

Mesures et traitement de gravimétrie terrestre

Sylvain Bonvalot

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Bureau Gravimétrique International (BGI)
UMR5563 – Observatoire Midi Pyrénées, 14 av. E. Belin, 31400 Toulouse

sylvain.bonvalot@ird.fr

Plan de l'exposé

❑ La mesure du champ de pesanteur

- Rappel : Variations de pesanteur à la surface du globe et ordres de grandeur
- Techniques et moyens de mesures
- Les mesures relatives
- Les mesures absolues
- Apport d'autres mesures : GPS, MNT

❑ Acquisition et traitement des mesures gravimétriques

- Mesures relatives → Gravimètre relatif Scintrex (CG3/CG5)
- Mesures absolues → Gravimètre absolu Micro-g LaCoste (FG5/A10)

❑ Calcul d'anomalie gravimétriques en géophysique

❑ Données et modèles gravimétriques globaux

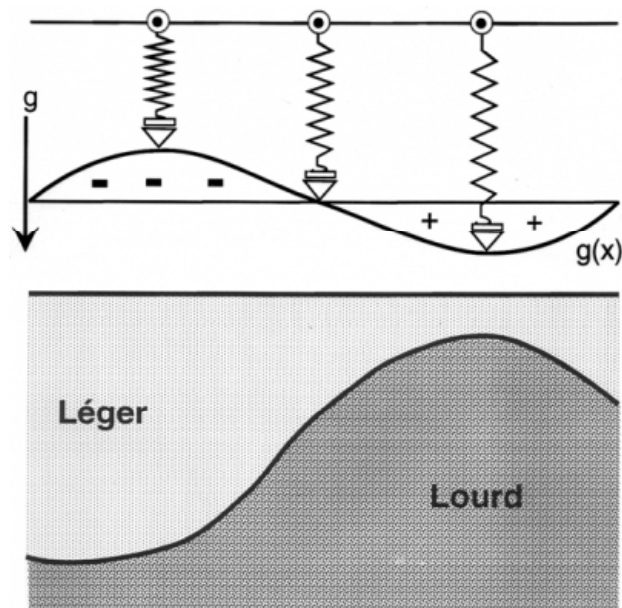
- Bases de données
- International Gravity Field Service

Annexe : Mesure absolue de la pesanteur à Carcans Maubuisson

1. MESURE DU CHAMP DE PESANTEUR

ORDRES DE GRANDEUR DES VARIATIONS DE PESANTEUR

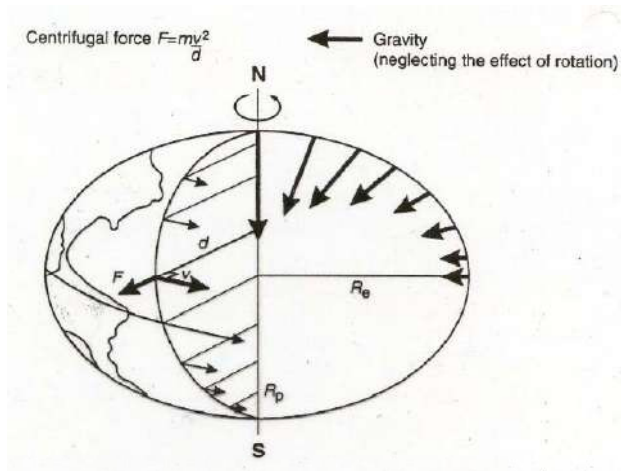
PRINCIPES ET CARACTÉRISTIQUES DES SYSTÈMES DE MESURE TERRESTRES



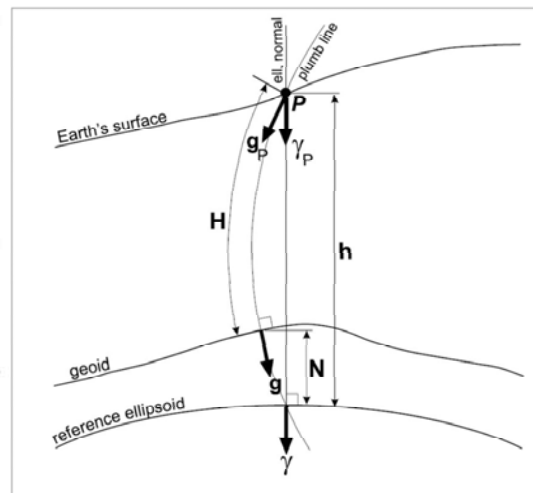
Variations de pesanteur à la surface du globe

❑ Origine : 1. Forme et structure de la terre

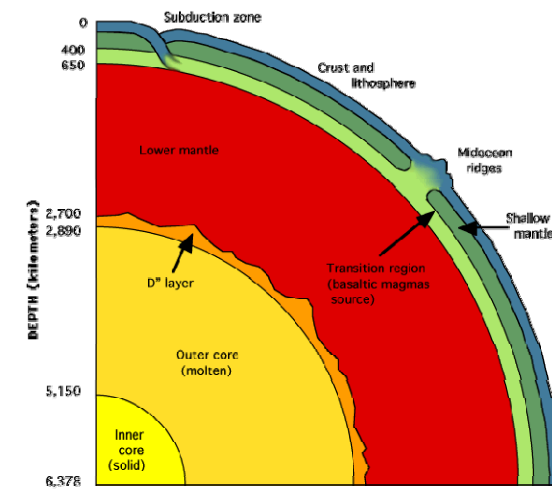
Applatissement / Rotation (fonction de la latitude)



Topographie (fonction de l'altitude)

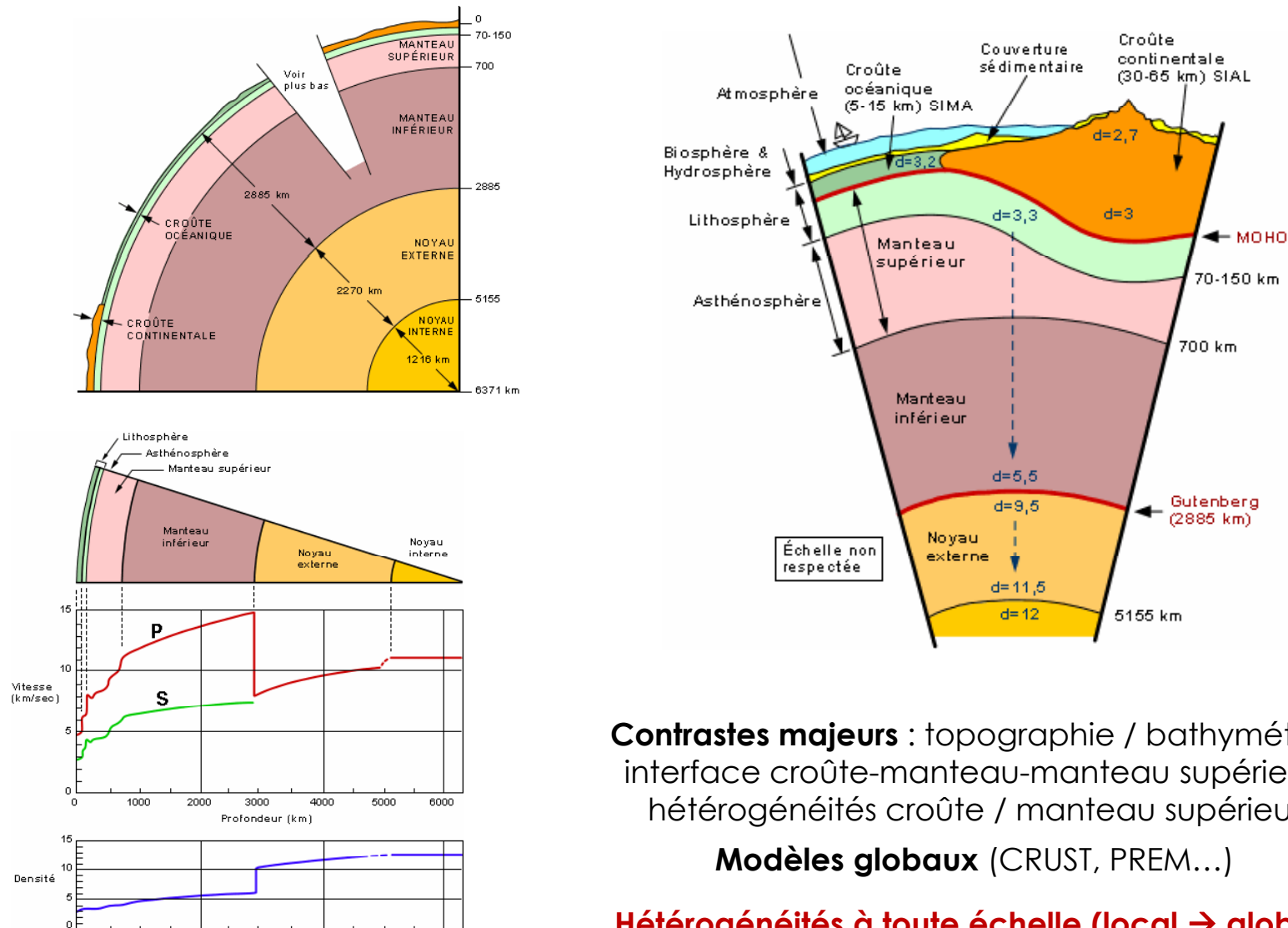


Structure interne (fonction de la répartition des masses)



Variations de pesanteur à la surface du globe

Composition interne du globe terrestre / Hétérogénéités de densité



Contrastes majeurs : topographie / bathymétrie, interface croûte-manteau-manteau supérieur, hétérogénéités croûte / manteau supérieur

Modèles globaux (CRUST, PREM...)

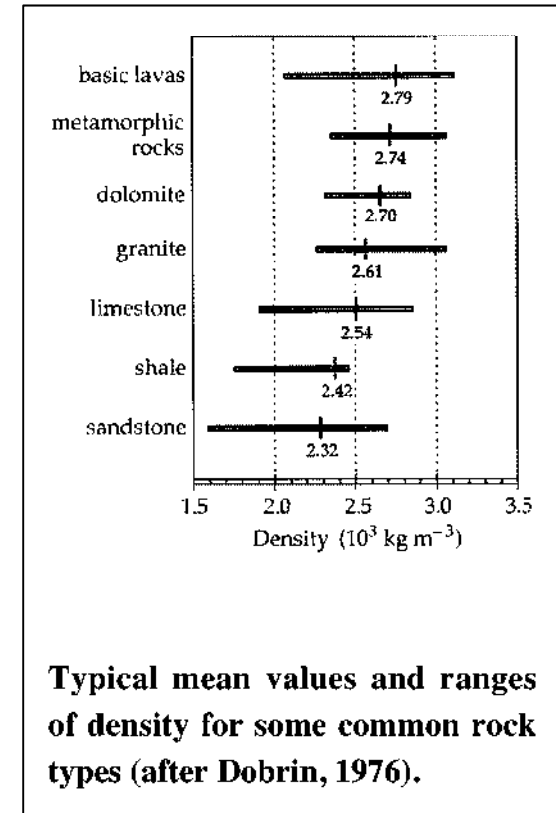
Hétérogénéités à toute échelle (local → global)

Variations de pesanteur à la surface du globe

Composition interne du globe terrestre / Hétérogénéités de densité

- Variations de densité de principaux constituants de l'écorce terrestre

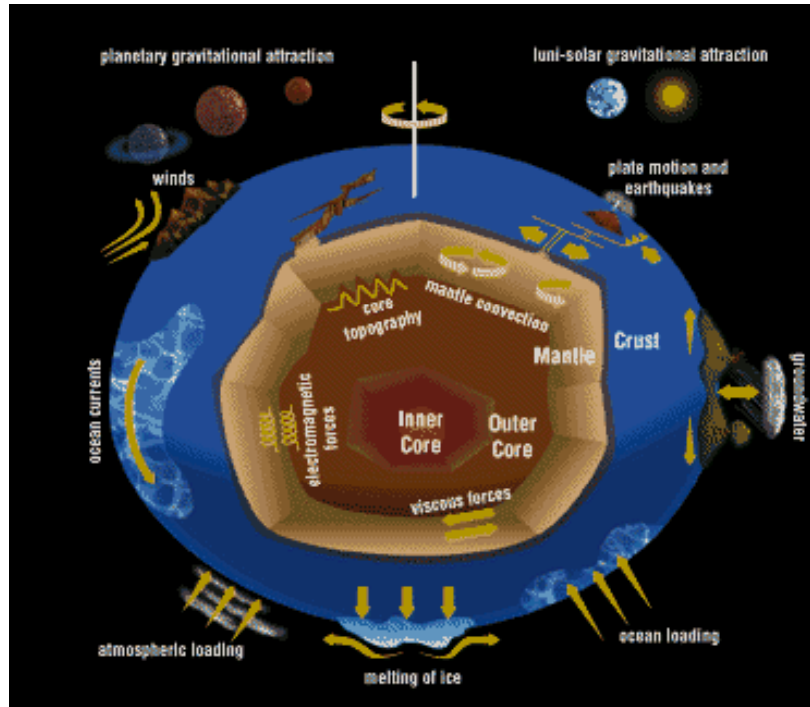
Material	Density (gm/cm ³)	
Air	~0	
Water	1	
Sediments	1.7-2.3	Roches sédimentaires
Sandstone	2.0-2.6	
Shale	2.0-2.7	
Limestone	2.5-2.8	
Granite	2.5-2.8	Roches ignées
Basalts	2.7-3.1	
Metamorphic Rocks	2.6-3.0	Roches métamorphiques



Source infinie de contrastes de densité

Variations de pesanteur à la surface du globe

❑ Origine : 2. Processus dynamiques internes et externes



Marées terrestres / Surcharges océaniques

Pression Atmosphérique

Circulation océanique

Cycle de l'eau (hydrologie, glaciers)

Mouvement du pôle de rotation

Processus géodynamiques

- Mouvements tectoniques
- Activité sismique
- Activité volcanique
- Rebond post-glaciaire

❑ Origine : 3. Activité humaine

Industrielle : Exploitation de ressources naturelles, aquifères, de réservoirs de stockage...

Variations de pesanteurs à toutes échelles spatiales et temporelles

Mesurables au moyen de différentes techniques gravimétriques

(satellites – terrestres – marines – aéroportées en fonction des applications)

Variations de pesanteur à la surface du globe

□ Exemples d'applications de la gravimétrie

Géodésie : Forme de la terre, géoïde, système de référence...

Océanographie : Circulation océanique...

Physique du globe (Géophysique interne ou externe)

Structure interne du globe, marées terrestres, surcharges...

Tectonique (déformation crustale), volcanologie ou sismologie (transferts de masse)...

Géologie structurale (modélisation des structures à différentes échelles)...

Géophysique de subsurface : Génie civil (recherche de cavité), archéologie...

Hydrologie continentale : Suivi temporel des stockage d'eau...

Exploration : Inventaire des ressources minières ou pétrolières...

Navigation : Trajectographie, guidage...

Métrologie : Toute application nécessitant la connaissance de g...

...

Nature de l'information recherchée

g / paramètre physique (masse/densité) / paramètre géométrique (déplacement vertical)

Unités et ordres de grandeur

Forme simplifiée de l'attraction gravitationnelle terrestre

$$a_t = \frac{GM_T}{R^2} - \frac{3GM_T r_e^2}{2R^4} J_2 (3\sin^2 \Phi - 1) - \omega^2 R \cos^2 \Phi$$

Gravité théorique pour une terre sphérique

$$g = \frac{GM_T}{R_T^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \times 5,97 \cdot 10^{24}}{(6371 \cdot 10^3)^2}$$

- **$g \sim 9,81 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}$**

Variations liées à la latitude (rotation centrifuge)

$$a_c(\Phi) = \omega^2 R \cos^2 \Phi = (7,29 \cdot 10^{-5} \text{ (rad.s}^{-1}\text{)})^2 \times 6378 \cdot 10^3 \times \cos^2 \Phi$$

- $0,0338 \times \cos^2 \phi \text{ (m.s}^{-2}\text{)} \rightarrow \text{effet maximum } (\phi=0) \sim \mathbf{0,0338 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}}$
- Jusqu'à **$3 \cdot 10^{-3} g$**

Variations liées à la latitude (aplatissement)

- $\phi=0 : \mathbf{0.02 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}} ; \phi=90^\circ : \mathbf{-0.04 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}}$
- Jusqu'à **$6 \cdot 10^{-3} g$**



Unités et ordres de grandeur

Variations liées à la marée terrestre (ex: effet maximum pour la lune)

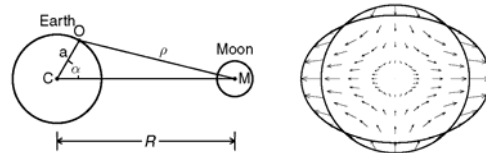


Figure 2 Tidal forcing. On the left is the geometry of the problem for computing the tidal force at a point O on the Earth, given an external body M. The right plot shows the field of forces (accelerations) for the actual Earth-Moon separation; the scale of the largest arrow is $1.14 \mu\text{m s}^{-2}$ for the Moon, and $0.51 \mu\text{m s}^{-2}$ for the Sun. The elliptical line shows the equipotential surface under tidal forcing, greatly exaggerated.

$$a_{\text{Max}} \approx \frac{GM_L}{r_L^2} \left[2 \frac{R}{r_L} + 3 \frac{R^2}{r_L^2} \right] = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \times 7,35 \cdot 10^{22}}{(384400 \cdot 10^3)^2} \left[2 \frac{6378 \cdot 10^3}{384400 \cdot 10^3} + 3 \left(\frac{6378 \cdot 10^3}{384400 \cdot 10^3} \right)^2 \right]$$

- Variation maximum (Lune) $\sim 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ (m.s}^{-2}\text{)}$
- Jusqu'à $2 \cdot 10^{-7} g$

Variations liées à l'altitude

$$a(h) = \frac{GM_T}{R_T^2} - \frac{GM_T}{(R_T + h)^2} = \frac{GM_T}{R_T^2} \left[1 - \left(1 + \frac{h}{R} \right)^{-2} \right] \approx \frac{GM_T}{R_T^2} \left[-2 \frac{h}{R} + 3 \frac{h^2}{R^2} \right]$$

- $3,06 \cdot 10^{-6} \times h \text{ (m.s}^{-2}\text{)}$
- Variation maximum (Mt Everest, 8800m) $\sim 0,0269 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}$
- Jusqu'à $3 \cdot 10^{-3} g$

