



Compensation combinée d'observations gravimétriques absolues et relatives

MCGravi

V 2.5.5

BEILIN Jacques

Version provisoire

8 Janvier 2008

Situation du document :

Documentation du programme MCGRAVI

Nombre de pages : 34

Système hôte : OpenOffice.org 2.0

MODIFICATIONS

| EDITION | REVISION | DATE | PAGES MODIFIEES |
|---------|----------|----------|-----------------|
| 1 | 0 | 10/10/05 | Création |
| | | | |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1. Généralités..... | 5 |
| 1.1. Contexte..... | 5 |
| 1.2. Modèle choisi pour l'estimation..... | 5 |
| 1.3. Principales fonctions du programme..... | 6 |
| 2. manuel opérateur..... | 9 |
| 2.1. Installation..... | 9 |
| 2.2. Entrées-Sorties..... | 9 |
| 2.2.1. Entrées du programme..... | 9 |
| 2.2.2. Sorties du programme..... | 11 |
| 2.3. Fichier de configuration..... | 11 |
| 2.4. Pondérations..... | 15 |
| 2.5. Formats des fichiers..... | 15 |
| 2.5.1. Fichier de configuration..... | 16 |
| 2.5.2. Fichier de calibration..... | 17 |
| 2.5.3. Fichier d'observations absolues..... | 18 |
| 2.5.4. Fichier d'observations du A10..... | 19 |
| 2.5.5. Ficher "o" d'observations relatives..... | 22 |
| 2.5.6. Ficher "c" d'observations relatives..... | 23 |
| 2.5.7. Ficher "s" de hauteurs d'instruments..... | 24 |
| 3. manuel programmeur..... | 25 |
| 3.1. Historique des différentes versions du programme..... | 25 |
| 3.2. Compilation..... | 26 |
| 3.2.1. Linux..... | 26 |
| 3.2.2. Windows..... | 26 |
| 3.2.2.1. Compilation sous Intel Fortran..... | 26 |
| 3.2.2.2. Compilation sous g95..... | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.3. Liste et description des modules..... | 27 |
| 3.4. Volume d'observations..... | 28 |
| 3.5. Structuration des données..... | 28 |
| 3.5.1. Principales variables globales | 28 |
| 3.5.2. Liste et description des matrices utilisées dans le calcul..... | 29 |
| 3.5.2.1. Tableaux des données en entrée..... | 30 |
| 3.5.2.2. Tableaux pointés par Tmc..... | 30 |
| 3.5.2.3. Matrices du calcul..... | 31 |
| 3.6. Principaux manques du logiciel..... | 32 |
| Bibliographie..... | 33 |

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Contexte

La première version de mcgravi a été développée au cours d'un stage au laboratoire de gravimétrie et de géodynamique de l'IPGP dans le but de compenser des observations de microgravimétrie. Le logiciel devait permettre des pondérations différentes par fichiers d'observations, l'utilisation de plusieurs calibrations différentes en fonction des appareils et l'estimation ou non d'une dérive temporelle et d'une dérive en température. Cette version permettait l'intégration de mesures absolues aux mesures relatives.

L'année suivante, pour mon stage de fin d'étude, le développement a été poursuivi pour adapter le logiciel à la compensation du réseau gravimétrique de l'IGN. Plusieurs fonctionnalités ont été ajoutées telles que la lecture des fichiers de sortie du gravimètre absolu A10 et l'estimation de la calibration des gravimètres.

En 2007, Jeremy Vienne (stagiaire INSA) a effectué un nombre important de tests méthodologiques menant à quelques modifications du source.

1.2. Modèle choisi pour l'estimation

Différences de pesanteur

$$C_f(m_j - m_i) + v = g_j - g_i + F_T(\Delta T_{ij}) + F_t(\Delta t_{ij})$$

Observations successives sur un même point

$$C_f(m_j - m_i) + v = F_T(\Delta T_{ij}) + F_t(\Delta t_{ij})$$

Observations de gravimétrie absolue

$$m_i + v = g_i$$

C_f : coefficient d'étalonnage du gravimètre

m : pesanteur mesurée

g : pesanteur estimée

C : terme constant

$F_T(\Delta T)$: polynôme de dérive en température

$F_t(\Delta t)$: polynôme de dérive en temps

$$\text{avec } F_T(\Delta T) = \sum_{k=1}^l a_k * \Delta T_{ij}^k \text{ et } F_t(\Delta t) = \sum_{n=1}^p b_n * \Delta t_{ij}^n$$

La modélisation prend en compte une dérive de température et une dérive de temps pour chaque profil. Ces deux dérives sont estimées sous forme de polynômes dont le degré est fixé par l'utilisateur.

1.3. Principales fonctions du programme

- i. Traiter des observations relatives (format brut Scintrex et CGxTool) et absolues (Intégration directe des observations absolues du A10 au format .project.txt)
Intégration des fichiers « c » de CG3TOOL [Gabalda et al, 2003]. Cette étape reste nécessaire pour valider les données en rentrant du terrain et éliminer les données vraiment mauvaises ; on utilise la mesure brute et la marée et non les mesures corrigées car la dérive y est enlevée.
- ii. Les observations de gravimétrie relative sont traitées sous forme de différences entre deux points observés successivement. A partir de la version 2.5.3, les observations successives sur un même points effectuées dans un certain laps de temps sont moyennées. Il a en effet été montré que l'introduction des 3 observations individuelles réalisées à quelques minutes d'intervalle perturbait l'estimation des dérives. Aucun effet notable n'avait cependant été décelé sur les pesanteurs estimées. Ce laps de temps est spécifié par le paramètre DELAI_MAX.
- iii. Gestion des profils. Pour chaque profil, on estime deux dérives sous forme de polynômes, l'une liée au temps et l'autre à la température. La dérive de température doit pouvoir être désactivée, ceci principalement à des fins de validation du modèle. Le degré du polynôme, en général 1 ou 2, sera fixé par l'utilisateur (ajout de deux paramètres). A chaque fichier de sortie de CGxTool (permettant dans ce processus de valider les observations et d'intégrer un modèle évolué de marée) on fera correspondre un profil. Un fichier listera les différents fichiers devant être appelés.
- iv. Intégrer la possibilité d'utiliser plusieurs gravimètres.
- v. Pondération fournie par l'utilisateur ; repondération par fichier ou pour tous les fichiers relatifs.

