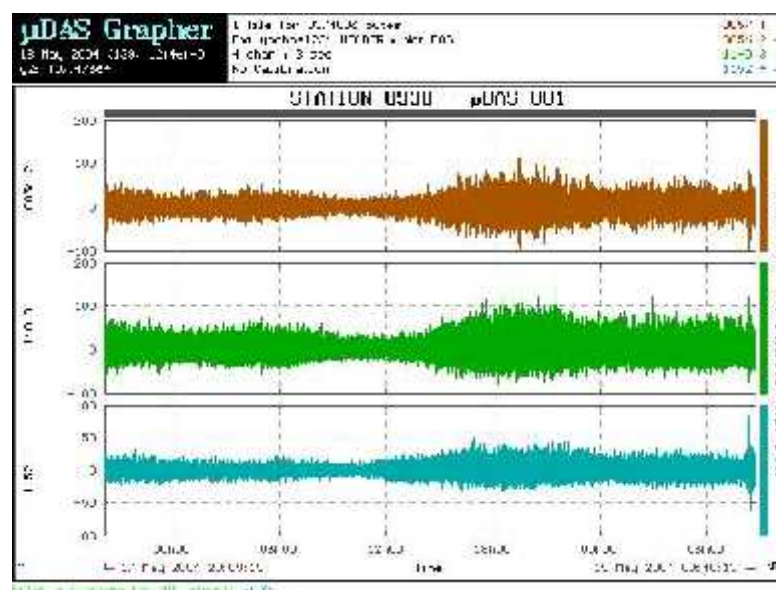


Figure 64 : Bruit de fond des trois gravimètres utilisés.

3.3. Etalonnage des gravimètres :

L'étalonnage des gravimètres est effectué généralement avant le début des campagnes terrain. Il consiste à définir en mGal l'échelle de lecture du cadran du gravimètre. Généralement, le constructeur fournit une fonction d'étalonnage approchée à partir de mesures réalisées en laboratoire et sur le terrain.

3.3.1. Fonction d'étalonnage :

La fonction d'étalonnage d'un gravimètre est nécessaire pour convertir les unités de mesure micrométriques (Unité Compteur) en une unité gravimétrique. Il n'est pas possible de calculer la fonction d'étalonnage à partir des valeurs des paramètres individuels. Par conséquent, la fonction d'étalonnage est modélisée par un modèle mathématique et les paramètres du modèle sont dérivés par comparaison avec les différences de gravité connues.

Les coefficients d'étalonnage sont en fonction du temps (t) et des lectures (z), le modèle mathématique qui représente la relation exacte entre la valeur d'une mesure observée sur le gravimètre en unité de compteur et la valeur en unité gravimétrique est donnée par la fonction d'étalonnage suivante (Schuler, 2000) :

$$g = F(z) \dots\dots\dots (1)$$

Où z est la Lecture, exprimée en unités de compteur.

Le modèle mathématique n°1 se subdivise en deux parties :

- La première partie polynomiale représente les composantes de grandes longueurs d'ondes,
- La deuxième partie périodique représente l'erreur du cadran de lecture sous forme de séries de Fourier appliquée essentiellement pour les études gravimétriques de haute précision :

Les composantes des grandes longueurs d'ondes (linéaires et non-linéaires) de la fonction d'étalonnage peuvent être estimées par un polynôme de faible degré sous la forme suivante :

$$F_{pol}(z) = N_0 + \sum_{k=1}^m Y_k z^k \dots\dots\dots (2)$$

Avec

N_0 : Niveau de l'instrument (Gravimètre),

Y_k : Coefficient d'étalonnage de k degré.

Les composantes périodiques qui modélisent l'erreur du cadran de lecture et qui sont sous forme de séries de Fourier dont les fréquences sont connues à partir de l'instrument :

$$F_{per}(z) = \sum_{l=1}^n A_l \cos(\check{S}_l z - \{l\}) \dots\dots\dots (3)$$

Avec :

A_l : L'amplitude,

\check{S}_l : La fréquence,

$\{l\}$: La phase du terme périodique de degré l .

Par application du théorème d'addition le terme périodique devient :

$$F_{per}(z) = \sum_{l=1}^n (x_l \cos \check{S}_l z + y_l \sin \check{S}_l z) \dots\dots\dots (4)$$

Avec :

$$x_l = A_l \cos \{l\}, \quad y_l = A_l \sin \{l\}$$

$$A_l = (x_l^2 + y_l^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \{l\} = \arctan \frac{y_l}{x_l}$$

La fonction complète d'étalonnage donc s'écrit sous la forme suivante :

$$F(z) = F_{pol}(z) + F_{per}(z) \dots\dots\dots (5)$$

Dans les procédures d'étalonnage au niveau du laboratoire, les petites variations des lectures gravimétriques Uz dues aux petites variations de gravités Ug observées. A partir de ça la valeur d'échelle $F'(z)$ pour la position de lecture z peut être dérivée de la fonction d'étalonnage $n^{\circ}(1)$ et s'écrit comme suit :

$$F'(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \frac{dg}{dz} \approx \frac{Ug}{Uz} \dots\dots\dots (6)$$

Donc la différence de gravité entre deux points i et j est obtenue par l'utilisation des deux expressions 1 et 6 :

$$\Delta g_{ij} = g_j - g_i = F(z_j) - F(z_i) = \int_{z_i}^{z_j} F'(z) dz \dots\dots\dots (7)$$

Et selon l'expression 2, le terme polynomial de la fonction d'étalonnage du deuxième degré s'écrit sous la forme :

$$\Delta g_{ij} = Y_1(z_j - z_i) + Y_2(z_j^2 - z_i^2) = \int_{z_i}^{z_j} (Y_1 + 2Y_2 z) dz, N_0, F_0(z) \dots\dots\dots (8)$$

Le niveau inconnu N_0 de l'instrument est trop petit.

La fonction d'étalonnage approchée est déterminée par le constructeur à partir des mesures faites en laboratoire et sur le terrain, le coefficient d'étalonnage linéaire de cette fonction peut avoir les erreurs relatives de $\pm 10^{-3} \dots 10^{-4}$ (Torge and Kanngieser, 1980). Ainsi l'utilisateur est toujours obligé de déterminer les corrections correspondantes. Et pour atteindre la haute précision demandée, l'utilisateur doit déterminer aussi les corrections des composantes non linéaires de la fonction d'étalonnage et aussi les composantes périodiques. Ces dernières ne sont pas fournies par le constructeur. Ces termes de hauts degrés sont de l'ordre de $\pm 0.01 \dots 0.1 \sim ms^{-2}$. Les lectures approchées sont obtenues par la fonction d'étalonnage approché $F_0(z)$:

$$\bar{z} = F_0(z)$$

Relation 1 devient :

$$F(z) = F_0(z) + N_0 + \Delta F(z)$$

Ou la fonction :

$$\Delta F(z) = \sum_{k=1}^m \bar{Y}_k \bar{z}^k + \sum_{l=1}^n (\bar{x}_l \cos \bar{S}_l \bar{z} + \bar{y}_l \sin \bar{S}_l \bar{z})$$

Est déterminée par l'utilisateur. Dans la formule précédente $\bar{Y}_k, \bar{x}_l, \bar{y}_l$ sont les corrections des coefficients d'étalonnage approchés.

3.3.2. Détermination de la fonction d'étalonnage :

Il existe plusieurs techniques pour la détermination de ce coefficient d'étalonnage. Parmi ces techniques on distingue :

- Technique utilisant deux points absolus (voir l'exemple d'étalonnage des gravimètres de l'INCT) :

Dans ce cas-là, l'étalonnage nécessite deux points gravimétriques absolus où la valeur de la gravité est connue (le cas de la station du CRAAG et de celle de Z'Ghara), et entre lesquels on effectue un certain nombre de mesures aller-retour, avec plusieurs gravimètres.