Variations internes de densité

- Ordre de grandeur : $10^{-3} g - 10^{-8} g$

Unités et ordres de grandeur

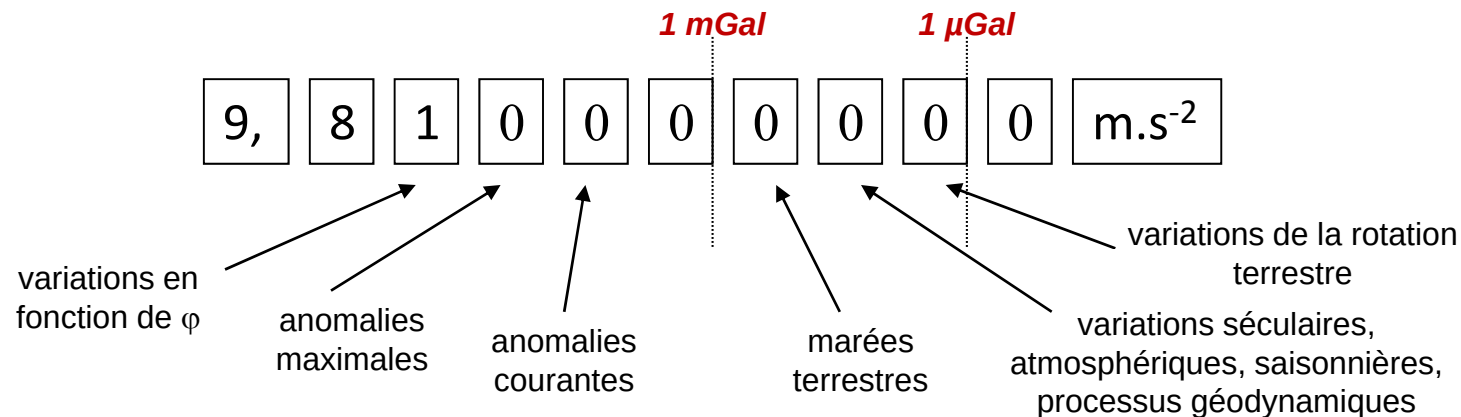
Pesanteur terrestre

- Unité SI : m.s^{-2}
- Unité commune : Gal (for Galileo)
- Pesanteur à la surface de la terre (Paris) ~ **$9,81 \text{ m.s}^{-2} = 981000 \text{ mGal}$**

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm.s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m.s}^{-2}$$

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$$



Rappel des principales contributions

Latitude (Pole 90° - Equator 0°) :	5 000 mGal
Altitude (3 $\mu\text{Gal/cm}$) (deep sea – High Mountain):	3 000 mGal
Marées terrestres:	0.200 mGal
Masses internes profondes (croûte-Manteau, Moho):	500 mGal
Masses internes superficielles (croûte supérieure):	50 mGal
Effet de cavités et structures archéologiques:	0.020 mGal

Unité de mesure des gravimètres modernes → μGal

Gravity Measurement Units

- Unit: 1 Gal = 1 cm/s²
- $g \sim 1000$ Gal
- The μGal
 - ◆ 10^{-9} g
 - ◆ 3 mm height variation
 - ◆ Attraction of a person at close range
 - ◆ g on the surface of an apple sized planet

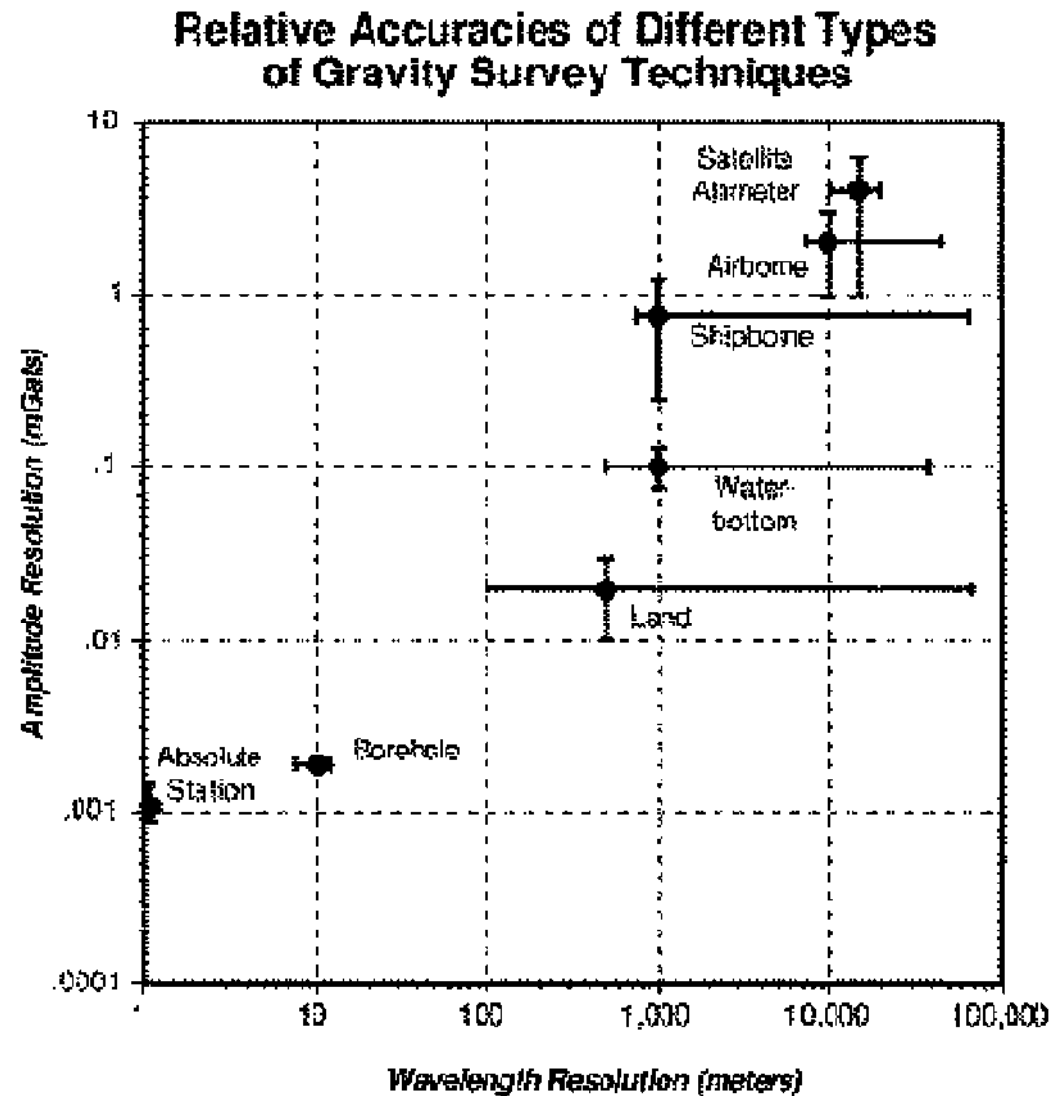


Attraction = 1 μGal !!

MICROg
LACOSTE

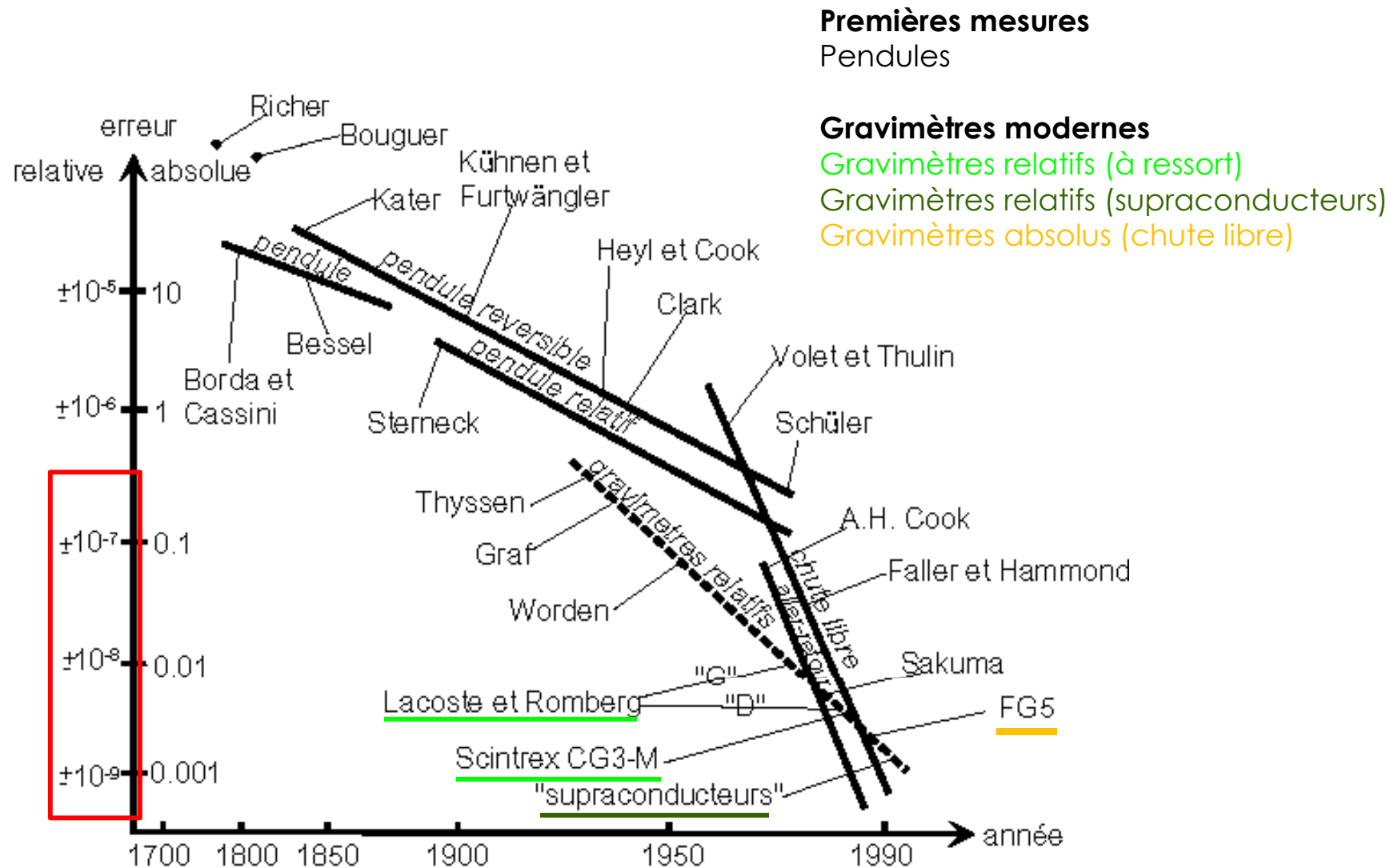
Source : T. Niebauer (Micro-g LaCoste)

□ Techniques de mesure (précision / résolution spatiale)



Techniques et moyens de mesures

□ Evolution de la précision des techniques



Techniques et moyens de mesures

❑ Instrumentation récente

Gravimètres de terrain

Gravimètres d'observatoire

Gravimètres marins / fond de mer

Gravimètres aéroportés, héliportés

Gravimètres de puits

❑ Principes

Mesures relatives (ressorts, supraconducteurs)

Mesures absolues (chute libre)

(Mesures accélérométriques, gradiométriques)

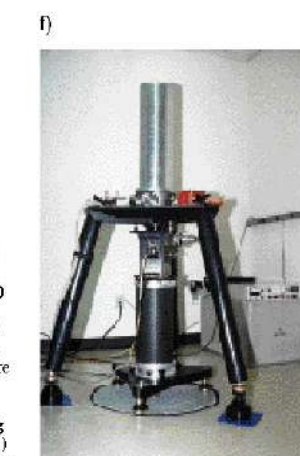
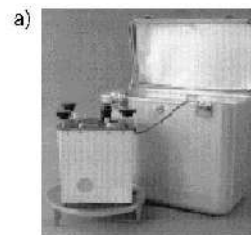


Figure 8. (a) LaCoste and Romberg Model G land gravity meter; (b) Worden Master land gravity meter; (c) W. Sodin T410 land gravity meter; (d) GWR cryogenic gravity meter; (e) Bell BGM5 marine gravity meter; (f) Micro-G Solutions FG-5 absolute drop gravity meter; (g) LaCoste and Romberg borehole gravity meter; (h) LaCoste and Romberg Model S air-sea gravity meter; (i) Scintrex CG-3 land gravity meter.

Les premières mesures : le pendule

□ Contexte / Principe

Pendule développé par Huygens (1629-1695)

Mesure de la période d'oscillation et de la longueur du pendule : détermine g !

$$Period = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

1672 : Première mesure relative du champ de pesanteur par l'astronome français Richer, qui note une différence de période d'oscillation d'un même pendule à Paris et proche de l'équateur (Cayenne)

1738 : Mesures de P. Bouguer au Chimborazo (Equateur)

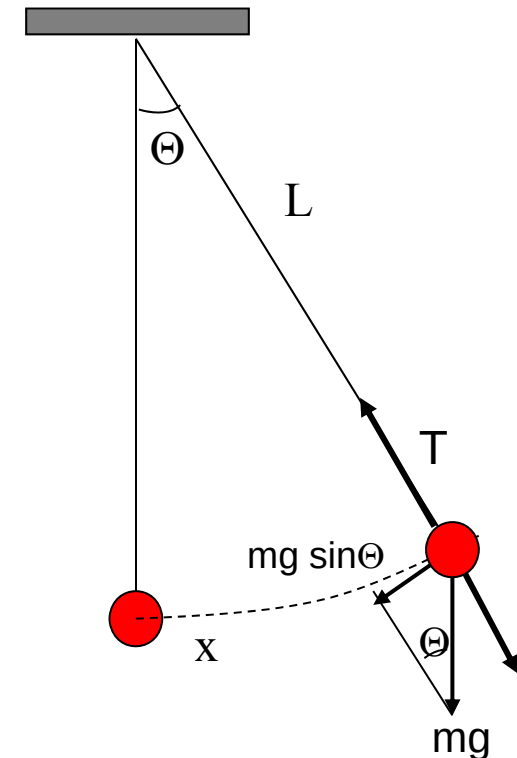
1817 : Développement de pendules plus complexes (pendule réversible par H. Kater)

□ **Précision** : 10^{-4} (Kater) à 10^{-6} (années 60)

□ Applications

Mesures relatives ou absolues XVIII° → XX°

1er Système de référence gravimétrique global "Potsdam"



For small angles,
 $\sin \Theta = \Theta$

Simple Harmonic
Motion

Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ Historique

1893 : Premier gravimètre à ressort développé en Australie (Threlfall & Pollock) en exploitant les propriétés d'élasticité des fibres de quartz, récemment découvertes

1932 : Invention du ressort de longueur nulle (LaCoste & Romberg)

1930 – 1950 : Développement des gravimètres portables à ressort (après la 2^e guerre mondiale avec les débuts de la prospection pétrolière) : *Thyssen, Graf, Askania, Western, North American, LaCoste & Romberg, Worden, Sodin, Scintrex...*

1989 : Premier gravimètre automatisé à acquisition numérique (Scintrex Autograv CG3)

□ Principe de base

Principe du peson : masse suspendue à l'extrémité d'un ressort en métal ou en fibre de quartz

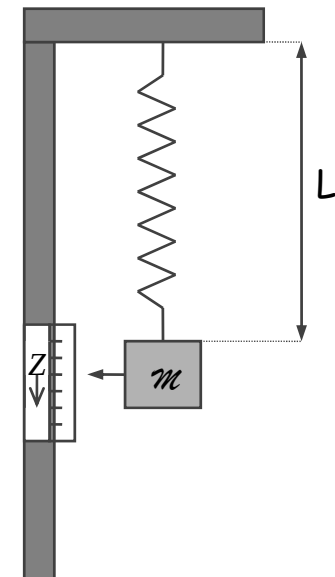
On mesure des variations de l'allongement du ressort en fonction des variations de pesanteur (allongement linéaire dans une petite variation de pesanteur) → amplifier et étalonner le déplacement mesuré

Capteur placé sous vide et éventuellement thermostaté (~45 à 50°C)
→ isolation thermique, frottements, propriété élastique du ressort

Mesure relative de petites variations pesanteur

→ nécessite un recalage sur des stations de référence (mesure absolue)

→ nécessite un contrôle de la dérive instrumentale du ressort (réoccupation de stations)



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ Gravimètres à ressort vertical (exemple : “Scintrex CG3 / CG5”)

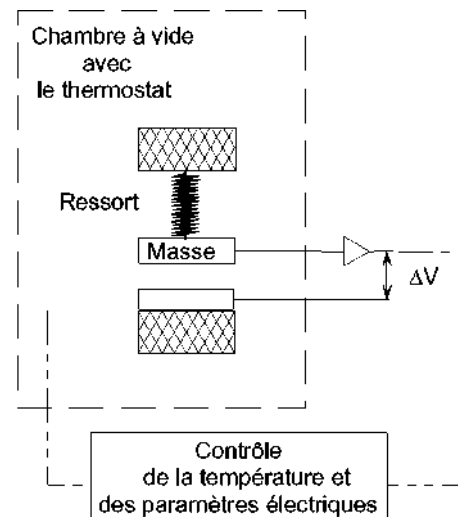
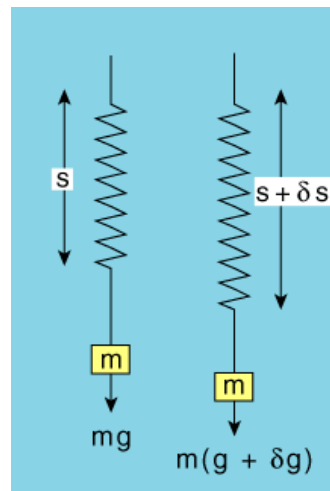
- Ressort vertical en Quartz (avantages : élasticité, robustesse)
- Masse équilibrée par un ressort vertical (force de pesanteur exercée par la masse m varie avec le champ et produit un allongement de faible amplitude du ressort)
- La mesure consiste à replacer la masse dans une position d'équilibre (zéro)

Cas des instruments développés jusque dans les années 60-70

→ dispositif mécanique et optique de lecture des variations d'allongement du ressort
nécessaire pour remettre la masse dans sa position d'équilibre

Gravimètre Scintrex CG3 / CG5

→ masse placée dans un capteur capacitif
(la mesure de pesanteur revient à une mesure de tension électrique)



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ Gravimètres “astatisés” (exemple : LaCoste & Romberg G/D)

Ressort en métal (avantage : faible dérive instrumentale)

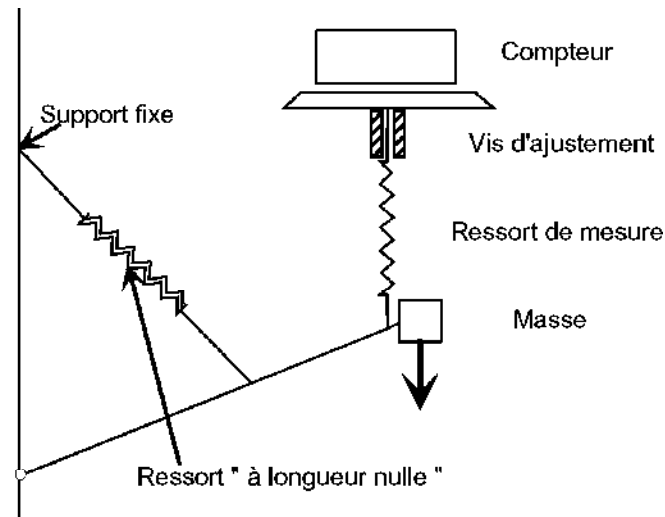
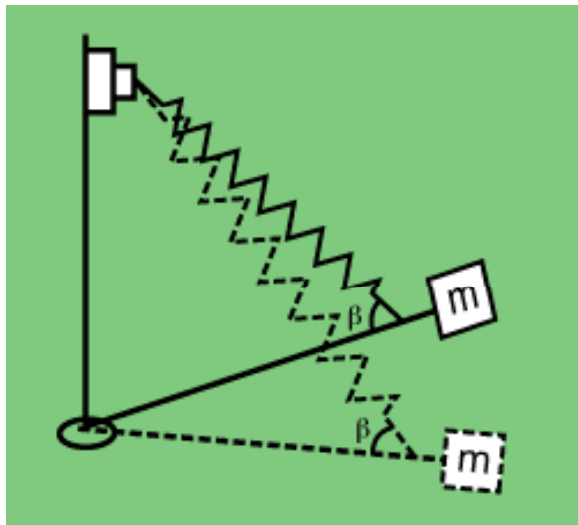
Dispositif conçu pour procurer une plus haute sensibilité de mesure.