vi. Réalisation des simulations de calculs de réseaux. Ceci s'effectue en inventant un réseau (on définit alors les observations réalisées en leur affectant des poids). Cela revient à générer une matrice modèle. La simulation se base sur le fait que la variance de l'estimateur des moindres carrés est égal à $\text{var } \hat{X} = \sigma_0^2 (A^t P A)^{-1}$ et donc indépendant des observations. On suppose dans le cas des simulations que σ_0 est bien unitaire.

vii. Estimation du coefficient de calibration des gravimètres relatifs. La procédure habituelle consiste à observer une base d'étalonnage pour calculer la calibration par ratio entre la différence de pesanteur observée et la différence de pesanteur connue en absolu. On applique ensuite la calibration aux autres campagnes d'observations. Cette technique suppose une certaine stabilité de la calibration. En outre, elle est intimement liée à la manière de réaliser les réseaux gravimétriques. Le fait d'observer conjointement en absolu et en relatif donne cette information de calibration directement sans passer par une base d'étalonnage. La base d'étalonnage perd en partie son rôle de calibration des instruments relatifs au profit d'un rôle de contrôle périodique des gravimètres absolus.

Le modèle n'est alors plus linéaire sur les paramètres. Des valeurs approchées des paramètres estimés sont nécessaires. Afin de les obtenir, on fait tourner l'estimation en fixant la calibration des instruments à la valeur fournie en entrée. La linéarisation est ensuite effectuée autour de cette solution. Par la suite le calcul itère en ajoutant des inconnues pour les gravimètres pour lesquels l'utilisateur a choisi d'estimer la calibration. La convergence est testée sur la variation de l'estimateur du facteur de variance. Étant donné la faible variation de la calibration, la convergence est en général atteinte en une ou deux itérations.

Les éléments statistiques sont calculés pour les deux calculs, une première fois sur la solution sans estimation de la calibration et une deuxième fois sur la solution après convergence du calcul.

viii. Robustesse face au nombre d'observations (actuellement tests jusqu'à 4300 observations et 680 inconnues sur les observations de la composante gravimétrique du Réseau de Base Français). Le choix d'utiliser directement les observations brutes afin de compenser réellement à partir des observables et non d'observations déjà prétraitées a pour conséquences directe d'augmenter significativement le nombre d'équations. En effet, lors des observations, il est

d'usage de réaliser au moins trois observations cohérentes. Sachant que les profils sont systématiquement observés en aller-retour, le fait d'utiliser des observations brutes génère environ 6 fois plus d'équations que si on utilise des données déjà réduites. En outre, des inconnues de dérives s'ajoutent à l'estimation.

L'allocation dynamique a été systématisée. Les appels aux bibliothèques standards de calcul matriciel ont été supprimées car contenant des matrices allouées de manière statiques.

ix. Lors de chaque calcul, les fichiers résultats sont archivés dans un dossier afin de conserver un historique des différents calculs effectués.

x. Le nombre relativement important -quelques milliers- d'observations traitées rend pénible la navigation dans les fichiers résultats texte. Un compromis a été trouvé par la création de code HTML afin d'atteindre rapidement les principaux éléments statistiques. Il serait sans aucun doute plus propre de passer par le tandem xml-xslt.

xi. Afin de permettre l'analyse des résultats, des sorties graphiques sont générées sous forme de cartes GMT [Wessel et Smith, 1991]. Le programme génère des scripts GMT et les fichiers de données associés. Trois cartes sont générés :

- après la lecture et l'organisation des données, une carte des profils observés est générée afin de permettre l'analyse du réseau (discontinuités éventuelles, zones de faiblesses)
- une carte des écarts-types sur les pesanteurs estimées
- une carte des résidus normalisés sur les observations absolues ou relatives

Il est nécessaire de fournir des coordonnées pour tous les points observés. Il est évidemment indispensable que GMT soit installé correctement avec les chemins déclarés dans les variables d'environnement «path» de la machine.

Il demeure bénéfique d'ajouter au code d'autres sorties graphiques, en particulier en ce qui concerne les inconnues de dérives (variation dans les temps...). Ces modules n'ont pas pu être implémentés par manque de temps.

2. MANUEL OPÉRATEUR

Le programme MCgravi est conçu pour permettre la compensation d'observations gravimétriques absolues et relatives.

Il s'utilise en ligne de commande sous Windows ou Linux (commande mcgravi fichier_configuration) lancé dans le répertoire de travail contenant le fichier de configuration et les fichiers de données,

2.1. Installation

L'exécutable mcgravi doit être placé dans un répertoire déclaré dans la variable d'environnement PATH de la machine.

Le logiciel nécessite l'installation de GMT. Sous windows, les fichiers de GMT doivent être décompressés dans c:\GMT. Les répertoires bin et share créés par la décompression de netcdf sont aussi déplacés dans c:\GMT. On ajoute ensuite c:\GMT\bin dans la variable PATH de la machine. GMT est alors accessible de n'importe quel répertoire. On procède de même sous Linux.

Afin d'améliorer la portabilité du code, les scripts GMT sont écrits en perl qui doit donc être installé sur la machine.

Enfin, Le programme utilise le programme convert du package ImageMagick. Installer le package (le chemin PATH est mis à jour automatiquement). Sous Linux (type Debian ou Ubuntu), ImageMagick s'installe automatiquement via Synaptic.

2.2. Entrées-Sorties

2.2.1. Entrées du programme

Les mesures gravimétriques relatives sont intégrées à partir des fichiers de sortie de CGxTool. Il s'agit d'utiliser le fichier "c" contenant les observations réduites de la marée (au choix par un modèle de Longman ou MT80). La dérive calculée par CGxTool n'est pas utilisée puisqu'on cherche à l'estimer lors de la compensation.

Elle peut cependant en partie permettre de contrôler la validité de l'estimation de la dérive. Les champs utiles sont le numéro du point, le SD, la température, le jour dans l'année (doy), l'heure (en minutes décimales) et la valeur de la gravimétrie réduite de la marée et ramenée à 0 sur la première observation du fichier. Chaque fichier « c » doit être accompagné de son fichier « s » contenant les hauteurs d'instrument. Ce fichier est généré sous CGxTool et modifié sous éditeur. On commence par réduire les observations au niveau du repère avant de corriger la dérive. Ce choix est en partie arbitraire ; il est en effet délicat de savoir si on doit estimer la dérive avant de réduire ou l'inverse. Si on estime la dérive sur des données non réduites au repère, la dérive est calculée sur des écarts aller-retour, ce qui suppose que les deux observations ont été réalisées au même point. Dans le cas contraire, on calcule une dérive et on doit ensuite réduire la pesanteur au repère. Il y a alors ambiguïté sur la hauteur d'instrument à utiliser. Il paraît plus fiable d'estimer la dérive sur des observations réduites car l'erreur que l'on commet est plus faible. Dans le deuxième cas on a une erreur de l'ordre de la différence de hauteur entre les observations aller et retour multiplié par la valeur du gradient à l'air libre. Dans le premier cas, l'erreur sur la dérive est causée par une observation mal réduite. En tout état de cause, ce problème peut dans une certaine mesure être évité par un positionnement identique à l'aller et au retour. C'est facilement réalisable avec une précision inférieure au centimètre. Il est difficile d'espérer mieux du fait du réglage des vis calantes de l'appareil.