Soient les deux lectures L_1 et L_2 faites avec les gravimètres aux deux stations gravimétriques absolues du CRAAG et de Z'ghara, respectivement g_1 et g_2 , alors on a : $g_1 = kL_1$ et $g_2 = kL_2$, d'où $\Delta g = g_2 - g_1 = k(L_2 - L_1)$, et le coefficient d'étalonnage du gravimètre est donnée par l'expression suivante :

$$k = \frac{g_2 - g_1}{L_2 - L_1}$$

- La technique d'inclinaison :

Cette deuxième technique a l'avantage de ne pas faire transporter les gravimètres entre les points absolus, mais la seule difficulté réside dans la précision de la mesure de l'angle d'inclinaison du gravimètre. Cette technique

consiste à prendre les mesures sur les gravimètres entre les changements d'inclinaison du gravimètre placé sur une plaque bien étalonnée. La lecture du gravimètre dépend de l'angle d'inclinaison S . La variation de la lecture du gravimètre avec l'inclinaison de son axe de la position verticale d'un angle S est donnée par la formule suivante :

$$\Delta g = k(L_0 - L_1) = g \frac{S^2}{2}$$

Où L_1 et L_0 sont les lectures du gravimètre dans les positions incliné et vertical respectivement. D'où :

$$k = g \frac{\frac{S^2}{2}}{L_0 - L_1}$$

- Technique à partir des points à différentes altitudes :

Le coefficient d'étalonnage du gravimètre peut être défini par l'utilisation des points gravimétriques à différentes altitudes. Cette technique consiste à effectuer la correction d'altitude, si les points gravimétriques de mesures se trouvent sur la même verticale, ou bien la correction de Bouguer si les points gravimétriques de mesures sont disposés à une certaine distance l'une de l'autre.

$$\Delta g = (0.3086h - 0.0419h...)$$

Où h est connue.

Donc le coefficient d'étalonnage du gravimètre est donné par la relation suivante :

$$k = \frac{\Delta g}{\Delta L}$$

- La technique d'étalonnage par Gradient Vertical :

Cette quatrième et dernière technique est basée sur la correction à l'aire libre (correction de Faye). Le coefficient d'étalonnage du gravimètre peut être défini par l'utilisation d'un seul point gravimétrique à différents niveaux (deux niveaux ou plusieurs, tout dépend de la précision voulue).

$$\Delta g_h = 0.3086\Delta h$$

Et comme :

$$\Delta g_h = k\Delta l$$

Donc le coefficient d'étalonnage du gravimètre est donné par la formule suivante :

$$k = \frac{0.3086\Delta h}{\Delta l}$$

Exemple d'étalonnage des gravimètres G856, G1140, et G1152 :

Procédé utilisant deux bases où la valeur de la gravité est connue (le cas du CRAAG et de Z'ghara):

Date : 08 / 12 / 2001		Etalonnage du gravimètre G1152		
Gravimètre : G1152				
Coefficient :				
Station CRAAG		Station Z'ghara		
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2
3410.57	3451.88	-41.31	-0.005	0.000 025
3410.56	3451.86	-41.30	+0.005	0.000 025
$\Delta L_{moy} \pm e'$	- 41.305 ± 0.005			
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.000121			
Δg	- 42.3412			
Coefficient du gravi.	1.02509			

Tableau 15 : Etalonnage du gravimètre G1152

Date : 09 / 12 / 2001	Etalonnage du gravimètre G1152				
Gravimètre : G1152					
Coefficient :					
Station CRAAG	Station Z'ghara				
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2	
3410.55	3451.86	-41.31	-0.005	0.000 025	
3410.52	3451.82	-41.30	+0.005	0.000 025	
$\Delta L_{moy} \pm e'$	$- 41.305 \pm 0.005$				
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.000121				
Δg	$- 42.3412$				
Coefficient du gravi.	1.02509				

Tableau 16 : Etalonnage du gravimètre G1152

Date : 10 / 12 / 2001	Etalonnage du gravimètre G1152				
Gravimètre : G1152					
Coefficient :					
Station CRAAG	Station Z'ghara				
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2	
3410.54	3451.91	-41.37	-0.025	0.000 625	
3410.56	3451.88	-41.32	+0.025	0.000 625	
$\Delta L_{moy} \pm e'$	$- 41.345 \pm 0.025$				
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.0006047				
Δg	$- 42.3412$				
Coefficient du gravi.	1.02409				

Tableau 17 : Etalonnage du gravimètre G1152

Date : 08 / 12 / 2001	Etalonnage du gravimètre G1140				
Gravimètre : G1140					
Coefficient :					
Station CRAAG	Station Z'ghara				
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2	
3415.83	3457.47	-41.64	+0.005	0.000 025	
3415.80	3457.45	-41.65	-0.005	0.000 025	
$\Delta L_{moy} \pm e'$	$- 41.645 \pm 0.005$				
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.00012				
Δg	$- 42.3412$				
Coefficient du gravi.	1.01672				

Tableau 18 : Etalonnage du gravimètre G1140

Date : 10 / 12 / 2001 Gravimètre : G1140 Coefficient :	Etalonnage du gravimètre G1140			
Station CRAAG	Station Z'ghara			
L_1	L_2			
3415.58 3415.62	3457.28 3451.29	ΔL	∂	∂^2
$\Delta L_{moy} \pm e'$	$-41.685 \pm 0.$	-41.70 -41.67	-0.015 +0.015	0.000 225 0.000 225
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.00036			
Δg	-42.3412			
Coefficient du gravi.	1.01574			

Tableau 19 : Etalonnage du gravimètre G1140

Date : 08 / 12 / 2001 Gravimètre : G856 Coefficient :	Etalonnage du gravimètre G856			
Station CRAAG	Station Z'ghara			
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2
3484.18 3484.15	3425.70 3425.68	-41.52 -41.53	+0.005 -0.005	0.000 025 0.000 025
$\Delta L_{moy} \pm e'$	-41.525 ± 0.005			
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.00012			
Δg	-42.3412			
Coefficient du gravi.	1.01966			

Tableau 20 : Etalonnage du gravimètre G856

Date : 09 / 12 / 2001 Gravimètre : G856 Coefficient :	Etalonnage du gravimètre G856			
Station CRAAG	Station Z'ghara			
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2
3484.04 3484.00	3525.57 3525.52	-41.53 -41.52	-0.005 +0.005	0.000 025 0.000 025
$\Delta L_{moy} \pm e'$	-41.525 ± 0.005			
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.00012			
Δg	-42.3412			
Coefficient du gravi.	1.01966			

Tableau 21 : Etalonnage du gravimètre G856

Date : 10 / 12 / 2001	Etalonnage du gravimètre G856			
Gravimètre : G856				
Coefficient :				
Station CRAAG	Station Z'ghara			
L_1	L_2	ΔL	∂	∂^2
3483.96	3525.52	-41.56	+0.005	0.000 025
3483.94	3525.51	-41.57	-0.005	0.000 025
$\Delta L_{moy} \pm e'$	-41.565 ± 0.005			
$e'' = e' / \Delta L_{moy}$	± 0.00012			
$\Delta g = g_{CRAAG} - g_{Z'ghara}$	-42.3412			
Coefficient du gravi.	1.018674			

Tableau 22 : Etalonnage du gravimètre G856

Où L_1 et L_2 sont les lectures faites sur les gravimètres aux deux bases de référence respectivement g_{CRAAG} et $g_{Z'ghara}$.

3.4. La dérive instrumentale :

Un gravimètre idéal donne, pour une même valeur de l'attraction g, une même lecture l, lorsque les conditions de températures, de pression et de magnétisme sont identiques. Mais un gravimètre réel donne, même maintenu dans des conditions identiques, une lecture toujours différente à mesure que le temps s'écoule. Si, quelque modification est intervenue dans l'intervalle de deux mesures, les effets peuvent pendant longtemps encore influencer sur les lectures postérieures ou même les modifier définitivement.