Une tige horizontale porte la masse à l'une des 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'un vis micrométrique

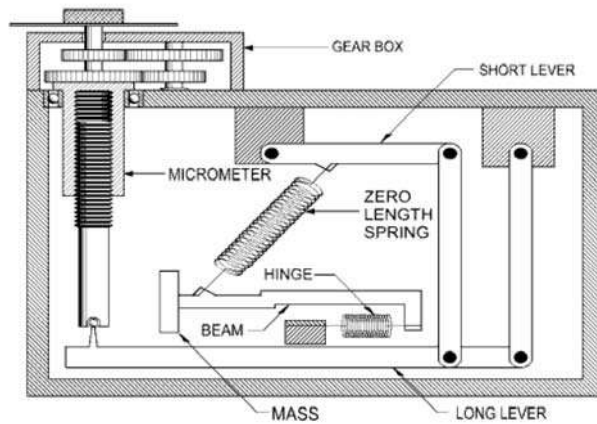
→ Dispositif optique pour mesurer les variations d'allongement (maintenant automatisé)

Système fragile : capteur doit être impérativement bloqué entre 2 mesures (transport)



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ Gravimètre LaCoste & Romberg G/D (Micro-g LaCoste, USA)



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

❑ Gravimètre Scintrex CG3/CG5 (Scintrex, CAN)

Résolution: 1 μ gal
Précision: 5 – 10 μ gal



Quartz Sensor

- Worldwide Range (8000mGal)
- H x W x L: 30x21x22 cm
- Weight (with battery): 8kg
- Repeatability: 5 μ Gal



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

❑ Autres instruments

ZLS Burris (ZLS Corporation, USA)



g-Phone (Micro-g LaCoste)

Gravimètre enregistreur (Marées Terrestres)

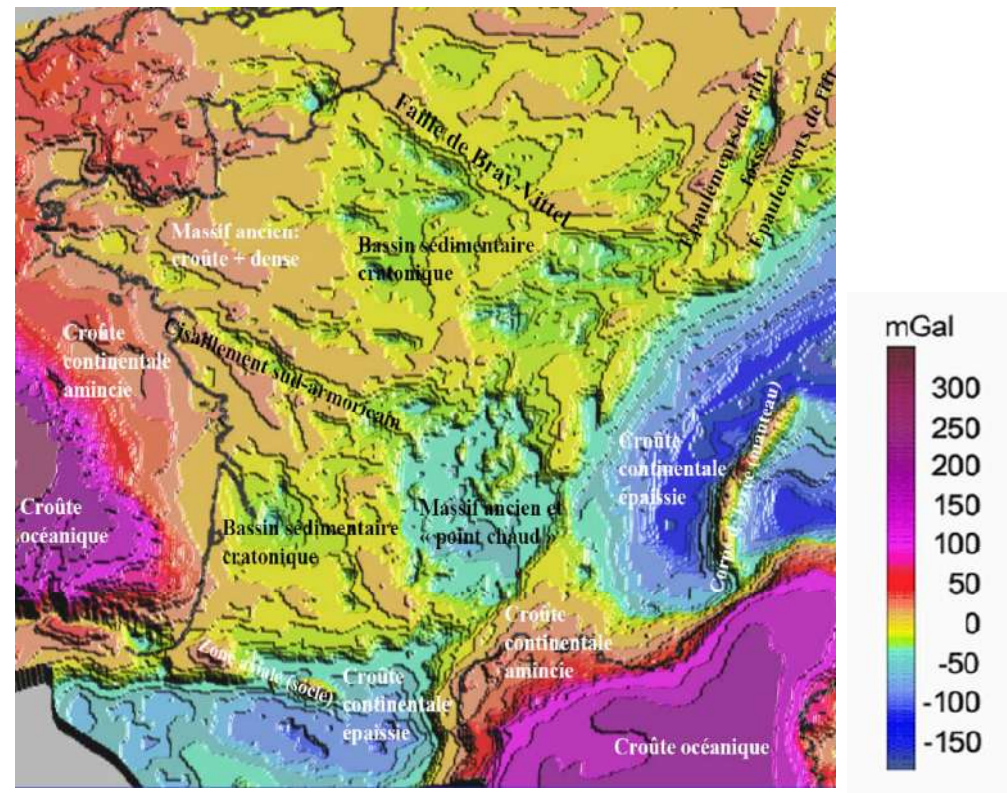
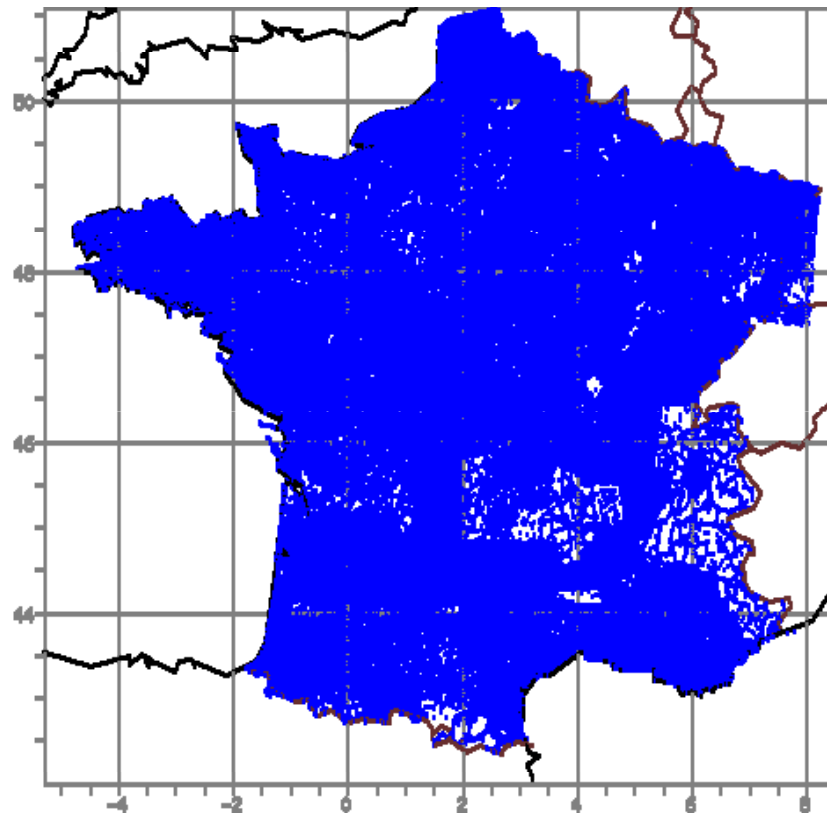


L&R Graviton (Microg- LaCoste)



Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

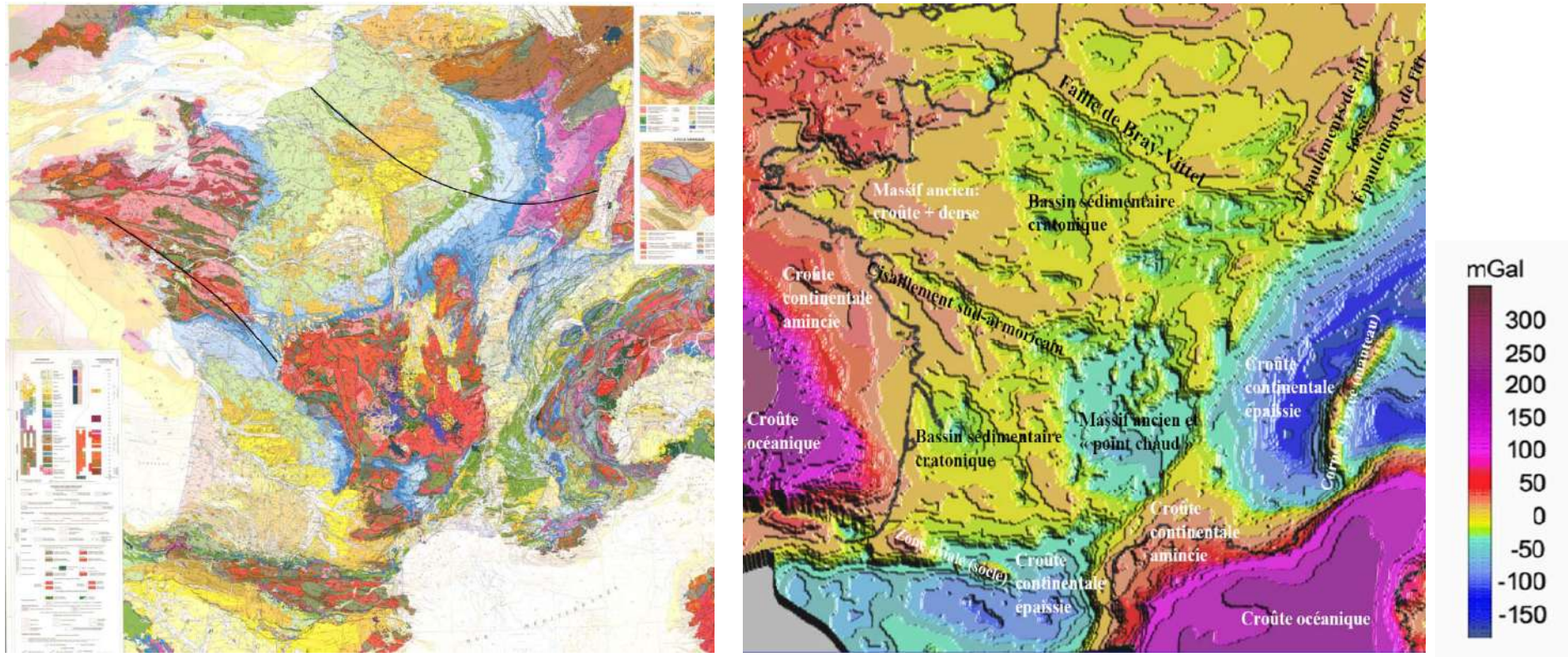
□ **Ex. d'application** : Couvertures gravimétriques régionales → France (BRGM)



Information de base à haute résolution sur le champ de gravité
Structures géologiques régionales

Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

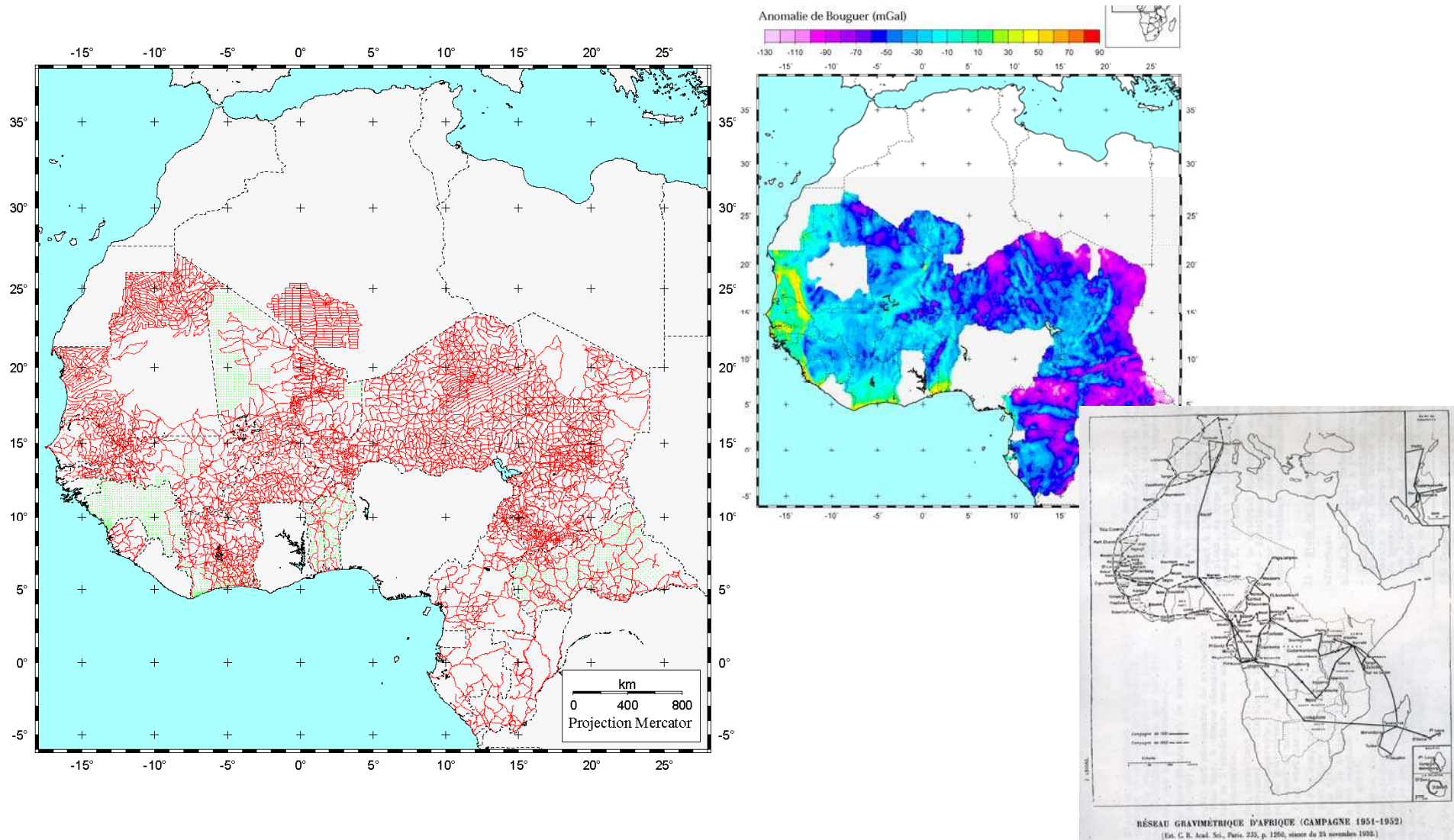
❑ **Ex. d'application** : Couvertures gravimétriques régionales → France (BRGM)



**Information de base à haute résolution sur le champ de gravité
Structures géologiques régionales**

Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

❑ **Ex. d'application** : Couvertures gravimétriques régionales → Afrique (ORSTOM/IRD)



**Cartographie de reconnaissance / Réseau de stations gravimétriques de référence
(~100 000 stations de mesures : années 1950 → années 1980)**

Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ g-Phone



Interesting new Features

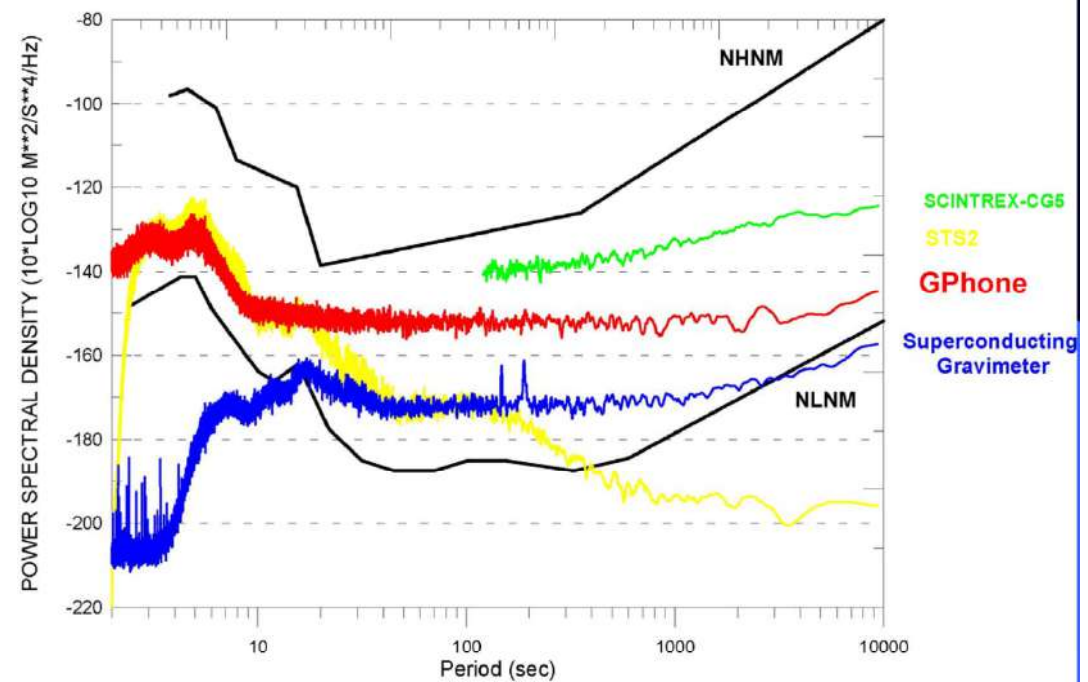
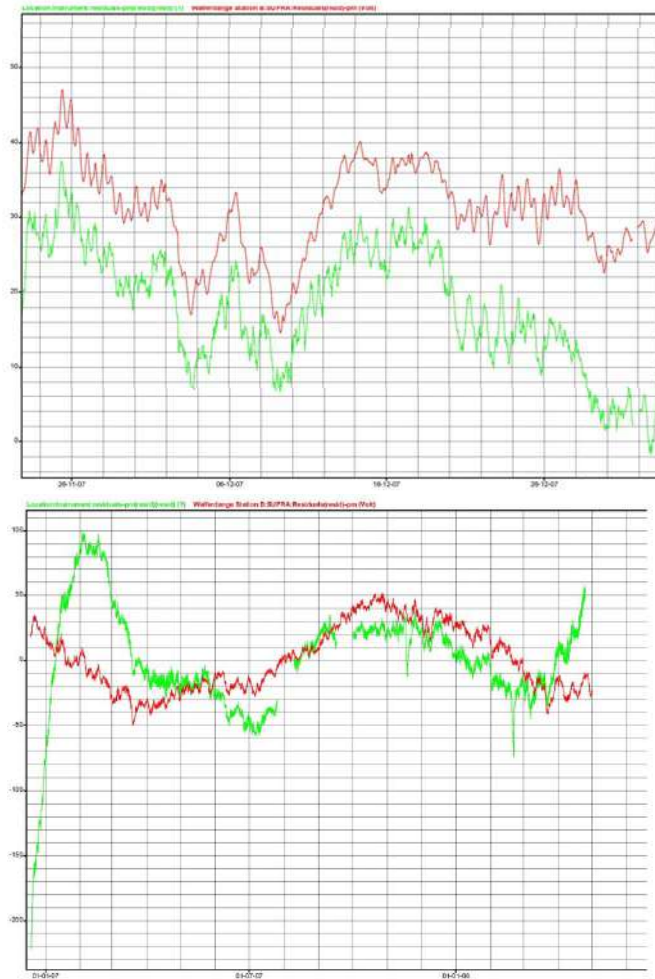
- Rubidium clock
- 1 second data sampling
- Long and cross levels
- Ambient pressure and temperature
- Sensor temperature
- Meter pressure
- Beam position