La lecture directe des fichiers "o" issus des gravimètres Scintrex CG3 a aussi été développée. En effet, pour des utilisations où le modèle de marée intégré au gravimètre suffit, lorsqu'on ne souhaite pas valider finement les observations ou enfin lorsqu'on ne dispose pas d'une station de travail Unix, il est envisageable d'effectuer une compensation sans passer par CGxTool. Il sera alors peut-être préférable d'effectuer d'abord une compensation par profil.

Les données doivent être coupées pour avoir un fichier par profil. C'est d'ailleurs ce qui est fait lors de la validation sous CGxTool.

Les différents fichiers-profil sont listés dans un fichier d'entrée. Ils doivent être présents dans le même répertoire de travail.

Le coefficient d'étalonnage du gravimètre est stocké dans un fichier de configuration contenant le numéro de série du gravimètre (pour information), le numéro d'ordre du gravimètre (identique à celui du fichier CG3TOOL.init – voir

documentation utilisateur du programme CGxTool) et la constante d'étalonnage à utiliser pour corriger les observations.

2.2.2. Sorties du programme

Les résultats et différents estimateurs générés lors du calcul sont écrits dans deux fichiers de synthèse des résultats (données en entrée, estimateurs, validation du calcul, résidus), l'un au format texte et l'autre en Html pour permettre une navigation plus rapide dans les gros fichiers. Un fichier contenant uniquement les pesanteurs estimées est également fourni.

Par ailleurs, différentes cartes sont fournies grâce au logiciel GMT (carte du réseau, carte des écarts-type, carte des résidus normalisés, carte des résidus ne passant pas le tau-test).

Tous les fichiers résultats sont copiés dans un dossier portant le nom du fichier de sortie ainsi que la date et l'heure du calcul. Les dessins GMT peuvent éventuellement être relancés depuis ce dossier après y avoir effectué d'éventuelles modifications.

2.3. Fichier de configuration

Le fichier de configuration contient les différents paramètres nécessaires ou utiles au calcul :

- MODE : [1;2;4] mode de calcul fixé à 1 pour un calcul libre et à 2 pour un calcul contraint par des observations de gravimétrie absolue. Dans le cas de la solution libre, on fixe la gravité d'un point à une valeur fictive (0.0 par exemple). Ceci a pour but de compenser le défaut de rang de la matrice normale. L'ajout d'une seule observation suffit à compenser ce défaut de rang. Dans le cas où on a demandé un calcul en mode 2 et que l'on n'a pas fourni suffisamment d'observations absolues, le programme bascule automatiquement en mode 1. Le mode 4 permet d'effectuer des simulations (voir plus bas). Le paramètre MODE est initialisé par défaut à 1.
- DRIFT_T : degré du polynôme estimant la dérive temporelle. En général, on estime une dérive linéaire ou quadratique. La date initiale servant de référence au calcul

de la dérive est la date du premier point observé dans le profil. Initialisé par défaut à 1.

- DRIFT_K : degré du polynôme estimant la dérive en température. En général, on estime une dérive linéaire ou quadratique. Initialisé par défaut à 0.

- DELAI_MAX : intervalle de temps en minutes pour le calculs des observations moyennées à partir des observations individuelles successives sur un même point. La valeur par défaut est fixée à 15 minutes. DELAI_MAX fixé à 0 désactive les moyennes.

- WRITE_LIST_FIC : [Y;N] Activation de l'écriture de la liste des fichiers de données

- WRITE_LIST_STATION : [Y;N] activation de l'écriture de la liste des points

- WRITE_OBS : [Y;N] paramètre permettant de désactiver l'impression des observations dans le fichier résultat. Initialisé à Y par défaut.

- WRITE_MAT : [Y;N] On fixe ce paramètre à 1 si on souhaite l'édition des matrices du calcul. Cette fonctionnalité a surtout été mise en place à des fins de débogage. Initialisé à N par défaut.

- WRITE_RESID : [Y;N] Activation de l'écriture des résidus sur les observations

- WRITE_TAU : [Y;N] le fait de placer cette option à Y avec WRITE_RESID à Y permet de n'afficher que les résidus qui ne passent pas le tau-test. Si WRITE_RESID est à N, l'option WRITE_TAU n'a aucune influence

- WRITE_GRAV : [Y;N] Activation de l'écriture des pesanteurs estimées

- WRITE_DRIFT : [Y;N] Activation de l'écriture des dérives

- SIGMA_FACTOR x.x : facteur appliqué aux écarts-types a priori issus du gravimètre (champs SD des fichiers Scintrex). Ce facteur est rendu utile par la tendance "optimiste" des écarts-types donnés par le gravimètre. Ces valeurs représentent en effet plus le bruit microsismique qu'une réelle précision des observations. Ce facteur n'est pas appliqué aux observations absolues. Initialisé par défaut à 1.0.

- SIGMA_ADD x.xxx (mgal) : écart-type ajouté quadratiquement (en variance) aux "SD" issus des fichiers bruts. On suppose dans ce cas que les "SD" correspondent

au bruit microsismique sans tenir compte d'autres erreurs aléatoires sur les observations.

- CALF : On donne un fichier texte contenant les coefficients de calibration des gravimètres s'ils ont été étalonnés. Ce paramètre est optionnel. En l'absence de ce paramètre, les mesures sont supposées avoir été réalisées avec le même appareil (coefficient 1.0). Le format de ce fichier est numéro de série, numéro dans CG3TOOL.init, Coefficient d'étalonnage, activation de l'estimation de l'étalonnage [Y/N]. Le programme teste les coefficients d'étalonnage qu'il est en mesure de déterminer et désactive éventuellement les instruments concernés.