On appelle ici dérive tout changement dans le gravimètre tel qu'il se traduit par une évolution progressive des lectures du cadran, alors même que g reste constant (en fait, après correction des lectures pour les petites variations de g causées par les changements périodiques de l'attraction luni-solaire) et que les circonstances de la mesure restent invariables (immobilité, température, pression et densité de l'air, magnétisme).

De cette évolution progressive et régulière qu'ont appelé dérive, il convient de distinguer nettement les sauts, modification quelque fois importantes, instantanées qui peuvent se produire soit spontanément soit par l'effet de choc ; chocs mécaniques tel que coups, secousses et vibrations sachant bien que les secousses et vibration provoquées par les transports accélèrent les dérives temporaires en cours.

Donc le modèle mathématique de la dérive est basé sur le développement en séries de Taylor des lectures z par rapport au temps t (Drewes, 1978) :

$$z(t) = z(t_0) + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_0 (t-t_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right)_0 (t-t_0)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 z}{\partial t^3}\right)_0 (t-t_0)^3 + \dots \dots \dots (1)$$

Tel que : t_0 est la référence du temps des mesures correspondantes.

En introduisons les coefficients de la dérive d_1, d_2, d_3, \dots la formule n°(1) est transformé en polynôme du dérive :

$$\begin{aligned} z(t) &= z(t_0) + d_1(t-t_0) + d_2(t-t_0)^2 + d_3(t-t_0)^3 + \dots \\ &= z(t_0) + \sum_{p=1}^s d_p (t-t_0)^p \\ &= z(t_0) + D(t) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

D'où $z(t_0)$ représente la lecture à laquelle la dérive est donnée.

Les coefficients de la dérive d_1, d_2, d_3, \dots sont déterminées par des mesures répétées, qui devraient être distribués de manière aussi uniforme que possible au cours de la période des observations, en fonction du type (linéaires, non linéaires, sauts) et la valeur de la dérive, ainsi que la précision demandé et le model approché. Différentes procédures de mesure sont développées et leur efficacité a été vérifiée particulièrement pour la détermination de la dérive (Watermann, 1957). Les méthodes suivantes ont prouvé leur utilité figure 65 :

- méthode de différence avec le contrôle direct de la dérive au point final de chaque différence de gravité,
La séquence de la station :
1-2-1, 1-2-1-2, 1-2-1-2-1-2, etc.
- méthode d'étoiles ayant des liens avec un point principal et le contrôle direct de la dérive,
La séquence de la station :
1-2-1-3-1-4-1 ou similaire ;
- méthode de pas à pas avec au moins trois occupations par station en successions court,
Séquence :
1-2-1-2-3-2-3-4-3 ou similaire ;
- méthode de profil avec une seule occupation, double occupations ou plusieurs occupations par station dans le profil,
Séquence :
1-2-3-4-...-1 ou 1-2-3-4-...-4-3-2-1 et similaire.

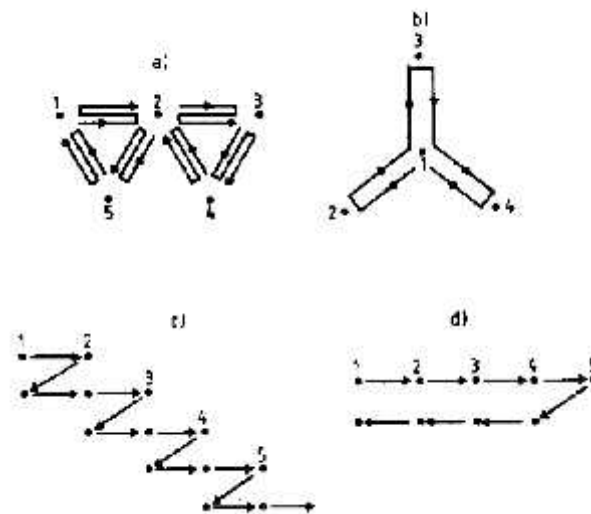


Figure 65 : Les méthodes de détermination de la dérive : a) Méthode de différence (trois points par ligne), b) Méthode des étoiles, c) la méthode de l'étape (trois occupations par station), d) Méthode de profil (double), après Watermann (1957).

La ré-observation rapide des mesure par les trois méthodes telles que la méthode de différence, la méthode des étoiles, la méthode de l'étape (pas à pas) donnent la dérive à court terme, et souvent les stations d'occupation principales donnent la dérive à long terme.

3.4.1. Le calcul de la dérive :

La dérive peut être calculée à chaque station A comme suit :

$$D_A = \frac{L_{Base-retour} - L_{Base-départ}}{t_{Base-retour} - t_{Base-départ}} (t_A - t_{Base-départ})$$

Où t correspond au temps de la mesure.

Cette dérive est appliquée à chaque mesure A_i , faite à un temps t_A pour chaque prospect :

$$L_{corrigé} = L_{mesuré} - D_A$$

3.5. Etude du Gradient Vertical par des Mesures Gravimétriques à deux Niveaux :

Dès les premières investigations, il s'est avéré que l'utilisation de la valeur normale du gradient vertical de 0,3086 mGal/m pour ramener la valeur absolue de la gravité g mesurée à la hauteur de l'instrument de mesure vers sa valeur au niveau du sol ne permettait pas une précision suffisante, notamment lors de la résolution du problème inverse de la détermination de g en utilisant l'équation du mouvement de chute libre

L'utilisation du gradient vertical normal (ou réel) pour cette étude peut entraîner une différence de la correction à l'air libre d'environ 0.03 $\mu\text{Gal/cm}$ à Bechar, de 0.08 $\mu\text{Gal/cm}$ au CRAAG, 1.26 $\mu\text{Gal/cm}$ à Oran et enfin de 0.32 $\mu\text{Gal/cm}$ à Ghardaïa.

Dans ce travail, il s'agit de trouver un rapport g/h qui permette une meilleure réduction de la pesanteur mesurée par les gravimètres absolus (ou relatifs) à une hauteur donnée vers sa valeur au niveau du sol. Dans notre cas, l'altitude des mesures est de 130 cm.

Notons qu'il est possible d'étudier la non-linéarité du rapport g/h , en mesurant également la pesanteur à plusieurs niveaux. La correction à l'air libre (correction d'altitude ou correction de Faye) peut être calculée directement de cette fonction g/h .

3.5.1. Le Modèle Mathématique :

Les données gravimétriques relatives mesurées à l'aide des gravimètres LaCoste & Romberg, à différents niveaux, pour la correction de la valeur absolue donnée à 130 cm, sont exploitées pour calculer le gradient vertical.

Dans une première étape, nous supposons que la gravité varie linéairement avec l'altitude selon l'expression ci-dessous :

$$\Delta g_l = \frac{\partial}{\partial h} \Delta h_l, (l = 1, 2, \dots, n-1) \dots \dots \dots (1)$$

Le gradient vertical est donné par la formule suivante :

$$V = \frac{\partial}{\partial h},$$

Où :

$$\Delta g_l = g(h_{l+1}) - g(h_l),$$

et :

$$\Delta h_l = h_{l+1} - h_l;$$

$g(h_l)$ sont les mesures gravimétriques à différents niveaux h_l et le gradient vertical est un paramètre inconnu dans l'ajustement.

Dans une seconde étape, la variation de la gravité est considérée comme une fonction quadratique de l'altitude, en nous limitons au second ordre. L'équation d'observation est alors donnée par l'expression :

$$g(h_l) = g_0 + \frac{\partial}{\partial h} h_l + \frac{\partial^2 g}{2! \partial h^2} h_l^2, (l = 1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (2)$$

Posons :

$$a = \frac{\partial}{\partial h}, \quad b = \frac{\partial^2 g}{\partial h^2},$$

Alors $g(h_l)$ sont les mesures gravimétriques acquises à différents niveaux h_l et g_0 , a , b sont les paramètres inconnus dans l'ajustement.