Source : Francis, Dando, Niebauer

Les mesures relatives (gravimètres à ressort)

□ g-Phone

Comparaisons en cours avec gravimètres de référence (supraconducteurs)

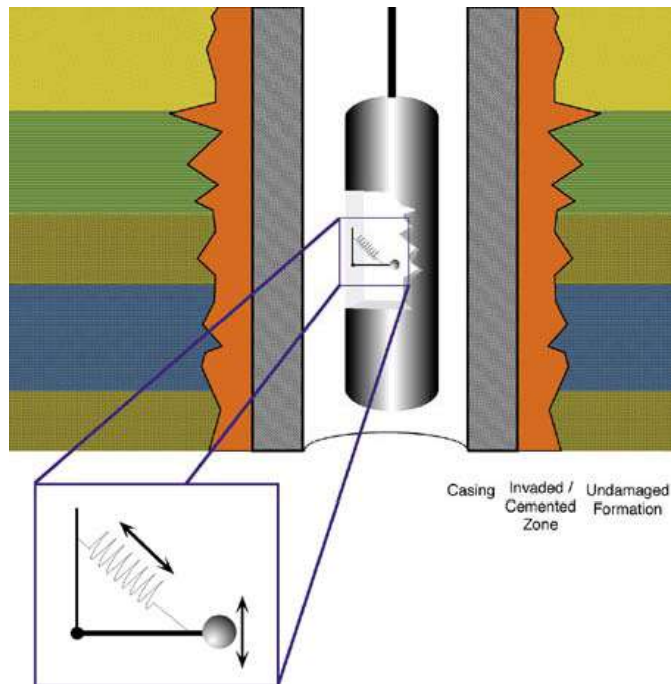


Source : Francis, Dando, Niebauer

Potentiel pour l'étude des marées terrestres + activités « monitoring »

Les mesures relatives (gravimètres de puits)

□ Gravimètres de puits

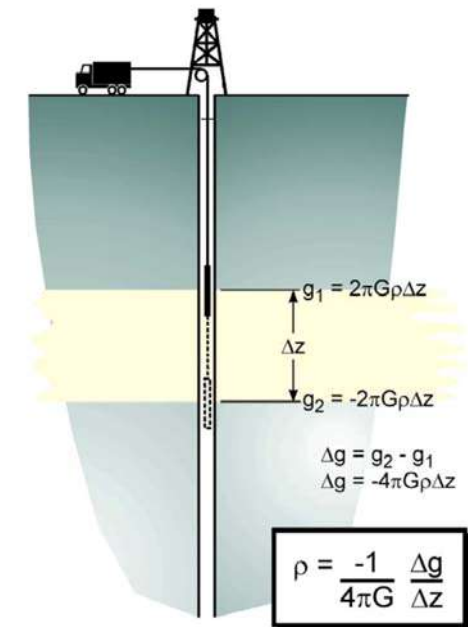


$$g_{above} = 2\pi G \rho z_{above}$$

$$g_{below} = -2\pi G \rho z_{below}$$

$$\rho_{Layer} = \frac{\Delta g}{4\pi G \Delta z} = 1.2 \times 10^{-3} \frac{gm}{cm^3}$$

if $\Delta g = 1\mu Gal$ and $\Delta h = 10m$



Potentiel pour l'exploration

Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

□ Principe

1975 : 1^{er} gravimètre supra-conducteur (GWR, USA)

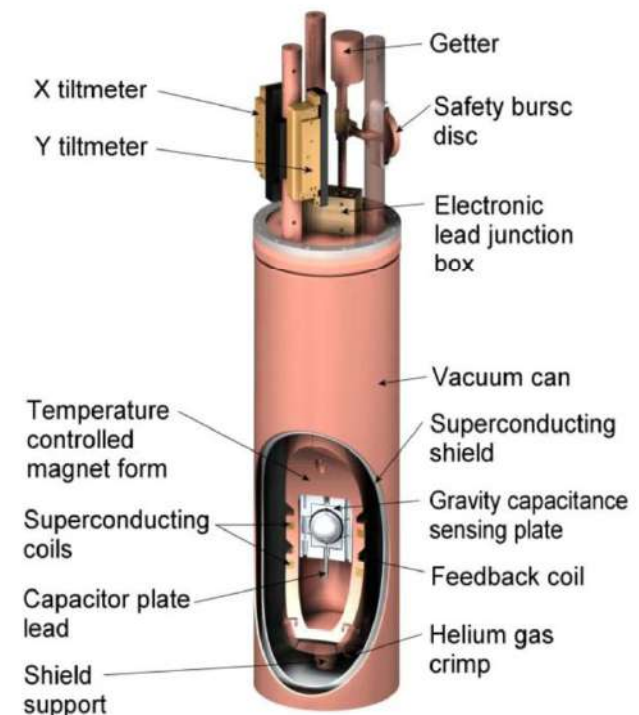
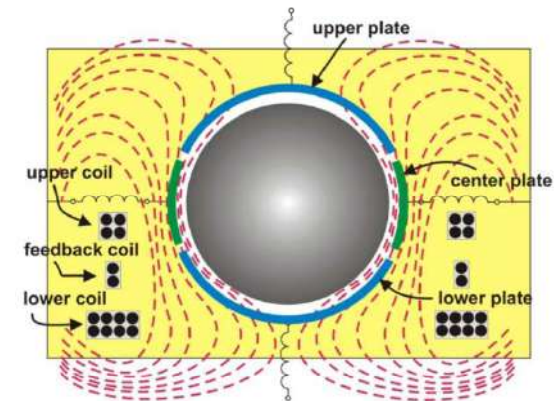
Consiste à réaliser l'équilibre d'une sphère (en niobium) soumise à l'action de son poids et à l'action d'une force de « lévitation magnétique »

La force de « lévitation magnétique » résulte de l'action du champ magnétique, créé par deux bobines parcourues par un courant permanent, sur les courants qui parcourent la sphère.

Sphère + bobines à l'état supraconducteur, (résistance électrique nulle) → maintenir le système dans un bain d'hélium liquide (T^{re} cryogénique 4,2 K)

Instrument de très grande sensibilité (détection d'une variation Δz de la position de la sphère de l'ordre de 10^{-11} m !)

Ensemble capteur (Dewar 200 → 35 litres), système de refroidissement (Hélium), système d'acquisition



Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

❑ Deux modèles commercialisés par GWR (USA)

Observatory Superconducting



i-Grav Superconducting

5. Is a superconducting seismometer practical?

In early years, SGs operated in very large 200 L liquid helium Dewars. This is no longer true. As cryogenic refrigerators have been integrated with the Dewar, the Dewars have become much smaller and more efficient. GWR's most recent SG sensors operate in 35 L Dewars that are 15 inches in diameter and 44 inches in height. However, even smaller Dewars are possible as shown in Figure 5. In addition, small 4-Kelvin cryogenic coldheads are now available that need



Figure 5: SG operating in a small Dewar using a Sumitomo SRDK-101 coldhead and a Sumitomo CA-11C compressor. Dewar is 10 inches in diameter and 36 inches tall

only 1.2 to 1.3 kW single phase 50/60 Hz power. With these coldheads there is no consumption of liquid helium during normal operation. Losses occur only during power failures. It is no longer necessary to transport and transfer liquid helium. To replenish liquid, one simply connects a compressed helium cylinder to the Dewar via a low-pressure regulator and helium is liquefied at a rate of 2 to 3 liters/day. The increase size of the seismometer sensor will not require a larger Dewar since the sensors are installed through a port in the bottom of the Dewar

Potentiel de l'i-Grav pour la densification de réseaux permanents à semi-permanents

Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

❑ Caractéristiques

Principaux avantages

- Mesures en continu (1 sec)
 - Très forte sensibilité ($\sim 1 \text{ ngal} = 1 \text{ pico-g}$)
 - Très faible dérive à long terme $< 3 \mu\text{Gal/an}$
- } Gravimètre le plus stable et le plus précis au monde

Principaux inconvénients

- Très basse température de fonctionnement (hélium liquide)
- Isolation thermique requise (dewar cryogénique)
- Instrument relatif (étalonnage requis) et peu mobile (observation permanente)

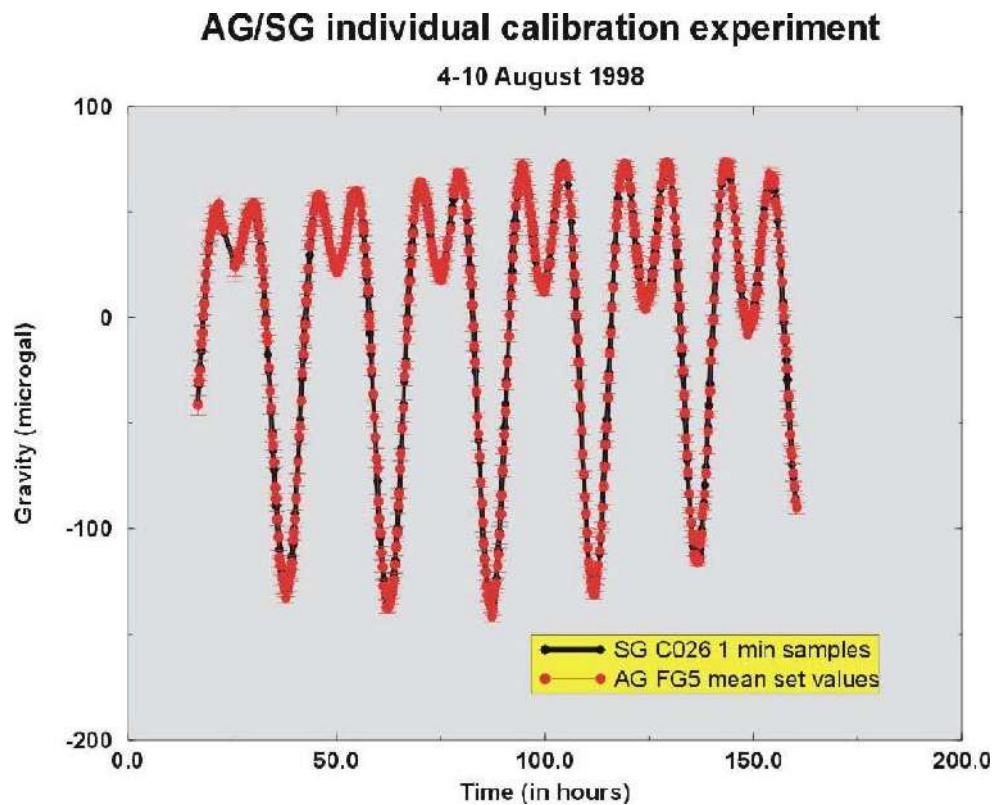
❑ Applications

Etude des variations temporelles du champ de pesanteur

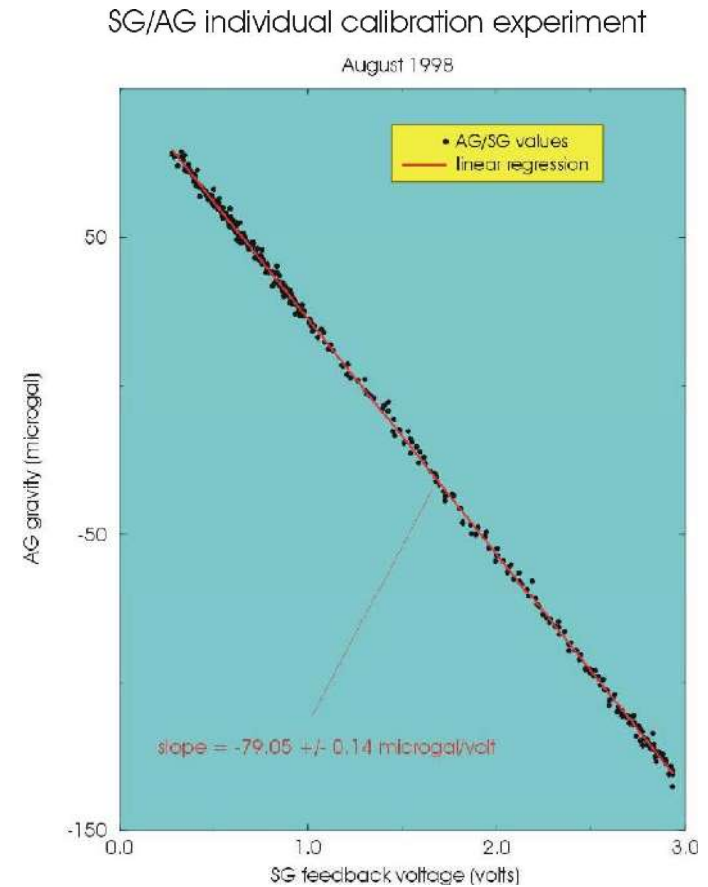
- Enregistrements continus de haute précision (faible dérive instrumentale)
- Etudes locales à régionales (marées terrestres, hydrologie, Validation GRACE,...)
- Etudes globales (géodésie globale : mouvement du pôle...) / Réseau global GGP

Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

□ Etalonnage par mesures absolues



Gravimètre SG C026 (EOST Strasbourg)

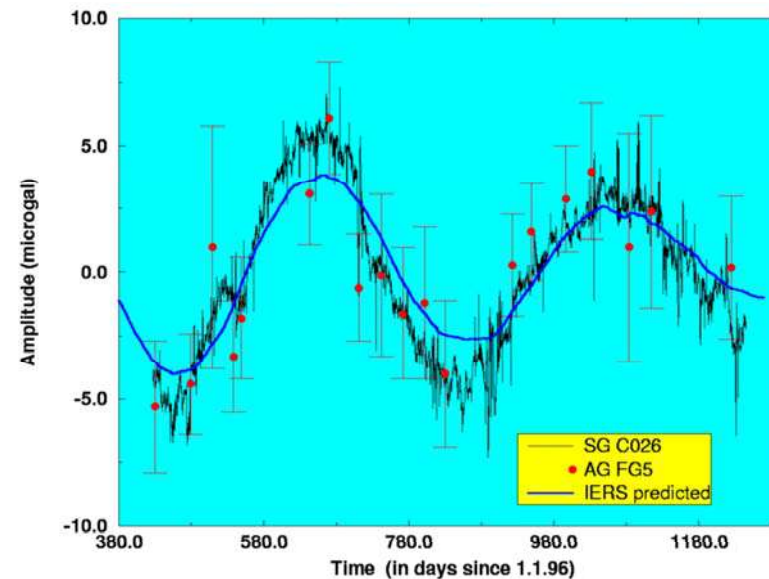


Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

Gravimètre SG C026 (EOST Strasbourg)

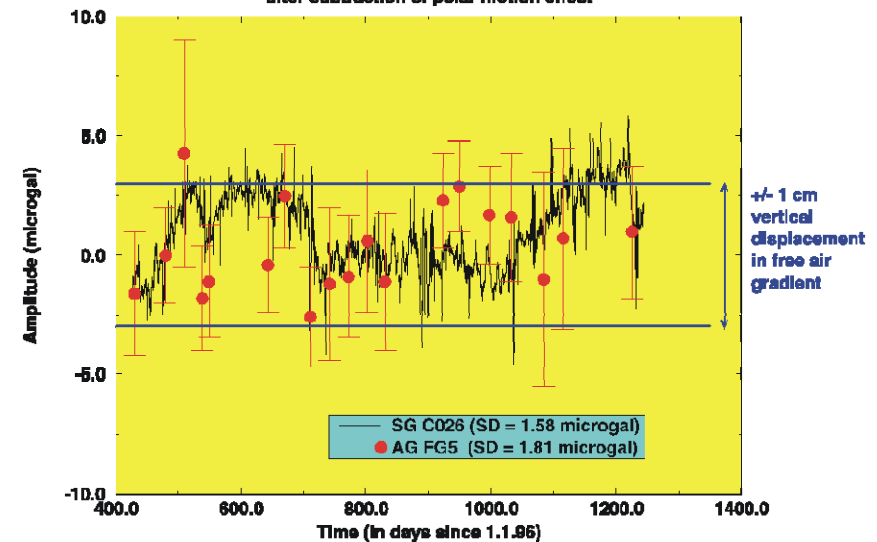


Polar motion signature as seen by SG C026 and AG FG5



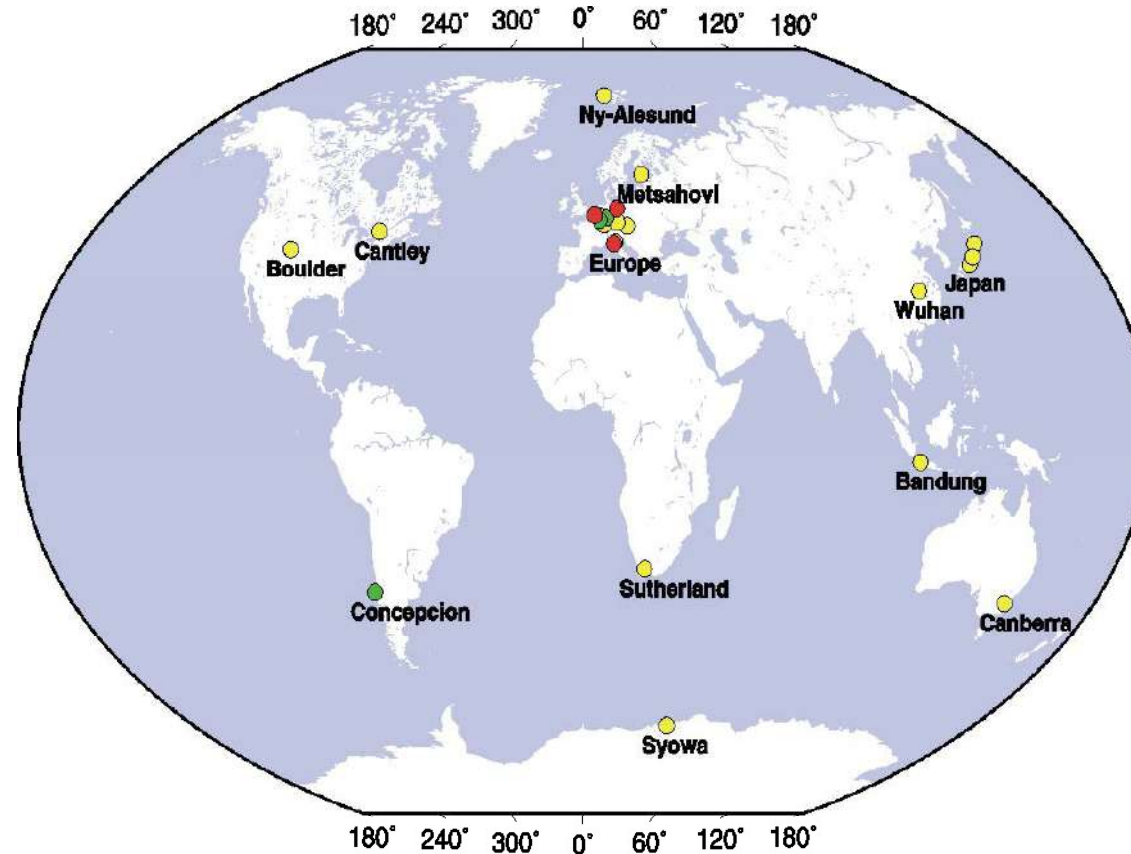
Long term stability in gravity

after subtraction of polar motion effect



Les mesures relatives (gravimètres supraconducteurs)

❑ Réseau global (GGP) + base de données



The Global Geodynamics Project (GGP) is a proposal to monitor changes in the Earth's gravity field at periods of seconds and longer. The GGP is named to indicate the application of gravity data to the solution of a number of geodynamic problems; additionally GGP may become a source for absolute gravimeter data as well as other geodynamic data.