- RELF frs16c04.183 1.000 0.000 : fichier d'observations relatives. Le programme accepte les fichiers bruts du Scintrex (fichiers "o") ainsi que les fichiers au format "c" de CGxTool.

- CREATE_R : [Y;N] permet lors d'un calcul libre de générer des fichiers « r » au format CGxTool pouvant être réutilisés dans un calcul contraint utilisant des points absolus. Cette opération permet de décorréler la calibration estimée des dérives.

Premier passage : calcul libre, 1 point absolu, estimation des dérives, pas d'estimation des calibrations, CREATE_R à Y. Il est recommandé d'introduire une calibration estimée par ailleurs sur une base d'étalonnage si on utilise plusieurs gravimètres relatifs afin d'éviter d'introduire des distorsions dans le réseau. Les dérives estimées pourraient alors être dégradées.

Deuxième passage : calcul contraint, pas d'estimation des dérives, estimation de la calibration, introduction de tous les points absolus.

Il est important de conserver le format de nom de fichier issu de ce logiciel. Le nom du fichier est utilisé pour connaître le type de fichier et le numéro du gravimètre dans le fichier de calibration (6 dans l'exemple ci-dessus) . Il est possible d'indiquer des chemins relatifs (sous la forme ../gravi.cal) ou absolus. Les espaces dans les noms de répertoires ne sont pas tolérés (le fichier sera ignoré).

A la suite du nom de fichier, on note un facteur sur les écarts-type et un terme additif. Le même système est appliqué aux fichiers de gravimétrie absolue et A10.

Le format de nom de fichier est le suivant [doc CGxTool] :

mssnty.jjj

m : mode d'acquisition (**f**ield, **c**ycle),

sss : descripteur du site, le troisième caractère sert à donner le numéro du cheminement,

n : numéro du gravimètre dans le fichier CG3TOOL.init, ou dans le fichier de calibration dans le cas de MCGravi,

t : type de fichier (**o**bservé, **c**alculé, **s**ite, **r**ésultat),

yy : millésime,

jjj : jour Julien dans l'année.

Pour plus de détails sur les formats de ces fichiers, se reporter au manuel utilisateur du programme CGxTool (partie 4, description des fichiers entrée/sortie).

- ABSF tunnel.abs 1.000 0.000 : fichier d'observations absolues. le format d'entrée générique pour les observations absolues à été fixé de la manière suivante : nom, gravité (mGal), écart-type de l'observation (mGal). Même dans le cas d'un calcul en solution libre, il est obligatoire de créer un fichier de ce type avec la gravité sur un point du réseau observé, éventuellement 0.00.

- A10F 56-20050511-001.project.txt 1.000 0.000. Fichier "project" généré par le logiciel "g". Le logiciel va y chercher les bonnes lignes en espérant que le format de sortie ne sera pas trop modifié au cours des mises à jour de "g" par Microg-Lacoste.

- OUTF Rustrel : fichier de sortie sans extension. Le programme génère trois fichiers : un fichier ".lst" contenant l'ensemble des résultats et pour chaque calcul (libre ou contraint) un fichier contenant les pesanteurs estimées. Les extensions sont ajoutées par le programme.

- FCOR coord2001.txt : fichier de coordonnées des points stationnés pour les cartes GMT (format nom, longitude, latitude)

- REGION lon_W lat_S lon_E lat_N : limites de la région cartographiée par GMT. Si le paramètre REGION n'est pas défini, le logiciel calcule l'emprise de la zone de travail.

2.4. Pondérations

Les poids affectés aux observations sont a priori les "SD" issus du calcul sous CGxTool. Il faut noter le fait que CGxTool donne des écarts-types calculés à partir des SD donnés par le gravimètre. Ces valeurs correspondent à l'écart-type calculé sur les 100 mesures que dure une station en général. On trouve ces valeurs dans le fichier "o", c'est-à-dire le fichier contenant les observations brutes issues du Scintrex.

L'écart-type sur la moyenne de ces 100 observations (à quelques observations près car on en rejette souvent quelques unes) est donné par la division de l'écart-type de l'échantillon par la racine carrée du nombre de mesures. Dans le fichier "c", cette valeur est arrondie au μGal . Sachant que ces écarts-types sont sous-estimés, on les renormalise. L'écart entre les écarts-types arrondis ou non peut alors atteindre quelques μGal et surtout modifier les pondérations relatives entre les observations. Il a donc été choisi par souci d'homogénéité d'appliquer les même arrondis sur les écarts-types issus des fichiers "o" que ceux issus des fichiers "c".

En entrée chaque fichier, relatif ou absolu, est accompagné d'un facteur sur sigma et d'un terme additif en variance. On retrouve ces deux termes pour les fichiers relatifs pris globalement.

On commence par multiplier le sigma de chaque observation ($SD/10$) du fichier « c » par tous les coefficients. On ajoute ensuite quadratiquement les termes additifs. Dans la pratique, les facteurs multiplicatifs sont peu utilisés au profit des termes additifs.

En sortie, les écarts types sont multipliés par le facteur unitaire de variance.

2.5. Formats des fichiers

- les fichiers d'entrée sont tous au format texte,
- le format est libre,
- le séparateur de champs est l'espace ou la tabulation,
- il peut y avoir plusieurs séparateurs entre deux champs,
- le séparateur décimal est le point,
- les caractères "*" ou "#" placés en début de ligne permettent de la rendre

inactive,

- tous les champs sont obligatoires, même ceux non utilisés par le programme (le programme contrôle la validité des informations en partie grâce au nombre de champs.

2.5.1. Fichier de configuration

*Fichier de paramètres de calcul

DRIFT_T 1

DRIFT_K 0

WRITE_OBS Y

WRITE_MAT N

WRITE_RESID Y

WRITE_TAU N

OUTF Calib193

SIGMA_FACTOR 1.0000

SIGMA_ADD 0.005

MODE 2

TYPE_HISTO 0

CONV 0.00000001

CALF gravi.cal

* Infos pour GMT

FCOR coord2005.txt

REGION 2.8 45.7 3.2 45.9

A10F 56-20050511-001_grad3040.project.txt 1.0 0.0

*A10F 64-20050512-001_grad2799.project.txt 1.0 0.0

A10F 65-20050512-001_grad3499.project.txt 1.0 0.0

A10F 66-20050511-001_grad2941.project.txt 1.0 0.0

A10F 67-20050511-001_grad3596.project.txt 1.0 0.0

RELF fcl1f2c05.250 1.0 0.000

2.5.2. Fichier de calibration

* Coefficients d'étalonnage des gravimètres

| | | | |
|-----|---|----------|---|
| 408 | 6 | 1.000097 | Y |
| 424 | 5 | 1.000539 | Y |
| 265 | 7 | 1.001136 | N |
| 323 | 4 | 0.999891 | Y |