3.5.2. Mesures Gravimétriques à deux niveaux différents :

La valeur absolue mesurée par le gravimètre absolu FG5-111 à 1m30 est réduite au sol en exploitant les gradients déterminés en effectuant plusieurs aller-retour avec des gravimètres relatifs model G équipés par le système MVR sur deux (2) niveaux (1m30 et au niveau du sol).

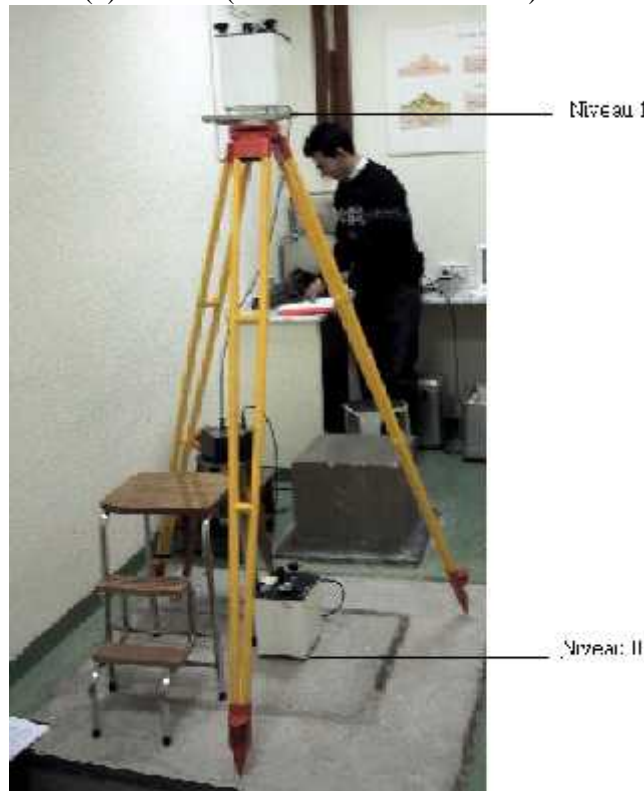


Figure 66 : Mesure de la gravité à deux niveaux en utilisant un trépied.

Cette opération doit être répétée plusieurs fois afin d'obtenir une moyenne statistique significative de Δg (μGal). Le résultat sera divisé par la hauteur des points de mesures, soit 130 cm (l'unité est en μGal) dans notre cas. La valeur du gradient est généralement comprise entre 2.7 et 3.3 μGal (Francis et al. 2001).

Pour garder la précision du gravimètre absolu FG5-111 en chaque site, il est souhaitable d'effectuer ces mesures avec un gravimètre relatif très précis (i.e., utiliser un gravimètre relatif de même ordre de précision que le gravimètre absolu FG5-111) tel que le nouveau gravimètre CG-5 de Scintrex.

Le nombre de gravimètres utilisés dans chaque station absolue ainsi que le nombre de séries sont présentés ci-dessous :

Station Absolue	Nombre de Série (Niveau 0-Niveau 1)	Gravimètres Utilisés
Bechar	09	G857-G856-G1140-G1152
Oran	11	G1140-G856
CRAAG	11	G1140-G1152
Ghardaïa	11	G856-G1152

Tableau 23 : nombre de série de mesure avec le nombre de gravimètre utilisé

Il est à noter que dans cette étude, les mesures gravimétriques n'ont été prises qu'à deux différents niveaux : niveau du sol (zéro (0)) et niveau 1 (130 cm). Un traitement est effectué afin de corriger les mesures de marée luni-solaire (CLS) et la correction de la dérive instrumentale. Les résultats des mesures sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous.

3.5.3. Réduction des données :

. Site de Bechar :

Les gravimètres utilisés à la station absolue de Bechar pour le calcul du gradient sont le LCR-G1152, LCR-G1140, LCR-G857 et le LCR-G856, les travaux ont commencés le 24/04/2004 jusqu'au 28/04/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	08h : 20	2792286,92	2858408,27	-65	2858343,27	0		
1	08h : 45	2791890,53	2858002,5	-63	2857939,5	0,47	-404,24	-3,11
0	09h : 15	2792281,09	2858402,31	-58	2858344,31	0,49	404,33	3,11
1	09h : 45	2791877,8	2857989,47	-49	2857940,47	3,16	-407	-3,13
0	10h : 10	2792268,19	2858389,1	-39	2858350,1	1,16	408,47	3,14
1	10h : 35	2791858,58	2857969,79	-27	2857942,79	1,22	-408,53	-3,14
0	11h : 00	2792246,14	2858366,53	-14	2858352,53	4,77	404,97	3,12
1	11h : 20	2791842,54	2857953,37	-2	2857951,37	-0,1	-401,07	-3,09
0	11h : 40	2792222,51	2858342,34	10	2858352,34			

Tableau 24 : Observations du Gravimètre G1152 à la Date du 24/04/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	07h: 02	2751541.86	2795181.31	-39	2795142.31	0		
1	07h: 24	2751154.32	2794787.63	-40	2794747.63	6.91	-401.59	-3.09
0	07h: 45	2751556.13	2795195.81	-40	2795155.81	8.94	399.24	3.07
1	08h: 02	2751171.23	2794804.81	-41	2794763.81	5.37	-397.37	-3.06
0	08h: 20	2751567.99	2795207.86	-41	2795166.86	0.66	402.39	3.10
1	08h: 36	2751172.45	2794806.05	-41	2794765.05	4.58	-406.39	-3.13
0	09h: 00	2751578.27	2795218.30	-40	2795178.30	5.22	408.03	3.14
1	09h: 20	2751179.91	2794813.62	-39	2794774.62	2.75	-406.43	-3.13
0	09h: 44	2751581.28	2795221.36	-37	2795184.36	-12.07	421.81	3.24
1	10h: 02	2751155.17	2794788.49	-35	2794753.49	1.13	432.00	3.32
0	10h: 22	2751578.70	2795218.74	-32	2795186.74			

Tableau 25 : Observations du Gravimètre G1140 à la Date du 26/04/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	07h: 16	2751559.40	2816826.39	-30	2816796.39	0		
1	07h: 36	2751165.32	2816422.96	-29	2816393.96	2.52	-404.95	-3.11
0	07h: 55	2751561.27	2816828.30	-27	2816801.30	-7.08	414.42	3.19
1	08h: 15	2751148.19	2816405.43	-26	2816379.43	-5.00	-416.87	-3.21
0	08h: 38	2751547.84	2816814.56	-24	2816790.56	7.14	403.99	3.11
1	09h: 00	2751158.90	2816416.39	-23	2816393.39	3.04	-400.21	-3.08
0	09h: 20	2751551.57	2816818.37	-22	2816796.37	0.10	402.89	3.10
1	09h: 40	2751157.13	2816414.58	-21	2816393.58	4.11	-406.90	-3.13
0	10h: 00	2751557.64	2816824.59	-20	2816804.59	-4.08	415.09	3.19
1	10h: 24	2751146.41	2816403.60	-19	2816384.60	-10.49	-409.50	3.15
0	10h: 40	2751538.61	2816805.11	-18	2816787.11			

Tableau 26 : Observations du Gravimètre G857 à la Date du 27/04/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	07h: 32	2841389.56	2894807.68	-20	2894787.68	0		
1	07h: 54	2841024.36	2894435.62	-15	2894420.62	10.48	-377.54	-2.90
0	08h: 14	2841399.38	2894817.69	-10	2894807.69	-2.88	389.95	3.00
1	08h: 30	2841012.40	2894423.43	-8	2894415.43	4.4	-396.66	-3.05
0	08h: 48	2841403.65	2894822.04	-5	2894817.04	0.99	400.62	3.08
1	09h: 06	2841009.42	2894420.40	-3	2894417.40	-11.09	-388.55	-2.99
0	09h: 22	2841379.16	2894797.09	-1	2894796.09	5.56	373.13	2.87
1	09h: 38	2841017.38	2894428.51	0	2894428.51	19.01	-386.59	-2.97
0	09h: 54	2841414.52	2894833.11	1	2894834.11	-2.28	407.88	3.14
1	10h: 12	2841011.65	2894422.67	1	2894423.67	-1.75	-408.69	-3.14
0	10h: 30	2841411.09	2894829.62	1	2894830.62			

Tableau 27 : Observations du Gravimètre G856 à la Date du 28/04/2004.