<http://www.eas.slu.edu/GGP/ggppg.html>

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

□ Principe

Principe simple : Basé sur la chute libre d'un corps dans le vide

On mesure la distance et le temps de chute et on résout l'équation de mouvement:

$$x = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2}$$

Problème : champ de pesanteur terrestre : en 1 sec, l'objet chute de 5 m !

→ mesures très précises de distance et de temps pour des dispositifs de mesure viables

→ interférométrie laser / horloges atomiques

Dispositifs développés avec catapultage de l'objet vers le haut (Volet et Sakuma: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ou chute libre simple (Faller, Zumberge, Niebauer)

1950 : Volet : gravimètre utilisant un corps catapulté vers le haut. On mesure alors les temps de passage à deux niveaux à la montée et à la descente (précision 10^{-6}).

1963 – 1996 : Sakuma : amélioration de l'instrumentation (jusqu'à 10^{-9} (**1 μ Gal**))

1967 : Faller & Dicke : accuracy of 10^{-5} (**1 mGal**)

1972 : Hammond & Faller : laser light fringes; accuracy of 10^{-6} (**100 μ Gal**)

1980 : Zumberge & Faller/Sakuma; accuracy of 10^{-8} (**10 μ Gal**)

1985 : Niebauer & Faller : accuracy of **5 μ Gal**; 10 μ Gal (field conditions) → « JILA »

1993 : Niebauer : FG5 accuracy of 10^{-9} (**1 μ Gal**)

Gravimètre de référence FG5 actuellement commercialisé par Micro-G Solutions

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

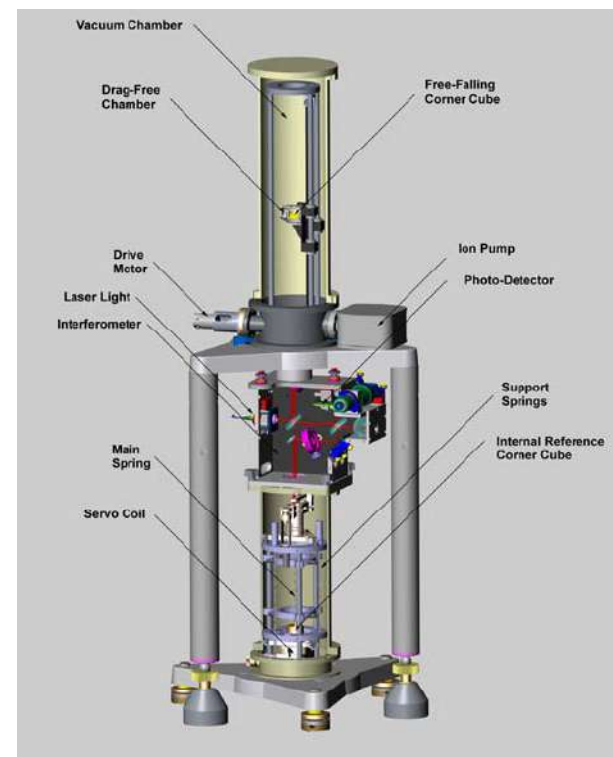
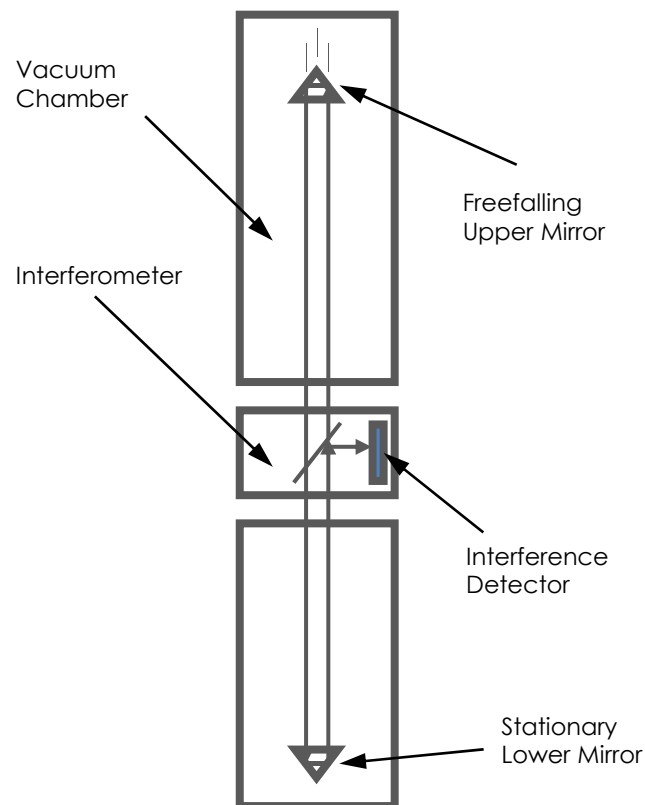
❑ Principe du gravimètre FG5

3 unités: Chambre de chute – Interféromètre laser – Sismomètre longue période

Masse test réflective (coin cube) placée en chute libre dans le vide (20 cm de chute)

Mouvement par rapport à un objet de référence est suivi par mesure interférométrique (détection de franges d'interférence)

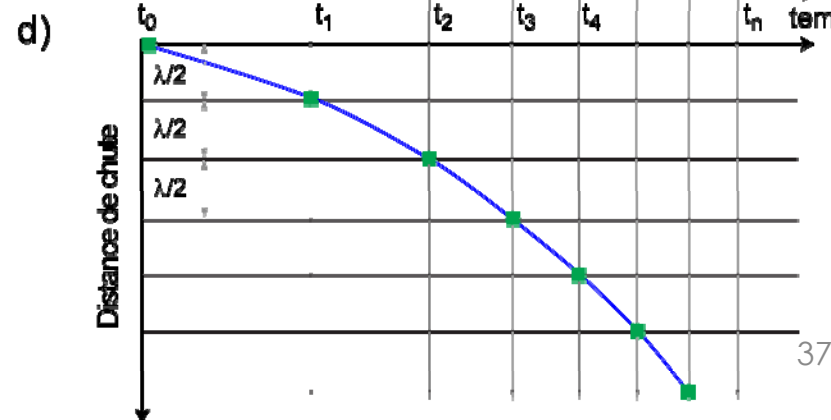
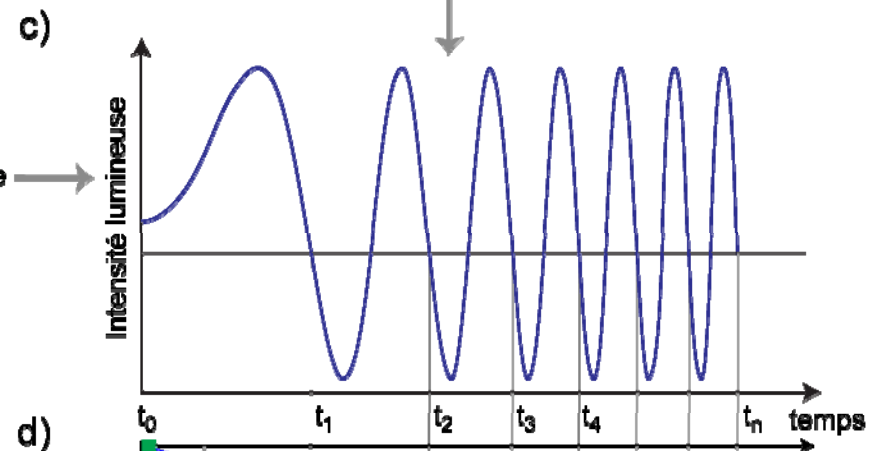
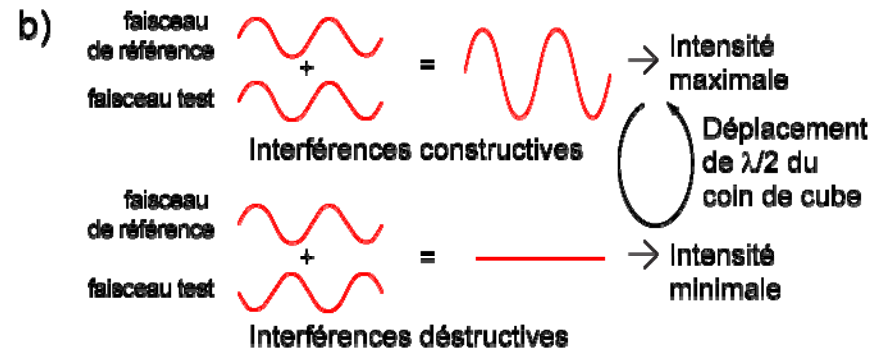
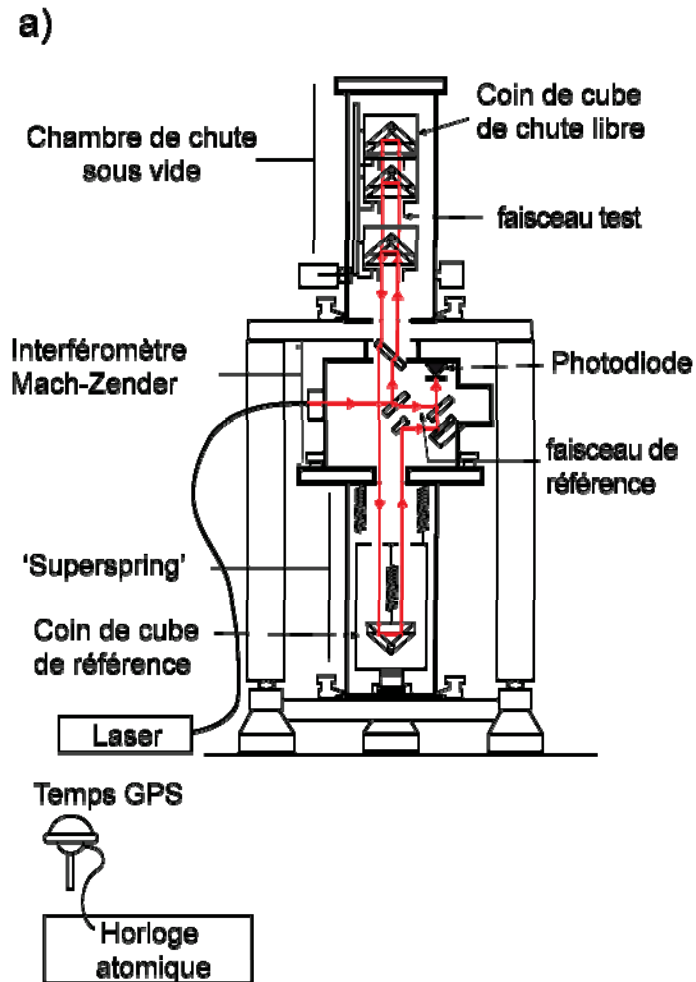
Horloge atomique Rubidium (temps de chute pour 20 cm : 0,1 ns)



<http://www.barnardmicrosystems.com/fg5schem.jpg>

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

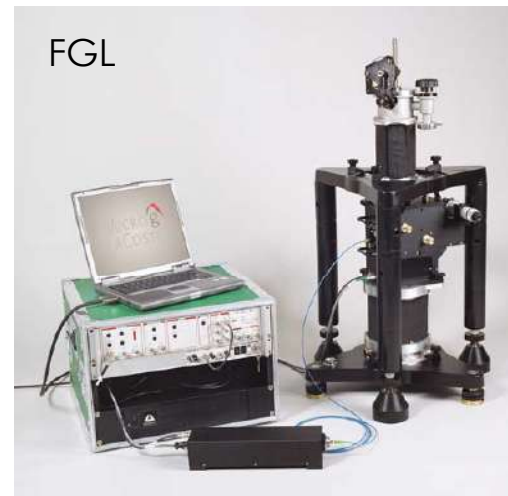
□ Principe du gravimètre FG5



(T. Jacob, PhD Thesis 2008)

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

□ Gravimètres absolus (micro-g Solutions, USA)



Meter	Accuracy μGal	Precision $\mu\text{Gal}/\text{Sqrt}(\text{Hz})$	Repeatability μGal	Temp Range deg C	DC	AC	Outdoor Operation
FG-L	10	100	10	15 to 30		X	
A10	10 5	100	10 5	-20 to +35	X	X	X
FG-5	2	10	1	15 to 30		X	

Micro-g A10 Absolute Gravimeter

Fast Absolute Gravity Surveys

- Calibrated Gravimeter
- No Looping Required
- No Drift or Tares

Features

- Mobile Outdoor Operation
- Absolute Accuracy (10 μGal)
- Repeatability (3 μGal)
- Quick Measurement

Typical 12-Hr Data Set

Micro-g Solutions
515 Briggs Street
Erie, CO 80516

Tel: 303-828-3499
Fax: 303-828-3288
www.microgsolutions.com

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ Caractéristiques

Principaux avantages

- Mesures absolues : pas de dérive instrumentale, pas de shift
- Mesures précises : FG5 (**2 μgal**) – A10 (**10 μGal**)
- Mobilité relative (A10) : mesures dans des conditions de terrain

Principaux inconvénients

- Instrumentation complexe et délicate
- Mesure dépendante d'autres standards (étalonnage laser)

❑ Applications

Réseaux et stations de référence

- Etablissement de réseaux gravimétriques et géodésiques de référence
- Lignes d'étalonnage

Etude des variations temporelles du champ de pesanteur

- Réseaux de réitération (volcanologie, hydrologie, rebond post-glaciaire, séismes...)
- Observations semi-permanentes (marées terrestres, hydrologie, volcanologie...)

Métrologie

- Etalonnage d'instruments relatifs (ressort, supra-conducteurs)
- Toute application nécessitant une détermination de g

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ **FG5 en opération** : TIGO Geodetic Observatory (Concepcion, Chile)



Mesures de type « observatoires »

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ **FG5 en opération** : Atacama desert (north Chile)



Mesures de type « terrain »
(isolation, climatisation/chauffage, alimentation autonome...)

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ Conditionnement / Transport d'un gravimètre absolu FG5



Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ **A10 en opération** (Exemples de site de mesures : Central Andes / Altipano)



Lastarria Volcanic zone (Chile-Argentina)

ALMA VLT Observatory (Chile) / Elevation 5000 m



Paranal Astronomical Observatory (Chile)



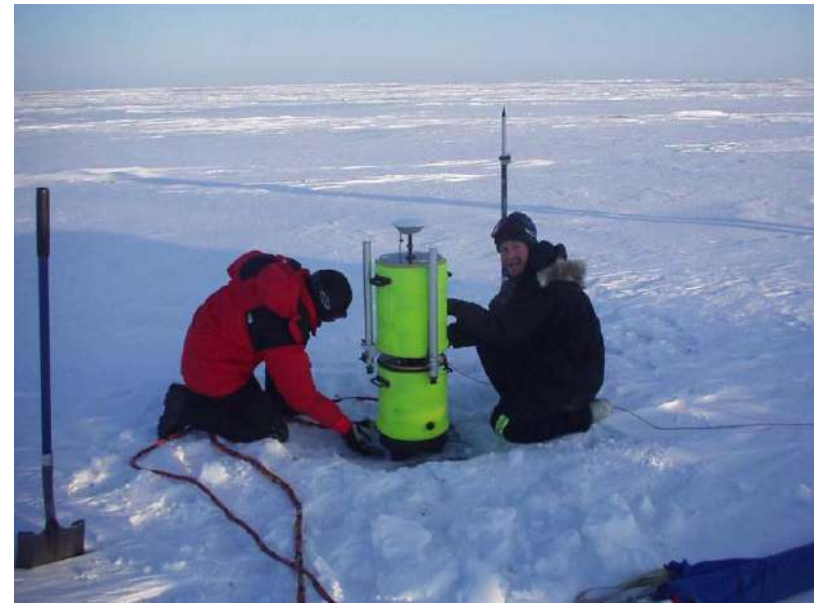
Mesures de terrain / Système isolé et autonome / Alimentation 12V

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ A10 en opération



In Greenland for ice loading monitoring (Source DTU Space)



In Alaska for reservoir monitoring (Micro-g LaCoste)



Mesures de terrain / Système isolé et autonome / Alimentation 12V

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

❑ **Exemples d'applications** : Rebond post-glaciaire / Déformation crustale



Figure 1. The Canadian Gravity Standardization Network (CGSN). Black lines indicate gravity ties. Yellow squares show sites that have been observed with absolute gravimeters, and red triangles depict sites with repeated absolute gravity measurements.