2.5.3. Fichier d'observations absolues

* Fichier de gravités absolues

200 980.0000 0.0001

2.5.4. Fichier d'observations du A10

Micro-g Solutions g Processing Report

File Created: 06/28/05, 15:05:39

Project Name: 0108-20050411-001-bureau

g Acquisition Version: 4.0416

g Processing Version: 4.0416

Company/Institution: IGN/SGN

Operator: GMT-TOM

Station Data

Name: 108

Site Code: 0134402-b

Lat: 46.20710 Long: 5.18660 Elev: 235.09 m

Reference Height: 0.00 cm

Datum Height: 1.20 cm

Gradient: -3.086 uGal/cm

Nominal Air Pressure: 985.33 mBar

Barometric Admittance Factor: 0.30

Polar Motion Coord: -0.0425 " 0.2551 "

Earth Tide (ETGTAB) Selected

Potential Filename: e:\Program Files\Micro-g Solutions Inc\gWavefiles\ETCPOT.dat

Delta Factor Filename: E:\gData\ign\0108\OceanLoad-0108-bureau1.dff

Delta Factors

| Start | Stop | Amplitude | Phase Term |
|----------|----------|-----------|-------------|
| 0.000000 | 0.002427 | 1.000000 | 0.0000 DC |
| 0.002428 | 0.249951 | 1.160000 | 0.0000 Long |
| 0.721500 | 0.906315 | 1.154250 | 0.0000 Q1 |
| 0.921941 | 0.974188 | 1.154240 | 0.0000 O1 |
| 0.989049 | 0.998028 | 1.149150 | 0.0000 P1 |
| 0.999853 | 1.216397 | 1.134890 | 0.0000 K1 |
| 1.719381 | 1.906462 | 1.161720 | 0.0000 N2 |
| 1.923766 | 1.976926 | 1.161720 | 0.0000 M2 |
| 1.991787 | 2.002885 | 1.161720 | 0.0000 S2 |
| 2.003032 | 2.182843 | 1.161720 | 0.0000 K2 |
| 2.753244 | 3.081254 | 1.07338 | 0.0000 M3 |
| 3.791964 | 3.937897 | 1.03900 | 0.0000 M4 |

Ocean Load ON, Filename: E:\gData\ign\0108\OceanLoad-0108-bureau1.olf

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Waves: | M2 | S2 | K1 | O1 | N2 | P1 | K2 | Q1 | Mf | Mm | Ssa |
| Amplitude (uGal): | 2.208 | 0.735 | 0.209 | 0.166 | 0.450 | 0.070 | 0.192 | 0.048 | 0.103 | 0.019 | 0.029 |
| Phase (deg): | -68.8 | -39.9 | -74.0 | 174.2 | -86.3 | -85.3 | -39.1 | 115.0 | -13.8 | -77.3 | -119.6 |

Instrument Data

Meter Type: A10

Meter S/N: 014

Factory Height: 72.00 cm

Rubidium Frequency: 10000000.00000 Hz
Offset: 0.000 uGal
Laser: L-Series (ml1-a10-014)
Red Lock: 632.99091810 nm
Blue Lock: 632.99192180 nm

Processing Results

Date: 04/11/05
Time: 12:00:01
DOY: 101
Year: 2005
Gravity: 980634903.99 uGal
Set Scatter: 3.09 uGal
Measurement Precision: 0.98 uGal
Total Uncertainty: 10.76 uGal
Number of Sets Collected: 10
Number of Sets Processed: 10
Set #s Processed: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Number of Sets NOT Processed: 0
Set #s NOT Processed:
Number of Drops/Set: 100
Total Drops Accepted: 1000
Total Drops Rejected: 0
Total Fringes Acquired: 400
Fringe Start: 11
Processed Fringes: 342
GuideCard Multiplex: 4
GuideCard Scale Factor: 50

Gravity Corrections

Earth Tide (ETGTAB): 97.40 uGal
Ocean Load: 2.38 uGal
Polar Motion: 1.25 uGal
Barometric Pressure: 1.82 uGal
Datum Height: 218.49 uGal
Reference Xo: -0.01 uGal

Uncertainties

Earth Tide Factor: 0.001
Average Earth Tide Uncertainty: 0.10 uGal
Ocean Load Factor: 0.10
Average Ocean Load Uncertainty: 0.24 uGal
Barometric: 1.00 uGal
Polar Motion: 0.05 uGal
Laser: 0.05 uGal
Clock: 0.50 uGal
System Type: 10.00 uGal
Tidal Swell: 0.00 uGal
Water Table: 0.00 uGal
Unmodeled: 0.00 uGal

System Setup: 3.00 uGal
Gradient: 2.12 uGal (0.03 uGal/cm)

Comments

2.5.5. Ficher "o" d'observations relatives

```

-----
SCINTREX V7.2          AUTOGRAV / Field Mode          R7.21 REMOTE/Hires

                               Ser No:          193.

Line:      1.  Grid:      1.   Job:      1.  Date: 04/06/15  Operator:      1.

GREF.:          -6000. mGals          Tilt x sensit.:          ?5.47
GCAL.1:          6015.752          Tilt y sensit.:          ?0.81
GCAL.2:          0.0          Deg.Lat.:          43.94
TEMPCO.:          -0.1253mGal/mK          Deg.Long.:          -5.484
Drift const.:          0.          GMT Difference:          0.hr
Drift Correction Start Time: 07:09:35          Cal.after x samples:          12
                               Date: 04/06/08          On-Line Tilt Corrected = "*"
-----