. Site d'Oran :

Les gravimètres utilisés à la station absolue d'Oran pour le calcul du gradient sont le LaCoste & Romberg-G1140 et le LCR-G856, les travaux ont commencé le 01/05/2004 jusqu'au 03/05/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	10h: 24	3342872.80	3407289,96	72	3407361.96	0		
1	10h: 42	3342308.53	3406714,82	75	3406789.82	-0.87	571.27	4.39
0	11h: 08	3342864.82	3407281,83	78	3407359.83	-2.09	-570.10	-4.40
1	11h: 34	3342302.48	3406708,65	77	3406785.65	2.41	576.59	4.44
0	11h: 54	3342873.91	3407291,1	73	3407364.1	26.99	-551.46	-4.24
1	12h: 12	3342360.64	3406767,93	69	3406836.93	6.88	534.05	4.11
0	12h: 49	3342914.17	3407332,13	53	3407385.13	-9.07	-557.27	-4.29
1	13h: 06	3342370.23	3406777,7	46	3406823.70	9.19	570.62	4.39
0	13h: 24	3342951.38	3407370,05	34	3407404.05	-6.91	-587.26	-4.52
1	13h: 44	3342379.46	3406787,11	22	3406809.11	-0.85	594.09	4.57
0	14h: 02	3342970.39	3407389,43	13	3407402.43			

Tableau 28 : Observations du Gravimètre G856 à la Date du 01/05/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	11h: 04	3254866.11	3308050,62	129	3308179.62	0		
1	11h: 22	3254328.67	3307504,4	135	3307639.4	6.70	546.92	4.21
0	11h: 39	3254866.14	3308050,65	142	3308192.65	2.84	-550.41	-4.23
1	11h: 59	3254324.91	3307500,58	145	3307645.58	2.16	549.23	4.22
0	12h: 16	3254866.14	3308050,65	146	3308196.65	3.45	-547.62	-4.21
1	12h: 34	3254332.89	3307508,69	144	3307652.69	9.06	553.02	4.25
0	12h: 52	3254889.87	3308074,77	140	3308214.77	-25.33	-587.41	-4.52
1	13h: 10	3254293.88	3307469,04	133	3307602.04	-13.53	599.21	4.61
0	13h: 28	3254879.98	3308064,72	123	3308187.72	-4.63	-590.31	-4.54
1	13h: 46	3254303.46	3307478,78	114	3307592.78	-15.05	579.89	4.46
0	14h: 04	3254873.00	3308057,62	100	3308157.62			

Tableau 29 : Observations du Gravimètre G1140 à la Date du 03/05/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	7h: 40	3342892.94	3407310,49	-45	3407265.49	0		
1	7h: 56	3342360.53	3406767,82	-32	3406735.82	24.17	553.84	4.26
0	8h: 16	3342915.88	3407333,87	-14	3407319.87	11.38	-572.67	-4.41
1	8h: 34	3342345.45	3406752,45	5	3406757.45	6.75	569.17	4.38
0	8h: 52	3342896.74	3407314,36	19	3407333.36	8.76	-567.15	-4.36
1	9h: 08	3342328.32	3406734,99	39	3406773.99	36.50	595.87	4.58
0	9h: 24	3342937.95	3407356,36	53	3407409.36	31.80	-603.55	-4.64
1	9h: 44	3342367.17	3406774,59	71	3406845.59	-0.23	563.54	4.34
0	10h: 02	3342907.10	3407324,92	84	3407408.92	1.16	562.17	-4.32
1	10h: 19	3342340.94	3406747,85	100	3406847.85	4.83	565.90	4.35
0	10h: 36	3342890.08	3407307,57	111	3407418.57			

Tableau 30 : Observations du Gravimètre G856 à la Date du 03/05/2004.

. Site d'Alger (CRAAG) :

Les gravimètres utilisés à la station absolue du CRAAG pour le calcul du gradient sont le LaCoste & Romberg-G1140 et le LaCoste & Romberg G1152, les travaux ont commencé le 04/11/2003 et se sont achevés le 15/11/2004.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	08h : 34	3432216.30	3514932.71	50	3514982.71	0		
1	08h : 56	3431812.49	3514519.17	56	3514575.17	-2.41	405.13	3.12
0	09h : 12	3432203.44	3514919.54	59	3514978.54	3.26	-400.11	-3.08
1	09h : 34	3431813.22	3514519.92	63	3514582.92	-2.13	393.49	3.03
0	09h : 54	3432194.59	3514910.48	64	3514974.48	12.94	-378.62	-2.91
1	10 h :14	3431837.51	3514544.80	64	3514608.8	3.03	368.71	2.84
0	10h : 34	3432202.45	3514918.53	62	3514980.53	28.22	-343.51	-2.64
1	10h : 54	3431898.49	3514607.24	58	3514665.24	4.17	319.46	2.46
0	11h : 14	3432220.35	3514936.86	52	3514988.86	-34.03	-357.65	-2.75
1	11h : 34	3431844.73	3514552.19	45	3514597.19	-5.02	386.65	2.97
0	11h : 54	3432226.17	3514942.82	36	3514978.82			

Tableau 31 : Observations du Gravimètre G1152 à la Date du 04/11/2003.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	08h:38	3402535.00	3458744.88	12	3458756.88	0		
1	09h:16	3402137.42	3458340.73	-6	3458334.73	-6.06	416.09	3.2
0	09h:34	3402552.78	3458762.95	-15	3458747.95	-2.79	-416.01	-3.2
1	10h:06	3402150.46	3458353.98	-27	3458326.98	-7.03	413.94	3.18
0	10h:24	3402561.65	3458771.97	-35	3458736.97	-2.00	-411.95	-3.17
1	10h:42	3402159.39	3458363.07	-40	3458323.07	0.81	414.71	3.19
0	11h:02	3402574.15	3458784.67	-46	3458738.67	7.33	-408.27	-3.14
1	11h:22	3402183.66	3458387.73	-50	3458337.73	3.67	404.61	3.11
0	11h:40	3402589.60	3458800.38	-54	3458746.38	-4.06	-412.71	-3.18
1	11h:58	3402183.28	3458387.35	-57	3458330.35			

Tableau 32 : Observations du Gravimètre G1140 à la Date du 15/11/2003.

. Site de Ghardaïa :

Les gravimètres utilisés à la station absolue de Ghardaïa pour le calcul du gradient sont le LaCoste & Rombert -G856 et le LaCoste & Rombert -G1152, les travaux ont commencés le 12/06/2005 jusqu'au 13/06/2005.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	14h: 42	2962175.97	3018190.72	90	3018280.72	0		
1	15h:10	2961757.86	3017764.70	98	3017862.7	13.44	431.46	3.31
0	15h:34	2962187.71	3018202.68	103	3018305.68	0.03	-442.95	-3.40
1	16h:00	2961751.06	3017757.77	105	3017862.77	12.42	455.33	3.50
0	16h:26	2962210.62	3018226.02	105	3018331.02	13.26	-454.99	-3.50
1	16h:52	2961780.03	3017787.29	102	3017889.29	0.29	442.02	3.40
0	17h:14	2962219.00	3018234.56	97	3018331.56	0.50	-441.77	-3.39
1	17h:38	2961793.82	3017801.34	89	3017890.34	0.08	441.30	3.39
0	17h:58	2962234.85	3018250.71	81	3018331.71	1.72	-439.66	-3.38
1	18h:18	2961813.87	3017821.77	72	3017893.77	-0.91	437.04	3.36
0	18h:38	2962250.74	3018266.90	63	3018329.9			

Tableau 33 : Observations du Gravimètre G856 à la Date du 12/06/2005.