Canada

- ❑ Example of large scale monitoring : from analysis of 40 years of relative & absolute gravity measurements (network standardization)
- ❑ Gravity changes interpreted as contribution of PGR and crustal deformation
- ❑ New insights on these processes recently provided by satellite GRACE data

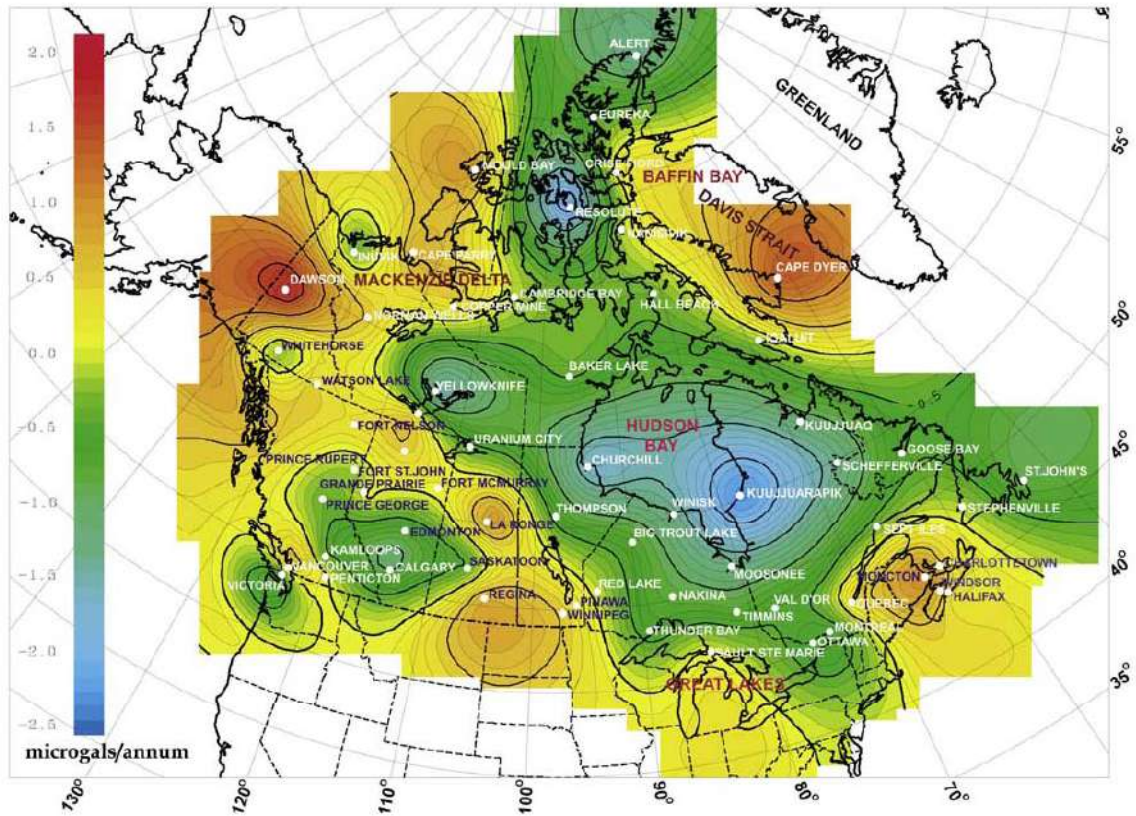


Figure 5. Map of $\dot{g}$ based on Geodetic Survey Division's constraints (GSD Solution). Contour interval 0.1 $\mu\text{Gal/a}$.

(Pagiatakis, JGR 2003)

Instrumentation gravimétrique terrestre

□ Coût actuel des gravimètres relatifs et absolus commercialisés

Principe	Instrument	Constructeur	Coût (07.2010)
<u>Free Fall</u>	Absolu FG5	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	415 kUSD
<u>Free Fall</u>	Absolu FGL	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	200 kUSD
<u>Free Fall</u>	Absolu A10	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	400 kUSD
<u>Spring</u>	Relatif CG5	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	95 kUSD
<u>Spring</u>	Relatif g-Phone	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	95kUSD
<u>Spring</u>	Relatif BHGM Borehole	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	-
<u>Spring</u>	Relatif INO SeaFloor	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	-
<u>Spring</u>	Relatif TAGS Airborne	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	-
<u>Spring</u>	Relatif Air / Sea	LRS (Micro-g LaCoste / Scintrex) – USA/CAN	-
<u>Spring</u>	Relatif Burris automated	ZLS Corp. - USA	82,5 kUSD
<u>Spring</u>	Relatif ZLS dynamic	ZLS Corp. - USA	-
<u>SC</u>	Relatif SC i-GRAV	GWR - USA	275 kUSD
<u>SC</u>	Relatif SC Observatory	GWR - USA	458 kUSD

Grande diversité et savoir faire du constructeur LRS / Offre peu diversifiée
 Demande significative pour les gravimètres de terrain CG5 (680 unités vendues depuis nov 2003)

Instrumentation gravimétrique terrestre

MICROg
LACOSTE
A DIVISION OF LRS

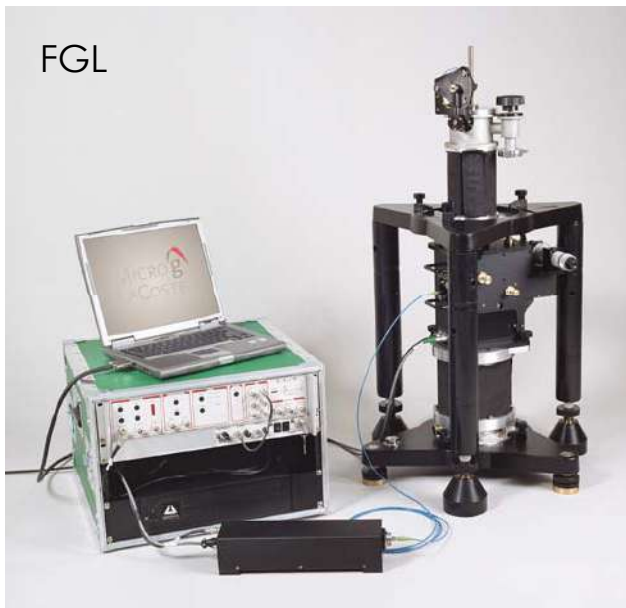
FG5



g-phone



FGL



A10



CG5

SCINTREX
A DIVISION OF LRS



Apport du GPS aux levés gravimétriques

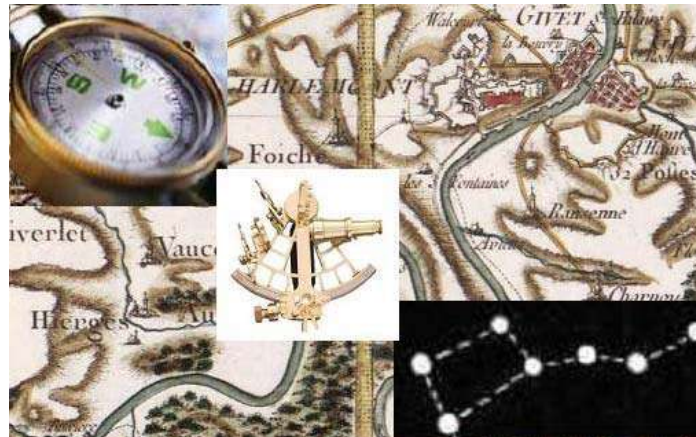
□ Positionnement / Nivellement des stations / Référence globale

Avant le GPS.... (jusqu'au milieu des années 80)

- Positionnement (carte, boussole, inertiel, 1^{er} syst. nav. satellite Doppler / Transit...)
- Nivellement (nivellement de précision, nivellement barométrique...)



Source : NOAA



Source : NRCAN

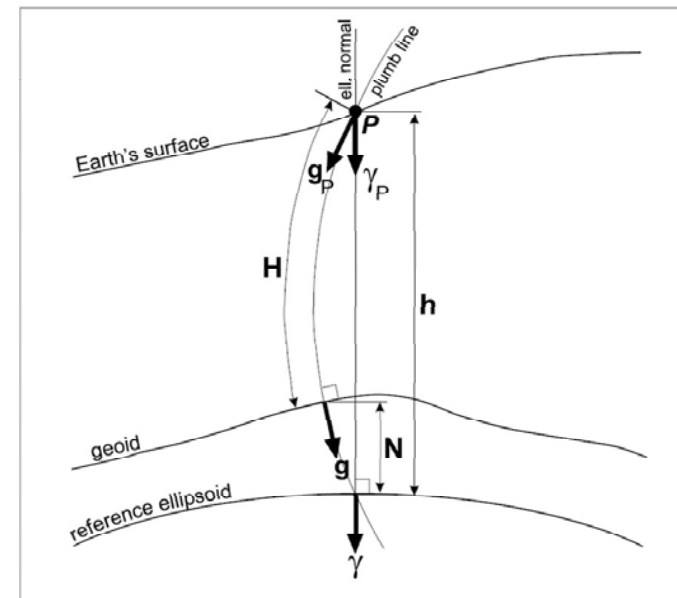
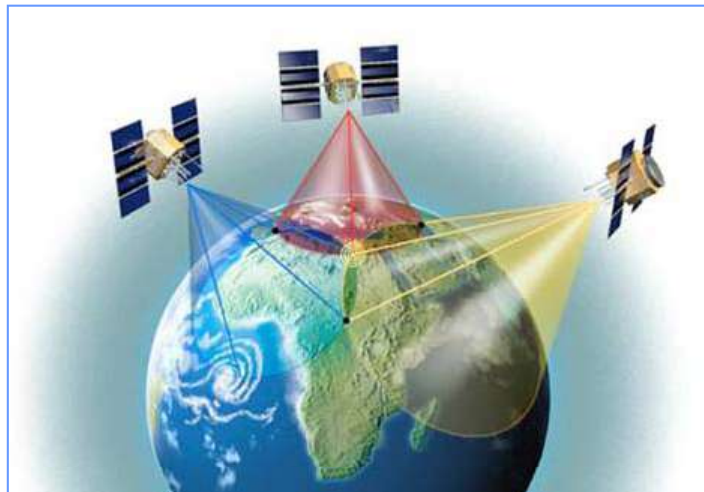
Précision pour les levés de reconnaissance : ~ qq centaines de m (lat, lon), m à qq m (altitude)

Apport du GPS aux levés gravimétriques

□ Positionnement / Nivellement des stations / Référence globale

A partir du milieu des années 80

- Développement de récepteurs monofréquence, bifréquences / antennes
- Solutions statiques, cinématiques, temps réel (RTK)



Positionnement précis et référencé (système global WGS84)

Nivellement précis et simultané des stations gravimétriques (hauteurs ellipsoïdales...)

Apport du GPS aux levés gravimétriques

Exemple de mesures conjointes gravimétrie / GPS

- Protocoles de mesures GPS (mode statique, cinématique ou RTK)
- Précision recherchée (vertical) : **cm à qq dizaines de cm**
(qq mm / an pour le GPS permanent)

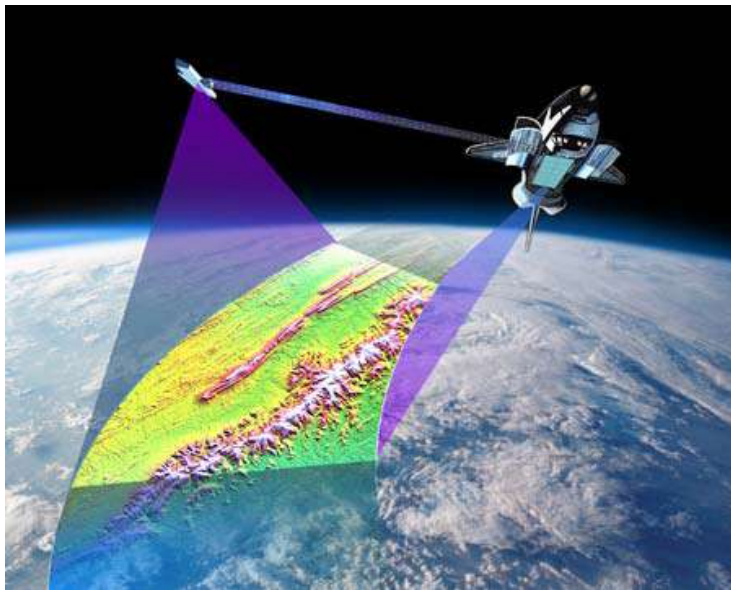


Apport des Modèles Numériques de Terrain (MNT)

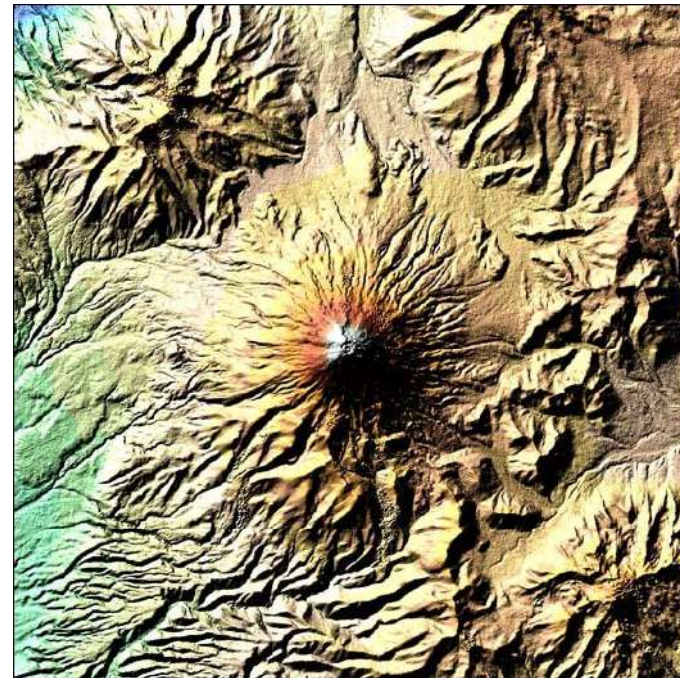
❑ Corrections topographiques précises/ Référence globale

Mission SRTM – Space Shuttle (NASA, 2000)

- MNT global (60°S – 60°N) des terres émergées (Interférométrie radar – Bande C)
- Résolution : 30m (USA) – 90 m (monde)
- Précision horizontale : 20 m (absolu) – 15 m (relatif)
- Précision verticale : 16 m (absolu) – 6 m (relatif)
- Référence : WGS84



www.boeing.com



earthobservatory.nasa.gov

Autres modèles globaux : ETOPO1 (NOAA) – ACE (ESA)...

2. ACQUISITION / TRAITEMENT DES DONNÉES (CAS DE 2 GRAVIMÈTRES MODERNES)

GRAVIMÈTRE RELATIF DE TERRAIN
SCINTREX CG3/CG5



GRAVIMÈTRE ABSOLU
MICRO-G FG5/A10



Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

- ❑ Scintrex Ltd. – Canada (Toronto)
- ❑ 1^{er} gravimètre numérique automatisé (A. Hugill, PhD, 1987-1990)

Scintrex CG-3/3M
(commercialisation: 1990)



Plus commercialisé – Plus maintenu

Scintrex CG-5
(commercialisation: 2000)



Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

❑ Spécifications techniques

- Instrument de terrain: portabilité, autonomie, alimentation 12V, robustesse, isolation thermique,...
- Instrument "géodétique" (mesure en tout point du globe): gamme de mesure jusqu'à 7000-8000 mGal
- Instrument numérique automatisé: μ processeur, mémoire
→ moyennes de N mesures (1Hz), Std Dev, rejets
→ stockage et pré-traitement des mesures
- Capteur de mesure multiparamètres: gravité + température interne et tilt du capteur, GPS (option)
- Corrections numériques "On-line" (Marée terrestre, Instrument Temp & Tilts, filtrage de bruit sismique...)
- Résolution: 1 μ Gal / Standard déviation: 5 μ Gal
- 2 modes d'utilisation: "Field mode" (campagnes de terrain) et "Cycling mode" (enregistrement continu)

Gravimètre de terrain / Gravimètre enregistreur

Gravimétrie / Microgravimétrie

Précision: qq μ Gal à 10-15 μ Gal (conditions de terrain)

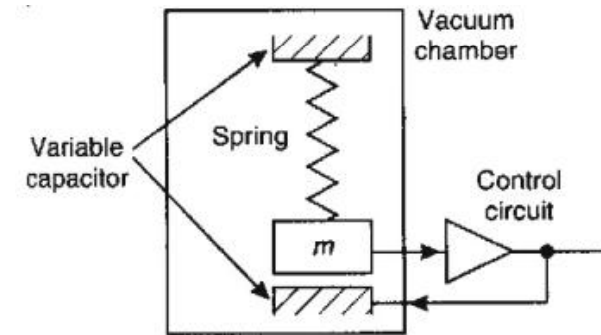
CG-5 AUTOGRAV SPECIFICATIONS

SENSOR TYPE	Fused quartz using electrostatic nulling
READING RESOLUTION	1 microGal
STANDARD DEVIATION	< 5 microGal
OPERATING RANGE	World wide (8,000 mGal without resetting)
RESIDUAL LONG-TERM DRIFT (STATIC)	Less than 0.02 mGal/day
RANGE OF AUTOMATIC TILT COMPENSATION	± 200 arc sec
TARES	Typically less than 5 microGals for shocks up to 20 G
AUTOMATED CORRECTIONS	Tide, instrument tilt, temperature, noisy sample filter, seismic noise filter
GPS ACCURACY	Standard: <15m; DGPS (WAAS): <3m
TOUCH FREE OPERATION	Keyfob transmits up to 30m line of sight
BATTERY CAPACITY	• 2 x 6.6Ah (11.1 V) rechargeable Lithium Smart batteries • Full day operation at 25°C (77°F)
POWER CONSUMPTION	4.5 Watts at 25°C (77°F)
OPERATING TEMPERATURE	-40°C to +45°C (-40°F to 113°F) Optional high temperature version to +55°C (131°F)
DIGITAL DATA OUTPUT	USB memory stick, RS-232C and USB interface
DIMENSIONS	30 cm (H) x 21 cm x 22 cm (12 in x 8 in x 9 in)
WEIGHT	8 kg (17.5 lbs) including battery
STANDARD SYSTEM CONTAINS	• CG-5 AUTOGRAV Console • GPS antenna • Leveling tripod • 2 rechargeable batteries • Battery charger, 110/240 V • External power, 110/240 V • USB stick adaptor • RS-232 and USB cables • Keyfob • Carrying bag • Transit case

Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

□ Capteur

- Ressort vertical en quartz (élasticité, robustesse)
- Capteur sous vide / Thermostaté (~40°C / 50°C) (frottement, isolation thermique)
- Mesure capacitive du déplacement de la masse



La force gravitationnelle appliquée sur la masse d'épreuve (m) est balancée par une force élastique générée par l'extension du ressort (*constante k , longueur non contrainte l_u*).