```

| Station | Grav. | SD. | Tilt x | Tilt y | Temp. | E.T.C. | Dur | # | Rej | Time |
|---------|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|-----|---|----------|------|
| 200. | 467.5706* | 0.017 | -2.4 | -2.0 | -1.80 | 0.050 | 100 | 0 | 07:20:51 | |
| 200. | 467.5698* | 0.018 | -2.5 | -2.1 | -1.79 | 0.053 | 100 | 0 | 07:24:31 | |
| 200. | 467.5726* | 0.019 | -2.7 | -1.9 | -1.78 | 0.055 | 100 | 0 | 07:27:54 | |
| # 200. | 467.7086* | 0.021 | 0.1 | 1.4 | -1.55 | 0.079 | 100 | 0 | 12:39:03 | |
| # 200. | 467.7039* | 0.017 | -0.7 | 1.6 | -1.56 | 0.077 | 100 | 0 | 12:42:14 | |
| 200. | 467.6936* | 0.016 | -0.8 | 1.7 | -1.61 | 0.074 | 100 | 0 | 12:46:12 | |
| # 700. | 449.6080* | 0.022 | -0.3 | 0.4 | -1.56 | 0.070 | 100 | 0 | 07:50:30 | |
| 700. | 449.5947* | 0.025 | -0.2 | 0.9 | -1.60 | 0.072 | 100 | 0 | 07:53:20 | |
| 700. | 449.5937* | 0.031 | -2.3 | 1.2 | -1.67 | 0.073 | 100 | 0 | 07:56:32 | |
| # 700. | 449.7043* | 0.055 | -0.2 | -0.6 | -1.67 | 0.093 | 100 | 0 | 12:13:26 | |
| # 700. | 449.6983* | 0.044 | 0.6 | 1.1 | -1.69 | 0.092 | 100 | 0 | 12:16:39 | |
| 700. | 449.6945* | 0.030 | 0.2 | -0.6 | -1.72 | 0.090 | 100 | 0 | 12:19:22 | |
| 700. | 449.6953* | 0.044 | 0.5 | -0.6 | -1.73 | 0.089 | 100 | 0 | 12:22:10 | |
| # 900. | 442.3245* | 0.029 | -3.9 | -0.9 | -1.73 | 0.082 | 100 | 0 | 08:10:43 | |
| 900. | 442.3192* | 0.022 | 1.4 | -1.0 | -1.72 | 0.084 | 100 | 0 | 08:14:08 | |

2.5.6. Ficher "c" d'observations relatives

```
# INFO      : CGxTool V3.3 (AUGUST 2001) - FIELD COMPUTED FILE
# CREATOR   : gattac
# DATE      : Fri Jan 28 15:20:36 2005
# GRAVIMETER : CG3 #9408265 (7 in CG3TOOL.init)
# DATA     : Observed = 26 / Used = 15
# CORRECTION : Earth Tide = Longman / Height = Yes (0.3086 mGal/m) / Pressure = No
# FORMAT     : STATION/VALUE(mGal)/ERR(mGal)/DUR(s)/#REJ/X(Arcs)/Y(Arcs)/TEMP(mK)
# FORMAT     : ETC(mGal)/JULDAY/TIME(mn)/DDMMYY/HHMMSS/UT-Local(h)/SC(mGal)/GRAV(mGal)
2308 4921.221 0.003 100 0 -2.0 -1.0 -0.19 -0.056 300 545.8000 261004 090548 -2 0.000 0.0000
2308 4921.214 0.003 100 0 -2.0 -1.0 -0.21 -0.055 300 549.0500 261004 090903 -2 0.000 -0.0070
2308 4921.213 0.003 100 0 -2.0 -1.0 -0.24 -0.054 300 551.4833 261004 091129 -2 0.000 -0.0084
2308 4921.211 0.003 100 0 -2.0 -1.0 -0.27 -0.053 300 553.6333 261004 091338 -2 0.000 -0.0106
20444 5031.178 0.004 100 1 -1.0 -2.0 -0.29 -0.020 300 633.7500 261004 103345 -2 -0.350 109.6012
20444 5031.182 0.004 100 0 -1.0 -1.0 -0.30 -0.019 300 636.2833 261004 103617 -2 -0.350 109.6051
20444 5031.174 0.004 100 0 -1.0 0.0 -0.35 -0.016 300 643.8333 261004 104350 -2 -0.350 109.5961
301 4958.996 0.002 100 0 -1.0 -2.0 -0.35 0.004 300 712.2667 261004 115216 -2 -0.001 37.7533
301 4958.991 0.003 100 0 0.0 -1.0 -0.35 0.004 300 714.8000 261004 115448 -2 -0.001 37.7474
301 4958.990 0.002 100 0 -0.0 -1.0 -0.38 0.005 300 717.8667 261004 115752 -2 -0.001 37.7454
301 4958.988 0.002 100 0 -1.0 -1.0 -0.40 0.005 300 719.9500 261004 115957 -2 -0.001 37.7427
2308 4921.291 0.003 100 0 -2.0 -1.0 -0.36 0.002 300 813.9333 261004 133356 -2 0.000 -0.0018
2308 4921.291 0.002 100 0 -2.0 -2.0 -0.37 0.002 300 816.1333 261004 133608 -2 0.000 -0.0035
2308 4921.285 0.002 100 0 -1.0 -2.0 -0.38 0.001 300 818.4000 261004 133824 -2 0.000 -0.0110
2308 4921.286 0.002 100 0 -1.0 -2.0 -0.41 0.001 300 821.6333 261004 134138 -2 0.000 -0.0122
```

2.5.7. Ficher "s" de hauteurs d'instruments

```
2308 09:05 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 09:09 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 09:11 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 09:13 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
20444 10:30 -0.864 9999.000 9999.000 9999.000
20444 10:33 -0.864 9999.000 9999.000 9999.000
20444 10:36 -0.864 9999.000 9999.000 9999.000
20444 10:41 -0.864 9999.000 9999.000 9999.000
20444 10:43 -0.864 9999.000 9999.000 9999.000
301 11:50 0.266 9999.000 9999.000 9999.000
301 11:52 0.266 9999.000 9999.000 9999.000
301 11:54 0.266 9999.000 9999.000 9999.000
301 11:57 0.266 9999.000 9999.000 9999.000
301 11:59 0.266 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:29 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:31 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:33 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:36 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:38 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
2308 13:41 0.269 9999.000 9999.000 9999.000
```


3. MANUEL PROGRAMMEUR

3.1. Historique des différentes versions du programme

Au départ développé sous forme d'une évolution du programme Gravnet afin de l'adapter au modèle choisi, le code a très vite évolué vers un code complètement indépendant. En fait, n'ont été conservées que les procédures d'inversion du système des moindres carrés (solution...). Le reste a été réécrit pour s'adapter aux données et au modèle choisi.

Les versions du programme sont numérotées sur trois chiffres.

1.0.x : code entièrement contenu dans un unique fichier. La structure du programme est alors proche de celle du programme Gravnet. Une grande partie des variables du calcul de Gravnet étaient alors encore présentes.