Niveau	Temps	Lecture μM	Lecture μM convertie (μGals)	CLS (μGals)	Lecture μM corrigé (μGals)	Dérive (μGals)	g (μGals)	Gradient ($\mu\text{Gal/cm}$)
0	13:58	2937584.43	3007498.94	42	3007540.94	0		
1	14:38	2937163.58	3007068.07	57	3007125.07	15.16	431.03	3.32
0	15:00	2937586.87	3007501.44	63	3007564.44	6.10	-433.27	-3.33
1	15:24	2937162.36	3007066.82	71	3007137.82	2.05	428.67	3.30
0	15:46	2937578.01	3007492.37	76	3007568.37	-3.46	-434.01	-3.34
1	16:06	2937147.11	3007051.21	80	3007131.21	-9.23	427.94	3.29
0	16:26	2937553.15	3007466.92	83	3007549.92	-14.05	-432.76	-3.33
1	16:46	2937115.76	3007019.12	84	3007103.12	3.20	449.99	3.46
0	17:08	2937558.73	3007472.63	84	3007556.63	6.94	-446.57	-3.44
1	17:30	2937130.30	3007034.00	83	3007117.00	-27.54	412.09	3.17
0	17:54	2937507.36	3007420.04	79	3007499.04			

Tableau 34 : Observations du Gravimètre G1152 à la Date du 13/06/2005.

3.5.4. Analyse de données (cas de Bechar) :

Les quatre gravimètres ont été utilisés pour le calcul du gradient au niveau du site absolu de Bechar. 9 valeurs g (μGal) ont été calculées pour chaque gravimètre, excepté pour le LaCoste & Rombert - G1152, pour lequel 7 valeurs g (μGal) ont été calculées. La valeur moyenne de g (μGal) avec la déviation standard g (μGal) de chaque gravimètre est représentée dans le Tableau suivant :

de séries (g)	LCR G856	LCR G857	LCR G1140	LCR G1152
1	-377.54	-404.95	-401.59	-404.24
2	389.95	414.42	399.24	404.33
3	-396.66	-416.87	-397.37	-407.00
4	400.62	403.99	402.39	408.47
5	-388.55	-400.21	-406.39	-408.53
6	373.13	402.89	408.03	404.97
7	-386.59	-406.90	-406.43	-401.07
8	407.88	415.09	421.81	
9	-408.69	-409.50	432.00	
Moyenne de g (μGal)	392,18	408,31	408,36	405,52
Déviati on stan dard g (μGal)	$\pm 12,44$	$\pm 5,97$	$\pm 11,36$	$\pm 2,68$
Moyenne de l'ensem ble de g (μGal)	403.55			
Déviati on stan dard g (μGal)	± 11.28			

Tableau 35 : Calcul

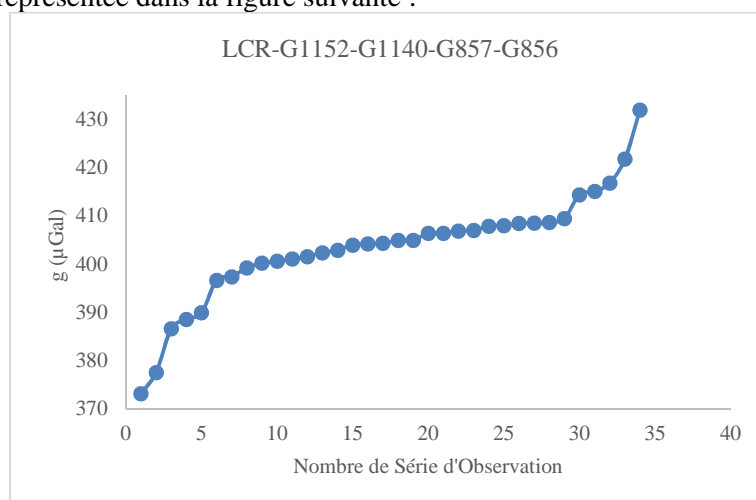
Ce tableau représente g (μGal), la moyenne des différents g (μGal) et la déviation standard g (μGal) de chaque gravimètre. La Moyenne de l'ensemble de g (μGal) avec sa déviation standard g (μGal) sont également données.

Le calcul nous montre que :

- La valeur moyenne de g (μGal) des 4 gravimètres est égale à 403.55 μGal ,
- Les écart-types moyens : $\sigma_{G8} = 1,4 \mu\text{G}$, $\sigma_{G8} = 4,7 \mu\text{G}$, $\sigma_{G1} = 4,7 \mu\text{G}$ et $\sigma_{G1} = 1,9 \mu\text{G}$,

On constate d'après ces critères de qualité appliqués au calcul que l'écart-type moyen varie entre 1.2 μGal et 11.4 μGal , ce qui nous conduit à conclure que les observations effectués à l'aide de ce gravimètre sont entachées d'erreurs. Pour cette raison, les observations du G856 ne seront pas prises en compte dans le calcul.

La distribution des g (μGal), pour l'ensemble des gravimètres utilisés, en fonction du nombre de série d'observation est représentée dans la figure suivante :

Figure 67 : Représentation graphique de g (μGal) de l'ensemble des gravimètres utilisés en fonction du nombre de série d'observations

Il est possible de visualiser la distribution des g (μGal) de l'ensemble des gravimètres à analyser en les représentant sous forme d'histogramme puis de comparer la forme de cet histogramme avec une loi de distribution normale dont les paramètres sont déterminés à partir des réalisations g (μGal). Les g (μGal) à utiliser dans le calcul seront ainsi sélectionnés.

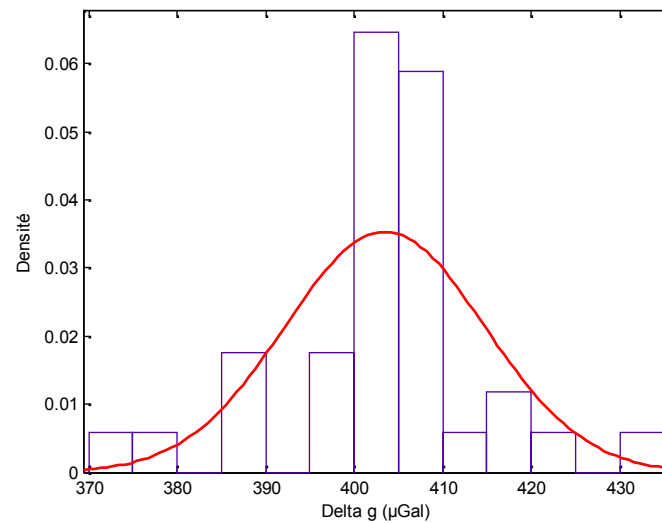


Figure 68 : Histogramme de g (μGal) de l'ensemble des gravimètres utilisés en fonction du nombre de série d'observations.