La longueur (l) du ressort est donné par :

$$l = \frac{mg}{k} + l_u$$

Une perturbation de pesanteur (de g_0 à $g_0 + \Delta g$) produit un changement de l'allongement du ressort de (de l_0 à $l_0 + \Delta l$) avec :

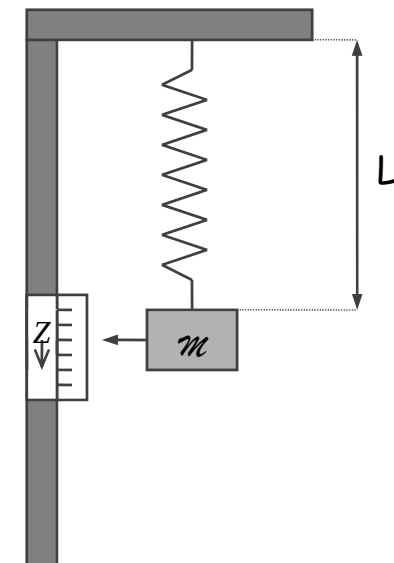
$$\frac{\Delta l}{l_0 - l_u} = \frac{\Delta g}{g_0}$$

- Sensibilité du capteur:

$$\text{Detection} : \frac{\Delta z}{L} = \frac{\Delta g}{g_0}$$

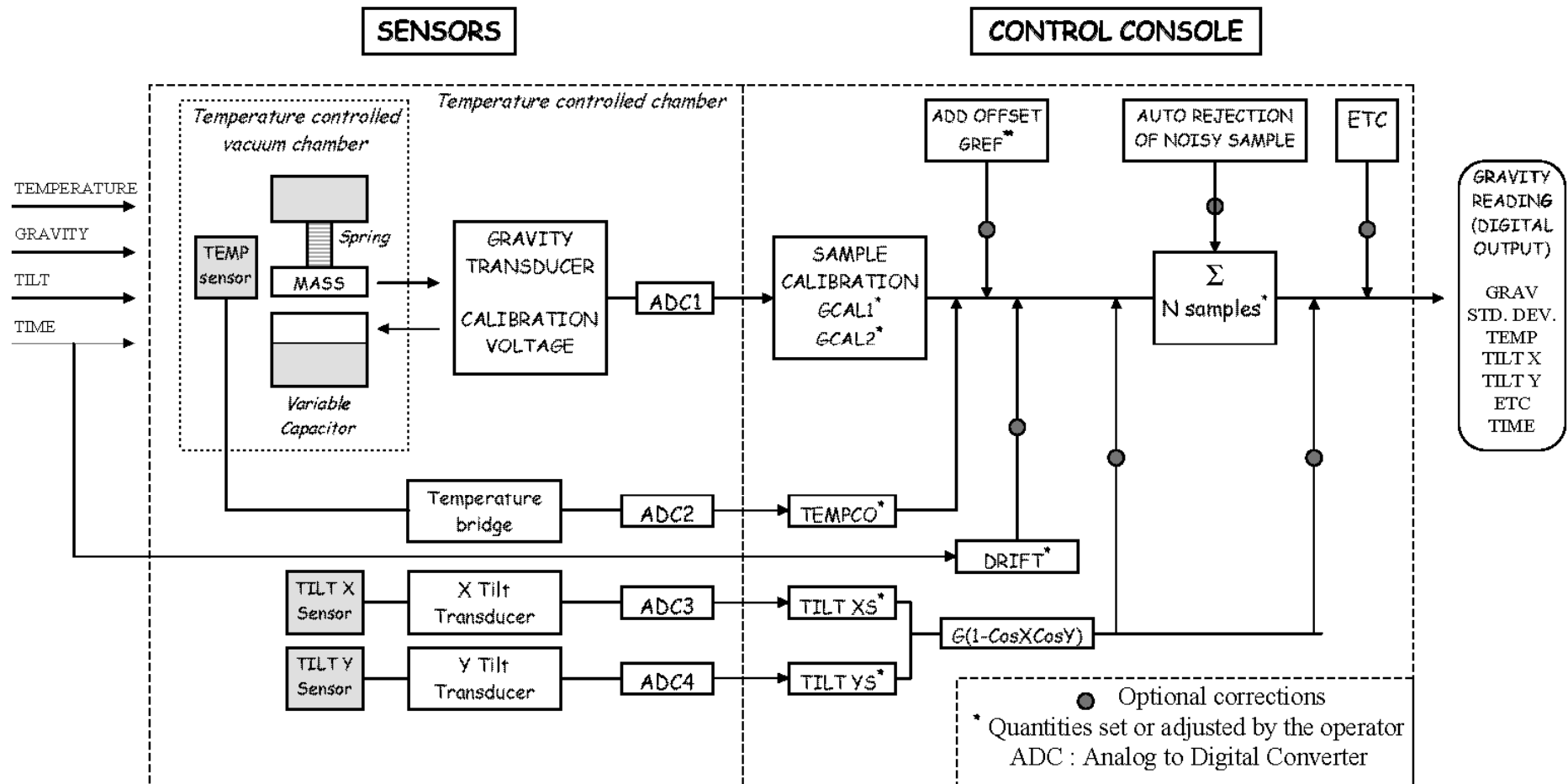
$$\text{Standard resolution} : 10 \mu\text{Gal} ; \frac{\Delta g}{g_0} = 10^{-8}$$

$$\text{Longueur du ressort} : L = 2 \text{ cm} ; \Delta z = 2 \times 10^{-10} \text{ m}$$



Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

❑ Principe (système capteur / console)



Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

❑ Traitement du signal / Corrections

1. Etalonnage des signaux "mV → mGal" : $SU = f(GCAL1, GCAL2)$
2. Correction des mesure instantanées : $S = SU - C_{Temp} - C_{Drift} + C_{Tilt} + GREF$
3. Moyenne sur la série de mesures ($DUR - NR$ échantillons) → RU ; $ERR = SD / (DUR)^{1/2}$
4. Correction de la valeur moyenne de pesanteur : $R = RU + C_{Tilt} + C_{EarthTide}$

❑ Correction de température (C_{Temp})

- Ajustée en laboratoire par le constructeur

❑ Correction d'inclinaison (C_{Tilt})

- Inclinaison du capteur influe sur la mesure : $g \rightarrow g' = g \cos \alpha$ (α inclinaison / verticale en Rad)
- Pour un angle faible : $g' = g(1 - 0,5 \alpha^2)$ → erreur de 10 μ Gal pour un angle $\alpha = 20$ arc.sec
- Correction automatique effectuée entre +/-200 arc.sec à partir des mesures *de tilt* x, y
- Ajustement par l'opérateur : Sensibilité, « cross-coupling », ajustement des termes correctifs
- L'instrument doit être nivellé à +/- 10 arc.sec (pour minimiser les erreurs)

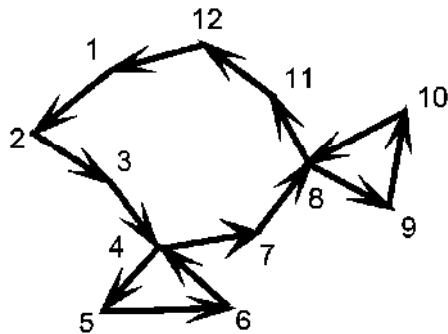
❑ Correction de marée terrestre ($C_{EarthTide}$)

- Algorithme de Longman (1979): modèle standard à 5 – 10 μ Gal près
- Prédiction de la marée terrestre en fonction du lieu et du temps
- Possibilité d'appliquer une correction plus précise en post-traitement (modèles incluant des coefficients d'amplitude et phase pour chaque onde de marée)

Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

❑ Correction de dérive instrumentale (C_{Drift})

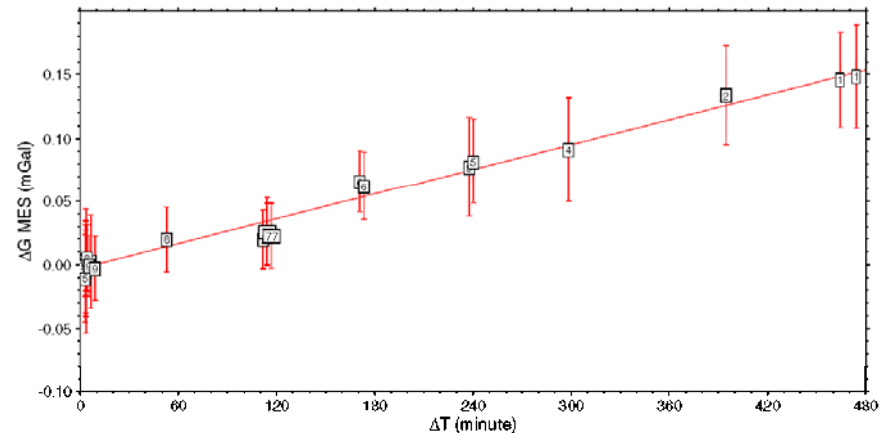
- Réponse du ressort à des variations de température, de pression, chocs, vibrations...
- Comportement instrumental complexe. Cependant considéré linéaire en fonction du temps sur de courtes périodes (un à plusieurs jours) soit à l'échelle d'un circuit gravimétrique
- Dérive instrumentale définie par des retours périodiques à la station de départ (base). Les stations intermédiaires sont corrigées de la dérive survenue à l'intérieur de l'intervalle de temps entre deux retours à la base.



$$DRIFT = \frac{\Delta g}{\Delta T} = \frac{g_{base}(t_n) - g_{base}(t_1)}{t_n - t_1}$$

$$C_{Drift}(i) = DRIFT \times \Delta t_i$$

Δt_i : temps écoulé entre la mesure au temps i et la première mesure à la base



DATA	: Total = 46	Used = 34	Station = 10	Reoccupation ($\Delta T > 15mn$) = 8
CORRECTION	: Earth Tide = MT80	Height = No	Pressure = No	
DRIFT	: Value (mGal/Day) = 0.471 +/- 0.069	Offset (mGal) = -0.003 +/- 0.008		
	: Standard Deviation (mGal) = 0.008	Maximum Deviation (mGal) = 0.014		
	: Correlation = 98 %	Goodness-of-fit (Q) = 1.000 (Believable)		

Analyse des réoccupations : seul moyen de contrôler la qualité d'un circuit relatif

Correction « on-line » avec une valeur prédéfinie pour un instrument donné ou calcul a posteriori à partir de toutes les réoccupations (paramètre d'ajustement de réseaux)

Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

□ Ex. de fichier d'observation Scintrex CG3 (fichiers Ascii)

```
-----
SCINTREX V7.2    AUTOGRAV / Field Mode    R7.31 REMOTE
                  Ser No: 408267.
Line:  0. Grid:  0. Job:  0. Date: 07/11/09 Operator:  0.

GREF.:          0. mGals                Tilt x sensit.: 294.5
GCAL.1:         6112.218                Tilt y sensit.: 280.9
GCAL.2:          0.                    Deg.Lat.: -24.90
TEMPCO.:        -0.1241mGal/mK          Deg.Long.: 68.55
Drift const.:    0.                    GMT Difference: -0.hr
Drift Correction Start Time: 12:07:59    Cal.after x samples: 12
                  Date: 07/11/22    On-Line Tilt Corrected = "12:07:59"
-----
```

```
-----
Station Grav.  SD.  Tilt x Tilt y  Temp.  E.T.C.  Dur # Rej  Time
0. 3289.119* 0.000  0.  0.  0.00 -0.020  1  0 11:47:02
0. 3350.688* 0.028  3.  4.  0.83 -0.020  30  0 11:47:20
0. 3350.679* 0.036  3.  3.  0.83 -0.019  30  0 11:48:12
0. 3350.683* 0.041  4.  4.  0.83 -0.017  30  0 11:51:24
0. 3350.661* 0.034 -3. -0.  0.86 -0.084  60  0 23:00:17
0. 3346.511* 0.000  0.  0.  0.00 -0.084  1  0 23:02:51
0. 3350.670* 0.038 -6.  1.  0.88 -0.084  60  0 23:03:07
1. 3297.871* 0.044 -4.  1.  0.87  0.093  30  0 13:55:59
1. 3297.876* 0.023 -4.  1.  0.89  0.094  60  0 13:58:21
1. 3297.881* 0.040 -5.  1.  0.89  0.097  60  0 14:00:31
1. 3297.990* 0.031 -4. -7.  0.72 -0.011  60  2 20:30:43
1. 3297.986* 0.027 -4. -7.  0.75 -0.012  60  0 20:32:04
-----
```

Bloc "CG3 HEADER"

Infos campagne, localisation, date,...

Constantes instrumentales,...

Options d'acquisition,...

Bloc "Data"

Gravimètre relatif "Autograv" Scintrex CG3/CG5

❑ Ex. de fichier d'observation Scintrex CG5 (fichiers Ascii)

```
/ CG-5 SURVEY
/ Survey name: LAST2008
/ Instrument S/N: 9136
/ Client: IRD
/ Operator: SB
/ Date: 2008/11/16
/ Time: 16:36:45
/ LONG: 68.6000000 W
/ LAT: 24.9000000 S
/ ZONE: 19
/ GMT DIFF.: 0.0

/ CG-5 SETUP PARAMETERS
/ Gref: 0.000
/ Gcal1: 9109.393
/ TiltxS: 661.379
/ TiltyS: 645.028
/ TiltxO: 40.177
/ TiltyO: -1.422
/ Tempco: -0.141
/ Drift: 0.248
/ DriftTime Start: 16:37:56
/ DriftDate Start: 2008/11/18

/ CG-5 OPTIONS
/ Tide Correction: YES
/ Cont. Tilt: YES
/ Auto Rejection: YES
/ Terrain Corr.: NO
/ Seismic Filter: YES
/ Raw Data: YES

/-----LINE-----STATION-----ALT.-----GRAV.---SD.---TILTX--TILTY-TEMP---TIDE---DUR-REJ-----TIME---DEC.TIME+DATE--TERRAIN---DATE
1.0000000 2.0000000 15.1854 1538.649 0.027 -1.1 4.2 -7.70 -0.020 50 0 12:04:34 3175.50237 0.0000 2008/11/18
1.0000000 2.0000000 14.4530 1538.659 0.026 3.1 7.0 -7.69 -0.020 50 38 12:05:36 3175.50308 0.0000 2008/11/18
1.0000000 2.0000000 14.4530 1538.648 0.016 -3.7 -0.2 -7.67 -0.021 50 3 12:07:37 3175.50448 0.0000 2008/11/18
1.0000000 2.0000000 13.4764 1538.651 0.015 -3.4 0.0 -7.67 -0.021 50 5 12:08:39 3175.50520 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 14.4530 1513.063 0.018 -4.0 -2.9 -7.44 -0.026 50 5 12:37:43 3175.52535 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 13.4764 1513.053 0.015 -5.7 -0.5 -7.45 -0.026 50 5 12:38:45 3175.52607 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 13.9647 1513.046 0.018 -5.0 1.7 -7.46 -0.026 50 6 12:40:51 3175.52752 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 12.9881 1513.044 0.019 -5.7 2.9 -7.48 -0.027 50 19 12:41:53 3175.52824 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 13.7205 1513.054 0.016 1.0 6.3 -7.52 -0.027 50 2 12:43:41 3175.52949 0.0000 2008/11/18
1.0000000 1.0000000 12.4998 1513.061 0.015 1.1 6.7 -7.54 -0.027 50 5 12:44:43 3175.53020 0.0000 2008/11/18
1.0000000 2.0000000 15.1854 1538.665 0.023 -1.0 1.2 -7.48 -0.030 50 29 13:14:49 3175.55107 0.0000 2008/11/18
1.0000000 2.0000000 14.2088 1538.677 0.022 2.7 2.5 -7.48 -0.030 50 30 13:15:51 3175.55179 0.0000 2008/11/18
```

Bloc "CG-5 SURVEY"
(Infos campagne, localisation, date,...)

Bloc "CG-5 SETUP"
(Constantes instrumentales,...)

Bloc "CG-5 SETUP"
(Option d'acquisition,...)

Bloc "Data"

Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

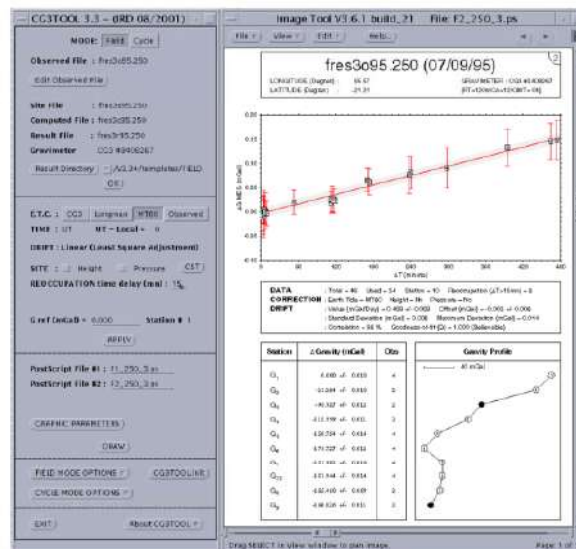
❑ Réponses instrumentales

(études en laboratoire)

- Dérive instrumentale (court et long termes)
- Facteur d'étalonnage
- Précision du modèle de marée (5-10 μGal)
- Fonctions de transferts (gravité, tilts, temp...)
- Etude de sensibilité (tilts, Patm, nivellement...)