1.1.x : introduction du double calcul (libre et contraint) dans le cas où l'on fournit des observations absolues. Ces versions comportent encore un code très linéaire assez lourd.

1.2.x : refonte presque complète du stockage des données avec implémentation de types structures contenant des tableaux dynamiques. Le programme est en outre découpé en de nombreux modules spécifiques.

1.3.x : introduction de la possibilité de réaliser des simulations en vues de préparer des campagnes d'observations.

1.4.x : intégration des données du A10

2.0.x : estimation de l'étalonnage des instruments relatifs et normalisation par enrichissement rendu nécessaire par la taille des matrices à inverser.

2.1.x : ajout de sortie de cartes générées avec GMT et HTML avec les versions 2.2.x

2.3.x : portage vers g95.

2.4.x : Écriture du Tau-test modifiée. On peut désormais choisir de n'afficher que les résidus qui ne passent pas le tau-test.

2.5.x : versions réalisées lors du stage de Jeremy Vienne (INSA Strasbourg). Son étude portait sur l'analyse des différents modes de calculs possibles avec Mcgravi et la définition d'une méthodologie. Suite à ses test, un certain nombre de modifications ont été effectuées.

3.2. Compilation

Le code a dans un premier temps été développé sous Intel Fortran. La dépendance de ce compilateur à la présence de Microsoft Visual Studio installé sur la machine est une entrave importante à la portabilité du code. Ce dernier a donc été porté sous g95 (<http://g95.sourceforge.net>). Cela a entraîné d'importantes modifications de syntaxe du fait des différences entre le Fortan Intel et le standard Fortran.

3.2.1. Linux

Quelquesoit le compilateur installé (g95 ou Intel Fortran) copier le makefile dans le dossier contenant les sources et executer la commande « make all » dans ce dossier.

3.2.2. Windows

3.2.2.1. Compilation sous Intel Fortran

Lancer Visual Studio et ouvrir le projet Mc_gravi.vfproj. Aucun paramétrage spécifique n'est nécessaire.

3.2.2.2. Compilation sous g95

La compilation sous g95 utilise un makefile. Lancer d'abord « make all » pour compiler les différentes unités et lier. Les fichiers obj peuvent être supprimés avec « make clean ».

3.3. Liste et description des modules

- Mc_gravi.f90 : programme principal ; appelle MCGRAVI
- Mcgravi.f90 : module appelant tous les autres modules d'entrée/sortie et de calcul. Il prend en entrée le nom du fichier de paramètres. ,
- Lect_param.f90 : module de lecture des paramètres dans le fichier de configuration.
- Param.f90 : module de définition et stockage des paramètres de calcul. Ils sont stockés dans une variable de type structure (Tparam),
- raw_data.f90 : module de définition et stockage des variables concernant les données en entrée (fichiers de calages, d'observations absolues, d'observations relatives),
- lect_rawdata.f90 : module chargé de la lecture des fichiers d'entrée et de l'affectation des variables du module raw_data,
- MC_data.f90 : définition et stockage des variables nécessaires aux moindres carrés. Il comprend en particulier un type Tmc contenant des pointeurs sur les différents tableaux dynamiques qui représentent les matrices des moindres carrés,
- rempli_matMC.f90 : module qui génère les matrices des moindres carrés à partir des variables de raw_data,
- util_str.f90 : module contenant diverses procédures de lecture des fichiers d'entrée. Les lectures dans les fichiers textes ont été de fait un peu alourdies par rapport aux procédures standards du fortran, ceci afin de fournir une plus grande robustesse (lignes incomplètes, lignes vides...),
- MC_inversion.f90 : module contenant les procédures d'inversion du système par la méthode de Cholesky,
- MC_statistic.f90 : module de calcul des estimateurs statistiques (test d'adaptation, histogramme),
- write_matr.f90 : module d'export des matrices à des fins de débogage,

- `ecriture.f90` : module qui regroupe les différentes procédures de création du fichier résultat,
- `write_HTML.f90` : module correspondant à `Écriture.f90` pour la version HTML du listing. Il serait sans doute plus propre de générer du pdf mais cela n'a pas encore été fait par manque de temps.
- `Str_const.f90` : définition des textes affichés lors de l'exécution du programme.
- `Port_routines.f90/Port_routines_g95.f90` : certaines routines, en particulier les routines d'appels à des programmes externes et de gestion du temps sont spécifiques au compilateur utilisé. Ces deux modules encapsulent les codes spécifiques au compilateur. Si le compilateur est Intel Fortran, utiliser `Port_routines.f90` ; sous g95, utiliser `Port_routines_g95.f90`.

3.4. Volume d'observations

Le logiciel a été pour le moment testé avec 4300 observations pour 680 inconnues.

L'usage systématique de l'allocation dynamique laisse présager que le programme puisse fonctionner avec des chantiers plus importants. La partie la plus gourmande en calcul reste le calcul des estimateurs statistiques.

3.5. Structuration des données

3.5.1. Principales variables globales

Le type `TParam` correspond aux différents paramètres du calcul.

```

type TParam
  character (len=1) lg
  integer mode
  integer drift_t
  integer drift_k
  integer ngravi_Cal
  real*8 gradstd
  real*8 siglevel
  real*8 critere_convergence
  real*8 sigma_factor ! facteur appliqué sur tous les sigma a priori
  real*8 sigma_add ! facteur additif sur la variance
  logical Type_resid ! vrai si residu standard et faux si résidus
                    normalisés

```

```

character (len=255) nomficcal
character (len=255) nomficout
character (len=255) dossier
integer len_dossier
integer, pointer, dimension(:) :: ptab

integer ntabnomficrel
integer ntabnomficabs
integer ntabnomficA10

type (TDataFic), pointer , dimension(:) :: TabDataFic
integer NDataFic

type (TCoordFic), pointer , dimension(:) :: TabCoordFic
integer NCoordFic

logical lfix
logical calf

! Gestion des éléments à afficher dans le fichier HTML
logical write_list_fic
logical write_list_station
logical print_obs
logical writemat
logical write_resid
logical write_only_failed_tau_test
logical write_gravity
logical write_drift

integer Nb_obsAbs
integer Nb_obsRel
integer Nb_Sta
integer Nb_inc

real*8 lon1
real*8 lon2
real*8 lat1
real*8 lat2

end type TParam

```

3.5.2. Liste et description des matrices utilisées dans le calcul

Le programme ayant un déroulement linéaire (lecture des données -> écriture du système -> inversion -> calcul des éléments statistiques), la structuration des données suit ce processus.