Il est aisé de constater que cet histogramme montre une certaine asymétrie. Les valeurs de g (μGal) appartenant à l'intervalle $400 \leq g$ (μGal) < 410 sont sans doute anormales et pourraient n'avoir aucune signification. Les valeurs de g (μGal) qui se trouvent dans l'intervalle $410 \leq g$ (μGal) < 400 seront prises en considération. Elles sont représentées dans la figure suivante :

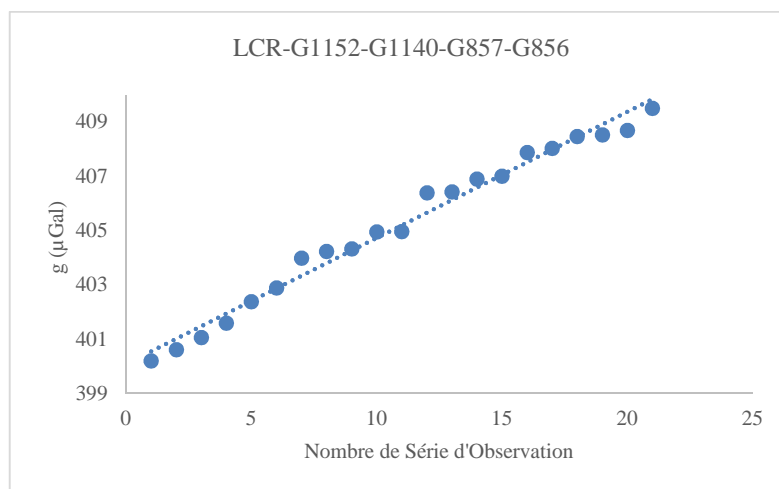


Figure 69 : Représentation graphique de g (μGal) dans l'intervalle $410 \leq g$ (μGal) < 400 (μGal)

La distribution des mesures est très proche d'une variation linéaire dont il est aisé de déterminer les paramètres par régression en utilisant les moindres carrés.

Les résultats finaux de l'ajustement des g (μGal) sont représentés dans le tableau suivant :

Nombre de Série d'Observation	g (μGal)	gradient χ ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)
1	400.21	3.08
2	400.62	3.08
3	401.07	3.09
4	401.59	3.09
5	402.39	3.10
6	402.89	3.10
7	403.99	3.11
8	404.24	3.11
9	404.33	3.11
10	404.95	3.12
11	404.97	3.12
12	406.39	3.13
13	406.43	3.13
14	406.9	3.13
15	407.00	3.13
16	407.88	3.14
17	408.03	3.14
18	408.47	3.14
19	408.53	3.14
20	408.69	3.14
21	409.5	3.15
moyenne	405.19	3.12
Déviatiion standard	± 2.91	± 0.02

Tableau 36 : Résultats final de calcul

L'analyse des données acquises par les quatre gravimètres au niveau de la station absolue de Bechar nous a donné :

$$g (\mu\text{Gal}) = 405.19 \pm 2.91, \text{ et}$$

$$\chi (\mu\text{Gal}/\text{cm}) = 3.12 \pm 0.02$$

L'analyse des données des autres stations absolues : Oran, Alger (CRAAG) et Ghardaïa a été effectuée de la même manière, et les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

stations	g (μGal)	Déviatiion standard (μGal)	χ ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)	Déviatiion standard ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)
CRAAG	391.27	± 6.96	3.01	± 0.05
Ghardaïa	437.73	± 3.97	3.37	± 0.04
Oran	569.92	± 5.282	4.38	± 0.04

Tableau 37 : Résultats d'analyse des trois stations Oran, CRAAG et Ghardaïa

3.5.5. Rattachement

Ces déterminations du gradient, représenté dans le tableau 37, ont été utilisées lors du retraitement de données absolues de ces quatre points en les injectant dans logiciel g7 de traitement du constructeur.

Les tableaux 37 à 40, ci-après montre la différence de valeurs avant et après le calcul du gradient

Site d'Alger (CRAAG) :

	Gradient Vertical -3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical -3.086 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$	Gradient Vertical -3.01 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$
Valeur Absolue (μGal)	16.6	16.04	16.6
Déviatiion Standard (μGal)	1.9	1.9	1.9

Tableau 37 : Résultats de rattachement de la station du CRAAG

Site de Bechar :

	Gradient Vertical -3 μGal/cm	Gradient Vertical -3.086 μGal/cm	Gradient Vertical -3.12 μGal/cm
Valeur Absolue (μGal)	66.9	65.8	65.4
Déviatiion Standard (μGal)	3.6	3.6	3.6

Tableau 38 : Résultats de rattachement de la station de Bechar

Site de Ghardaïa :

	Gradient Vertical -3 μGal/cm	Gradient Vertical -3.086 μGal/cm	Gradient Vertical -3.37 μGal/cm
Valeur Absolue (μGal)	59.8	59.2	57.2
Déviatiion Standard (μGal)	1.7	1.7	1.7

Tableau 39 : Résultats de rattachement de la station de Ghardaïa

Site d'Oran :

	Gradient Vertical -3 μGal/cm	Gradient Vertical -3.086 μGal/cm	Gradient Vertical -4.38 μGal/cm
Valeur Absolue (μGal)	36.3	35.2	18.9
Déviatiion Standard (μGal)	2.8	2.8	2.8

Tableau 40 : Résultats de rattachement de la station d'Oran

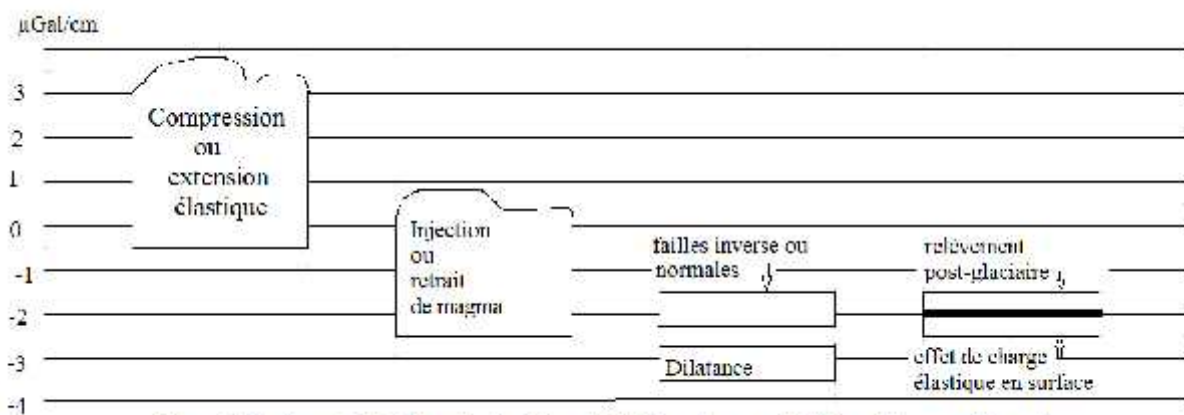
3.6. Interprétation :

Les variations de pesanteur peuvent s'expliquer par :

- des changements de densité dans la croûte terrestre ou par
- la modification de l'altitude de la surface topographique provoquée par des phénomènes géophysiques complexes.

En général, ces deux processus sont concomitants et leur contribution respective à l'effet total est extrêmement difficile à évaluer expérimentalement. Si bien que l'on a été amené à choisir le gradient de la pesanteur. C'est-à-dire la variation de la pesanteur avec l'altitude, comme paramètre de base en lui attribuant des valeurs expérimentales et/ou théoriques correspondant aux différents processus tectoniques.

Le rapport du gradient vertical g/h est décomposé en un effet élastique (somme des effets du déplacement vertical et de la redistribution des masses à l'intérieur de la Terre) et un effet d'attraction newtonienne (somme des effets d'attraction de la charge locale et des charges distantes)



Valeurs Théoriques du Gradient Gravimétrique de Déformation pour Différents Processus Tectoniques.

Fig. 70 : Adapté de Tanner et Lambert (1987)

La figure 70, inspirée de Tanner et Lambert (1987), donne un ordre de grandeur théorique, assez bien vérifié en pratique, du gradient gravimétrique de déformation. Ces valeurs, pour ce qui concerne la dilatance, les failles inverses ou normales sont tirées de Rundle (1978), pour l'effet de charge élastique en surface, de Farrell (1972) et pour le rebond postglaciaire de Wu et Peltier (1982). Il va sans dire que dans des endroits où la croûte est très fracturée, le gradient peut prendre des valeurs parfois très différentes de celles représentées sur la figure, et les valeurs comprises entre +3 et -3 mGal/cm semblent acceptables.

D'après les résultats du gradient obtenus dans notre travail, et leur comparaison aux résultats donnés sur la figure 70, il semblerait que nous soyons en présence de compression ou d'extension élastique.

4. Conclusions :

Données absolues :

- Deux campagnes gravimétriques absolues ont été réalisées en Algérie. La première, en 2001, avait été menée à l'aide d'un gravimètre absolu de type FG5-111 de NIMA en 12 stations. puis en 2012, la seconde avait été effectuée en utilisant un gravimètre absolu FG-206 de l'EOST (Strasbourg) en 3 stations. Les mesures ont été effectuées à une hauteur de 1,30m par rapport à la surface. En absence de toute information sur le gradient vertical du champ de pesanteur aux différentes stations, nous avons alors utilisé la valeur théorique de $-3.0 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ pour corriger les mesures brutes,
Une fois que le gradient vertical de g aura été mesuré en chaque station, nous fournirons alors les résultats définitifs avec ces nouveaux paramètres.

Données relatives :

Les premiers résultats de la détermination du gradient sont établis grâce aux mesures effectuées à l'aide de quatre gravimètres LaCoste & Romberg model G (G856, G857, G1140 et G1152) équipés du système MVR (Maximum Voltage Rétroaction). Après analyse de données, nous pouvons conclure que :

- Il ne suffit pas d'utiliser la correction à l'air libre (correction de Faye) pour ramener la valeur absolue de 130 cm au sol. Il est préférable d'utiliser, lorsque cela est possible, des gravimètres de différentes firmes et différents modèles de haute précision pour avoir la valeur réelle du gradient.
- La mesure gravimétrique à deux (02) niveaux est insuffisante pour être utilisée dans le rattachement ou le calcul du gradient, y compris avec quatre gravimètres. Il faut utiliser un grand nombre de niveaux.
- Il est indispensable que les résultats obtenus avec les quatre gravimètres au niveau du site de Bechar soient comparés à l'aide d'autres gravimètres, par exemple le model D de LaCoste & Romberg ou le CG3 et le CG5 de SCINTREX à deux et à plusieurs niveaux.
- Un seul gravimètre ne suffit pas pour déterminer le gradient bien que les mesures soient réalisées à plusieurs niveaux. Un maximum de gravimètres nous semble nécessaire.
- La moyenne de la précision de la mesure gravimétrique absolue peut atteindre $1.5 \mu\text{Gal}$. Pour le rattachement ou pour le calcul du gradient il faut donc utiliser des gravimètres de même ordre de précision que le gravimètre absolu.
- Dans le rattachement ou le calcul du gradient il faut tenir compte du nombre de gravimètres exploités, du nombre de mesures répétées ainsi que différents niveaux de mesure.

Remarque :

Il est à noter que la méthode et l'appareillage utilisés dans ces campagnes de mesures absolues n'ont été validés qu'en 2004 par le Bureau International des Poids et Mesures (Sèvres, France) comme technique principale de détermination de la valeur absolue de g (LaFehr et Nabighian, 2012).

5. Bibliographie

- Cazenave A. et K. Feigl. Formes et Mouvements de la Terre : Satellite et Géodésie, CNRS Editions, 160 pp, 1994.
- Donghui Y., Minster J. B., Bentley C.: Ocean tidal loading correction. Geophysical and Polar Research Center. University of Wisconsin. 1999.
- Faller, J. E.: Results of an absolute determination of the acceleration of gravity. JGR 70, 4035-4038, 1965.
- Farrell, W. E.: Deformation of the earth by surface loads. Rev. Geoph. 10, 761-797, 1972.
- Francis, O., INCT BULETTIN DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES 2002 N°9, 3-9 : Réseau de Gravimétrie Absolue Algérien.
- Garry C., Henderson PH. D. A Gravimeter for Marine, Airborne, and Lunar Surface Measurements. General Dynamics Fort Worth Texas. Applied Research Laboratory, pp 1-16, 1967.
- Haalck, H.: Lehrbuch der angewandten Geophysik. Gebr. Borntraeger, Berlin-Nikolassee 1953.
- Hinderer, J., Rosier, L. C. and Rogister, Y., A search for the ratio between gravity variation and vertical displacement due to a surface load. Geophys. J. Int, 171 (3), pp 986–994, 2007.
- Idres, M., Aifa, T. et Ydri, A. Mise en évidence par gravimétrie de roches ultrabasiques à l'aplomb du massif d'Alger. Bulletin du service Géologique de l'Algérie, 8, n°1, pp. 19-28, fig., 1997.
- LaFehr, T.R., et Nabighian, M., Fundamentals of Gravity Exploration, Geophysical Monograph Series, 17, W. Liu, E.K. Biegert and M. Ruderer (Eds), Society of Exploration Geophysics, 218p, 2012.
- Lagrula, J., Etude Gravimétrique de l'Algérie – Tunisie. Bulletin du Service Carte Géologique de L'Algérie, 4ème Série Géophysique n°2. 1951
- Longman, I., Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. Jour. of Geophys. Res., 64 (12), 1959.
- Longuevergne, L. Contribution à l'hydrogéodésie, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, UMR Sisyphe, Paris. 2008.
- Mathey, R., et Pierrot, M. Quelques Aspects de la Gravimétrie en Mer. Mesures, 34 (3), pp 66-71, 1969.
- Melchior, P., the Tides of the Planet Earth. 2nd Edition. Pergamon Press, 641 pages 1983.
- Niebauer, T. Gravimetric Method – Absolute Gravimeter: Instruments Concepts and Implementation. Geodesy Treatise on Geophysics, Edited By Tom Herring, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, ISBN: 978-0-444-53460-6, 2009
- Niebauer, T.M., G.S., Sasagawa, J.E., Faller, R. Hilt et F. Klopping, A new generation of Absolute Gravimeters, Metrologia, 32, 159-180, 1995.
- Prothero, JR.W.A. A Cryogenic Gravimeter, PhD Thesis. Univ. Calif., San Diego, 1967.
-

Rosier, L. C. Mesures gravimétriques au sol et satellitaires : étude du rapport entre variation de pesanteur et déplacement vertical et apport de la mission spatiale GRACE à l'étude des surcharges hydrologiques et des très grands séismes. Thèse de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2008.

Rundle, J. B. Gravity changes and the Palmdale uplift. *Geophys. Res. Lett.*, 5:41-44. 1978.

Schuler, T. Introduction to Gravimetry – Conducting and Processing Relative Gravity Surveys - A Brief Tutorial -. Institute of Geodesy and Navigation (IFEN) University FAF Munich, Germany, 2000.

Tanner, J. G., W. Torge, D. Nagy: Modern gravimetry and its role in geodesy. In: *Proc. Canad. Inst. Of Surveying, Centennial Convention 1*, 427-451, 1982

Tanner, J. and Lambert, A. Gravity and crustal movements: the CANADIAN experience. *Journal of Geodynamics*, 7, 329-338, 1987.

Torge, W. Gravimetry. Walter de Gruyter, New York-Berlin, 1959.

Valliant, H., Lucien, L., August. 1989. Gravity Meter Calibration at LaCoste Romberg. *Geophysics*, 56, 5 p, 705-711, DOI: 10.1190/1.1443089, 1989.

Van Ruymbeke, M. Transformation of Nine LaCoste Romberg Gravimeters in Feedback System. *Bull Inf. Marées Terrestres*, 104, 6202-6230, 1985.

Wahr J., Deformation induced by polar motion, *J. Geophys. Res.*, 90, 9363-9368, 1985.

Watermann, H.: *Über systematische Fehler bei Gravimetermessungen*. DGK, Reihe C, Nr.21, München 1957.

Wenzel, H.-G., 1996. The Nanogal software : Earth Tide data processing package ETERNA 3.30. *Bulletin d'Informations des Marées Terrestres* 124, 9425–9439.

Wu, P., Peltier, W. R., Viscous gravitational relaxation. *Geophys. J. R. Astro.*, 70 : 435-486. 1982.