Lors de la lecture des données en entrée, les données sont stockées selon leur type :

- informations de calibration des gravimètres,

- observations absolues,
- observations relatives.

Les définitions de ces structures sont placées dans le module Raw_data.f90. Sauf cas particulier, les données sont gérées sous forme de tableaux de structures.

Lors de la phase de pose du système et d'inversion, le programme utilise un objet Tmc. Cette structure contient les différents paramètres du calcul (issus de la variable Param) ainsi que des pointeurs sur des tableaux dynamiques représentant les différentes matrices utiles au calcul par moindres carrés. Les différents tableaux sont alloués au cas par cas lorsqu'on en a besoin.

Certaines de ces variables sont issues de Gravnet. Il s'agit en particulier des matrices utilisées lors de l'inversion du système.

3.5.2.1. Tableaux des données en entrée

Tobs : structure de stockage d'une observation relative individuelle

TobsRel : structure de stockage d'une observation relative (différence de gravité)

TabObs : tableau de Tobs

TabObsRel : tableau de TobsRel. Ces tableaux sont alloués dynamiquement par blocs de "datablock" enregistrements.

fixstn(Nb_obsAbs) : vecteur des points de gravimétrie absolue

fixgra (Nb_obsAbs) : gravité observée sur les points de gravimétrie absolue

stdx (Nb_obsAbs) : SD sur les points de gravimétrie absolue

sta (nsth) : Tableau temporaire pour la recherche des points stationnés.

3.5.2.2. Tableaux pointés par Tmc

A (Nb_obsRel,Nb_inc) : matrice modèle

B (Nb_obsRel+Nb_obsAbs) : vecteur des observations

P (Nb_obsRel+Nb_obsAbs) : vecteur des poids. En fait correspond au termes diagonaux de la matrice de poids classique utilisée dans les moindres carrés.

stp (Nb_obsRel), enp (Nb_obsRel) : numéro des points pour chaque observation ("coup arrière" et "coup avant")

pos (Nb_obsAbs) : Position des points de fixstn dans le vecteur stat

AtPA (Nb_inc,Nb_inc) : Porte bien son nom. Cette Matrice est remplie par enrichissement.

AtPB (Nb_inc) : Porte bien son nom. Cette Matrice est remplie par enrichissement.

sig (Nb_inc) : variance a posteriori sur les paramètres.

V (Nb_obsRel+Nb_obsAbs) : vecteur des résidus

X (Nb_inc) : paramètres estimés

X0(Nb_inc) : valeurs approchées des paramètres

stat (Nb_sta) : vecteur des numéros de points observés

Sol_sans_calib (Nb_inc) : Solution sans estimation de l'étalonnage.

3.5.2.3. Matrices du calcul

nn (Nb_inc*(Nb_inc+1)/2) : Correspond à la matrice AtPA écrite sous forme d'un vecteur colonne $nn^t = \begin{bmatrix} atpa_{1,1} & atpa_{2,1} & atpa_{2,2} & atpa_{3,1} & atpa_{3,2} & atpa_{3,3} & atpa_{4,1} & \dots \end{bmatrix}$

uvec (Nb_inc) : En entrée du calcul, uvec reçoit AtPB. En sortie de la résolution, uvec représente le vecteur solution

Sx (Nb_inc,Nb_inc) : correspond à $(A^tPA)^{-1}$

C (Nb_inc*(Nb_inc+1)/2) : Stockage sous forme de vecteur colonne de la matrice Sx

mtmp (Nb_obsRel,Nb_inc) : produit ASx

sigtmp (Nb_obsRel,Nb_obsRel) : produit $ASx A^t$ soit $A(A^tPA)^{-1}A^t$

sigmv (Nb_obsRel+Nb_obsAbs) : Matrice de variance-covariance sur les résidus

Pour $1 \leq k \leq NbobsRel$, $sigmv_k = 1/p_k - sigtmp_{k,k}$

Pour $NbobsRel < k \leq NbobsRel + NbobsAbs$, $sigmv_{k+NbobsRel} = stdx_k^2 - Sx_{pos_k, pos_k}$

Il reste sans aucun doute un certain nombre d'optimisation possibles en terme de stockage des matrices de calcul.

3.6. Principaux manques du logiciel

Un certains nombre de développement sont à prévoir :

- l'inversion de la matrice de variance-covariance sur les observations pose problème actuellement sur les gros systèmes.
- La création du fichier html est un choix transitoire. Il serait sans doute préférable de générer un pdf, pourquoi pas via Latex.

BIBLIOGRAPHIE

COULOT, David, *Initiation théorique et pratique à la méthode d'estimation par moindres carrés*, ENSG, 2002, 114p.

CHARLES, Kate, *High precision and absolute gravity in Britain*, Phd thesis, Department of Geology and Geophysics, p. 109-130

GABALDA G. et al, *CG3TOOL : an interactive computer program to process Scintrex CG3/3M gravity data for high resolution applications*, in Computer and Geosciences. Elsevier, Mars 2003, pp 155-171

GABALDA G. et al., *CG3TOOL programme interactif de traitement de données gravimétriques Scintrex CG-3/3M*. Bondy, 2000, 109 p.

HWANG C. et al., *Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum free constraints*, in Computers & Geosciences n°28, 2002, p. 1005-1015.

REILLY W.I., *Adjustement of gravity meter observations*, in N.Z. Journal of Geology and Geophysics, Vol 13, 1969, p. 697-702.

GATTACCECA Thierry, *Manuel utilisateur du gravimètre Scintrex CG-3M et du logiciel CG3TOOL*, notice SGN/ITG 222/version 3, Département des réseaux géodésiques, Institut Géographique National, 2004, 80p.

CG-3/3M Gravity meter, user's guide. Concord, Ontario, Canada Scintrex, 1998, 160 p.

BEILIN Jacques, *Optimisation de levés microgravimétriques au Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (Rustrel-84) Développement d'un outil de compensation dédié à la gravimétrie*, ENSG , 2004, 162 p.

BEILIN Jacques, *Apport de la gravimétrie absolue à la réalisation de la composante gravimétrique du Réseau Géodésique Français, mémoire de projet de fin d'étude*, ENSG , 2005, 155 p.

VIENNE Jérémy, *Compensation d'un réseau de gravimétrie mesuré par le Service de Géodésie et de Nivellement de l'Institut Géographique National*, mémoire de projet de fin d'étude, INSA Strasbourg , 2007, 67 p.