**Chaîne de traitement de données Scintrex pour
la Gravimétrie et la Microgravimétrie**

CG3TOOL / CGXTOOL

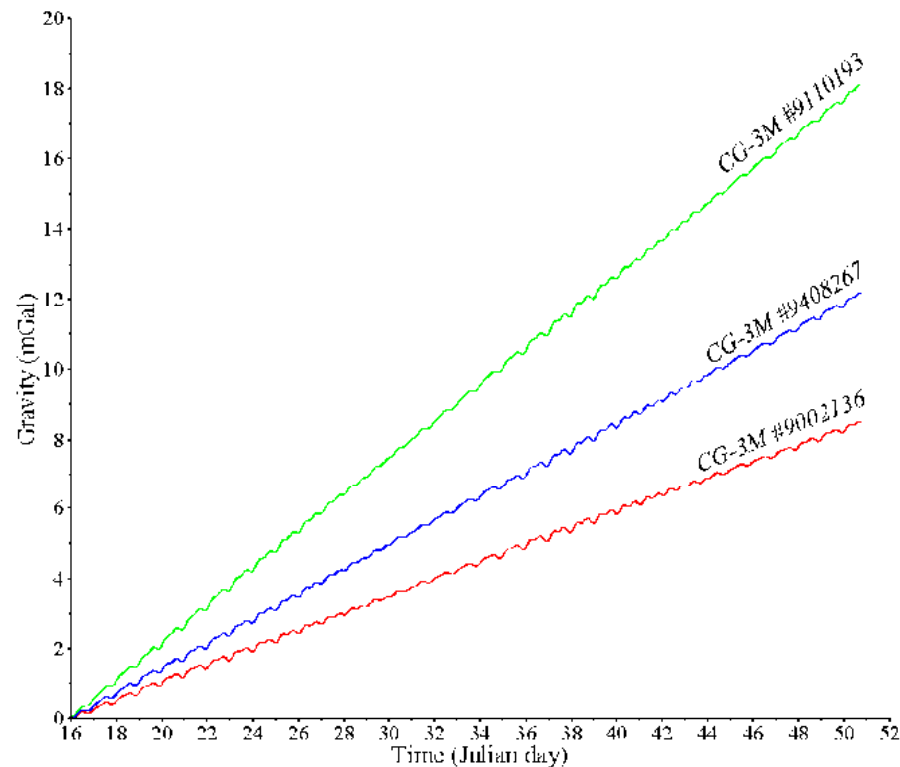


Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

□ Réponses instrumentales

- Dérive instrumentale élevée: 0,2 à 0,6 mGal / j
(décroissance avec l'âge de l'instrument)
- Caractérisation d'une dérive à long terme
(étalonnage et suivi temporel sur le long terme)

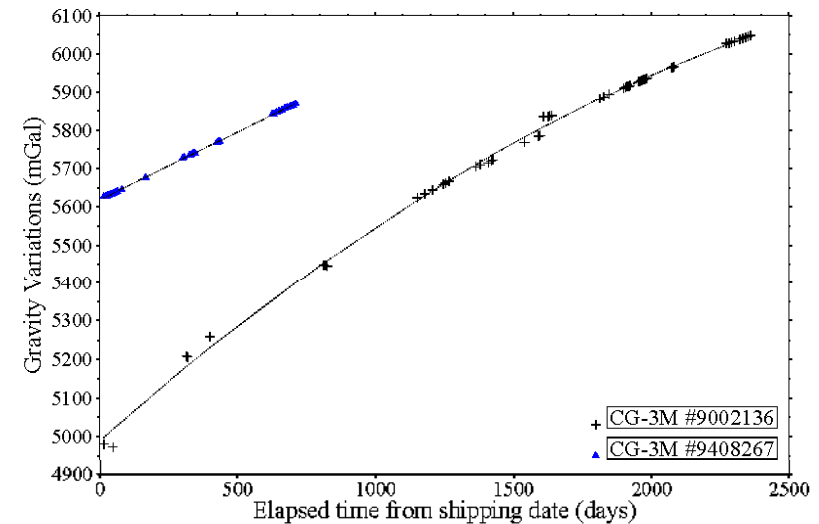
Observed gravity variations
(Bondy, 1997)



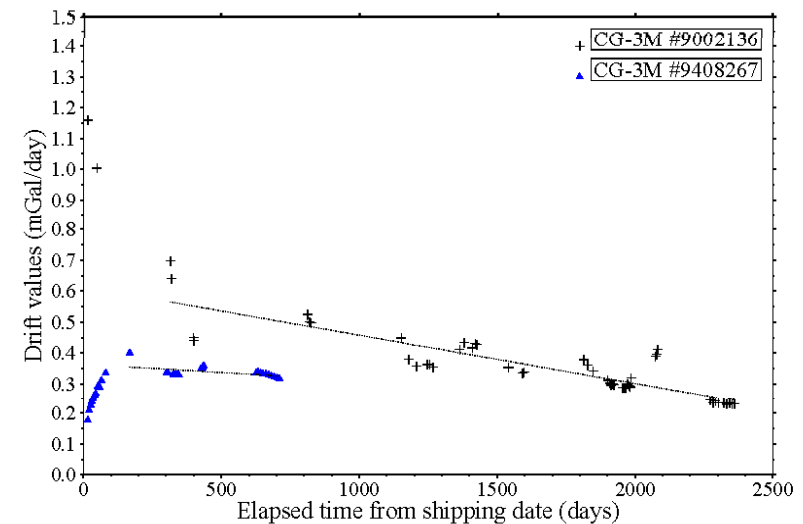
Bonvalot et al., GJI, 1998

Long term instrumental drift
(CG-3M #9002136 & #9408267)

a) Gravity values at base station



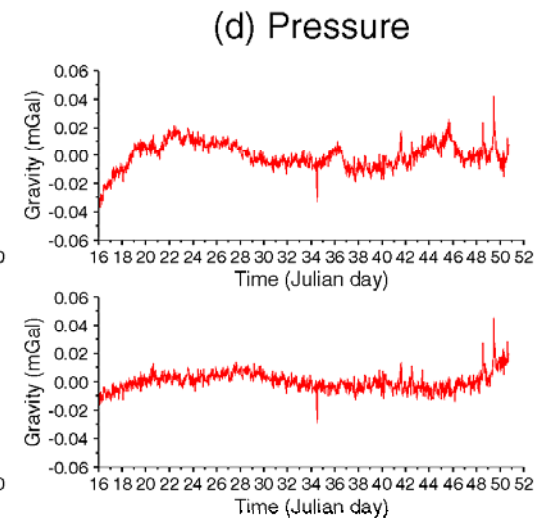
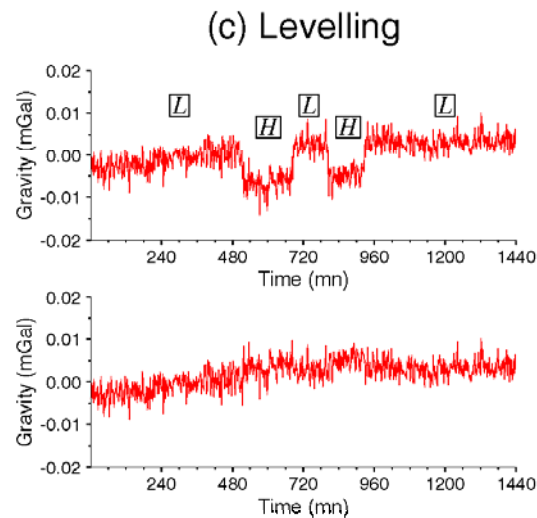
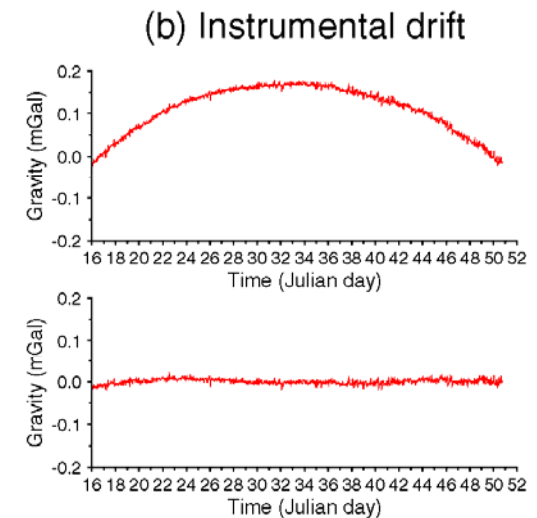
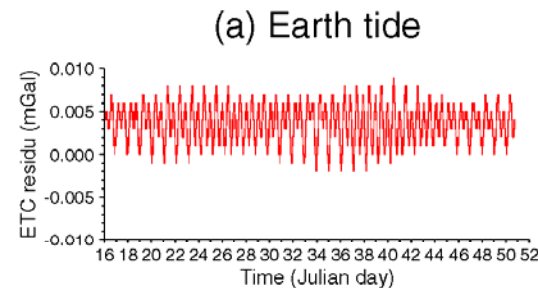
b) Computed drift values



Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

□ Réponses instrumentales

- Précision du modèle de marée
 - Longman (1979) vs. MT80 + paramètres locaux (ORB)
 - 5-10 μGal
- Dérive instrumentale
 - Linéaire < 1 semaine
 - Quadratique > 1 semaine
 - Ordres supérieurs > 1 mois
- Etude de sensibilité
 - Nivellement du gravimètre
 - Corrections de pression Atm.
 - Corrections d'inclinaison



Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

□ Réponses instrumentales

■ Analyse de séries temporelles

- Mise en évidence de corrélations spectrales Temp / Gravité et Tilt / PAtm (spectres d'énergie)
- Calcul des fonctions de transfert (cohérence, admittance, phase)

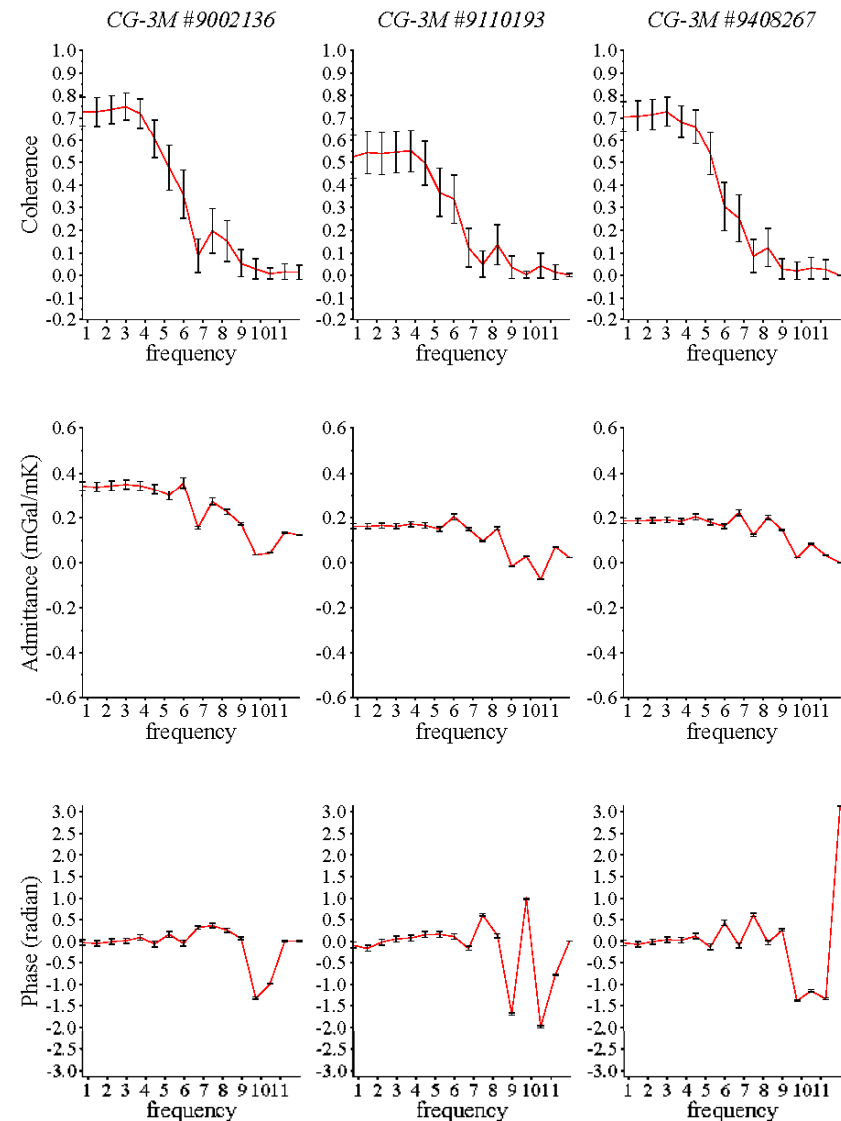
$$Z(f) = \frac{G(f).T^*(f)}{T(f).T^*(f)}$$

■ Corrections additionnelles (microgravimétrie)

- Temp / Gravité : 0.15 à 0.35 mGal / mK
- Tilts / Patm : 0.1 à 0.2 arc-sec / hPa

Traitements plus précis accessibles pour des mesures permanentes (approche multi-paramètres)

Temperature / Gravity spectral correlation



Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

□ Réponses instrumentales (étude de terrain)

CG3 hysteresis (après transport)

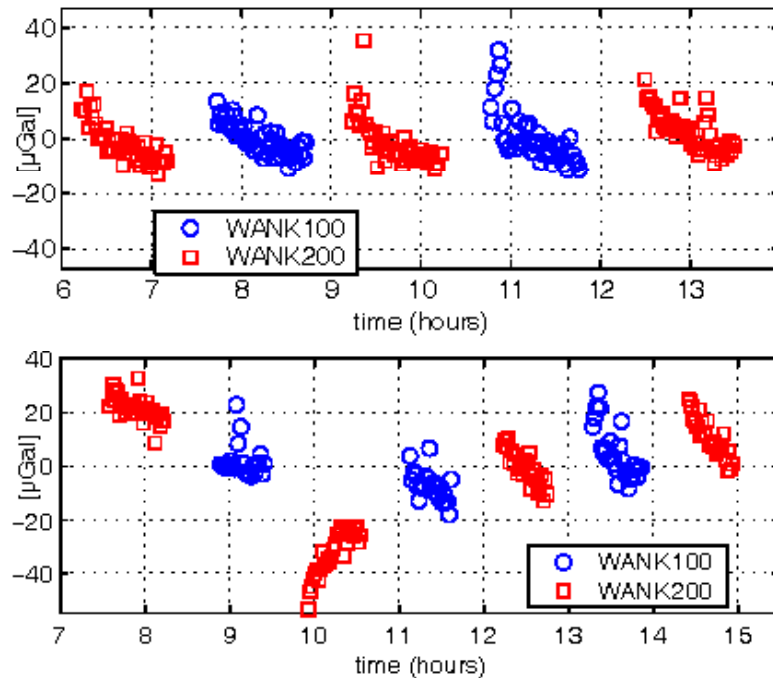
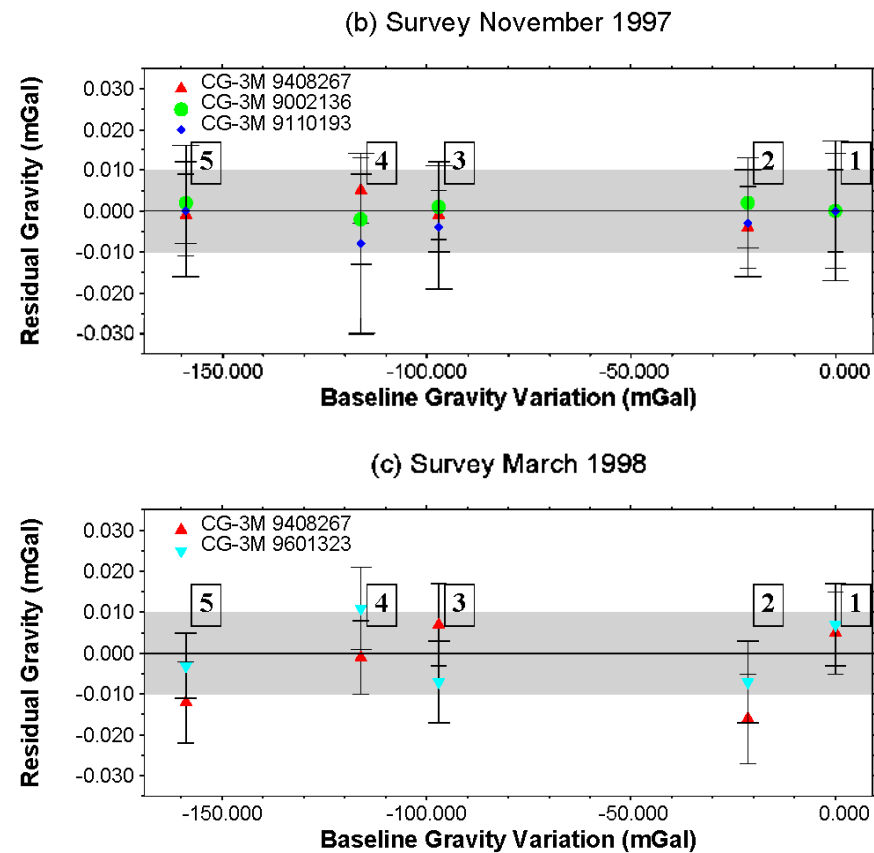


Fig. 3 CG3 hysteresis after transport. Each signature corresponds to a 60 sec observation set. Station occupation duration is 30 - 60 min (25 - 60 sets), and cable car transport between stations is about 25 min. Top: strong but homogeneous hysteresis, bottom: inhomogeneous hysteresis

J. Flury et al., (IAPG / IFE / BKG Germany)

Contrôle sur stations de référence
(Répétabilité / Etalonnage dans le temps)



Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

❑ Ex. de chaîne logicielle : CG3TOOL / CGXTOOL / MCGRAVI

- CG3TOOL (1996-2003): G. Gabalda, S. Bonvalot (IRD) → environnement Unix / OpenWin (SUN)
- CGXTOOL (2006): J. Beilin (IGN-LAREG) → environnement Windows / Linux (PC)

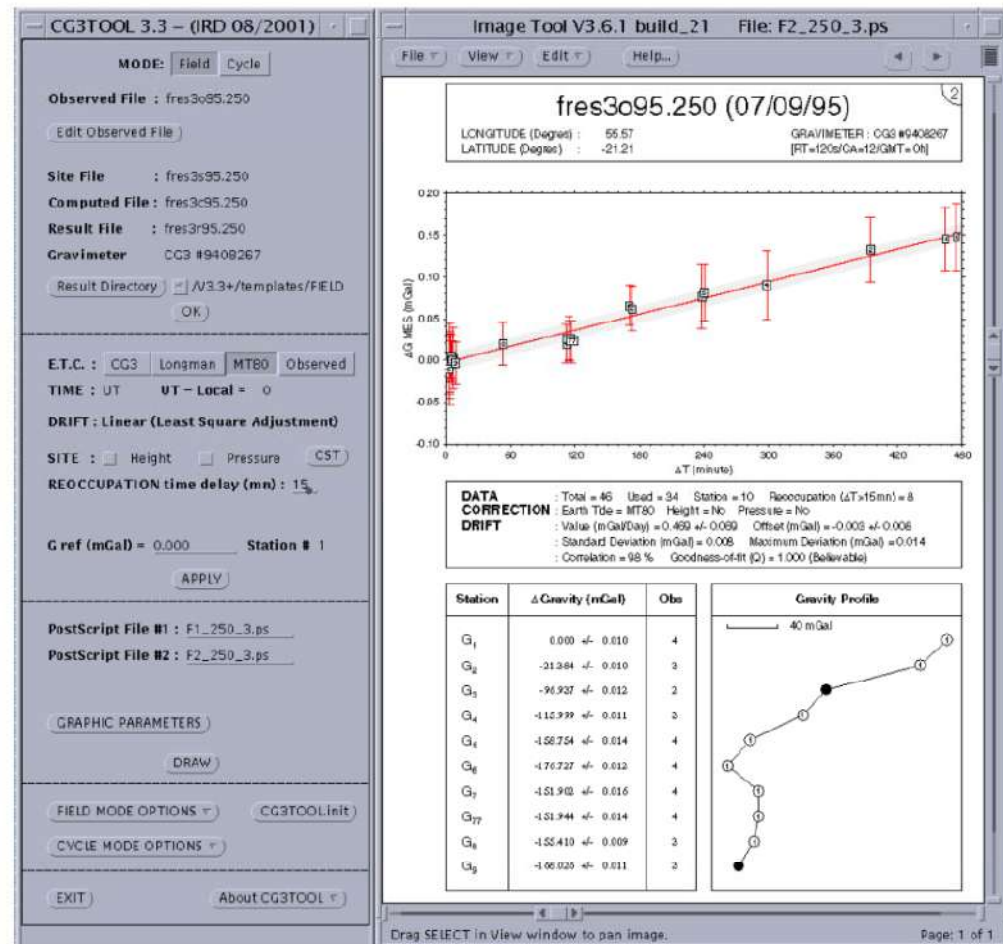
- ✓ Corrections gravimétriques temporelles (dérive, marée, Patm...)
- ✓ Ajustement de réseau
- ✓ Etalonnage des observations relatives
- ✓ Calcul de séries temporelles
- ✓ Calcul d'anomalies gravimétriques (corrections air libre, Bouguer)

Remarque :

Nombreuses chaînes de traitement existantes (scientifiques & commerciales)

- *Potential Field Package (USGS)*
- *BIPM*
- *Geosoft, Intrepid*

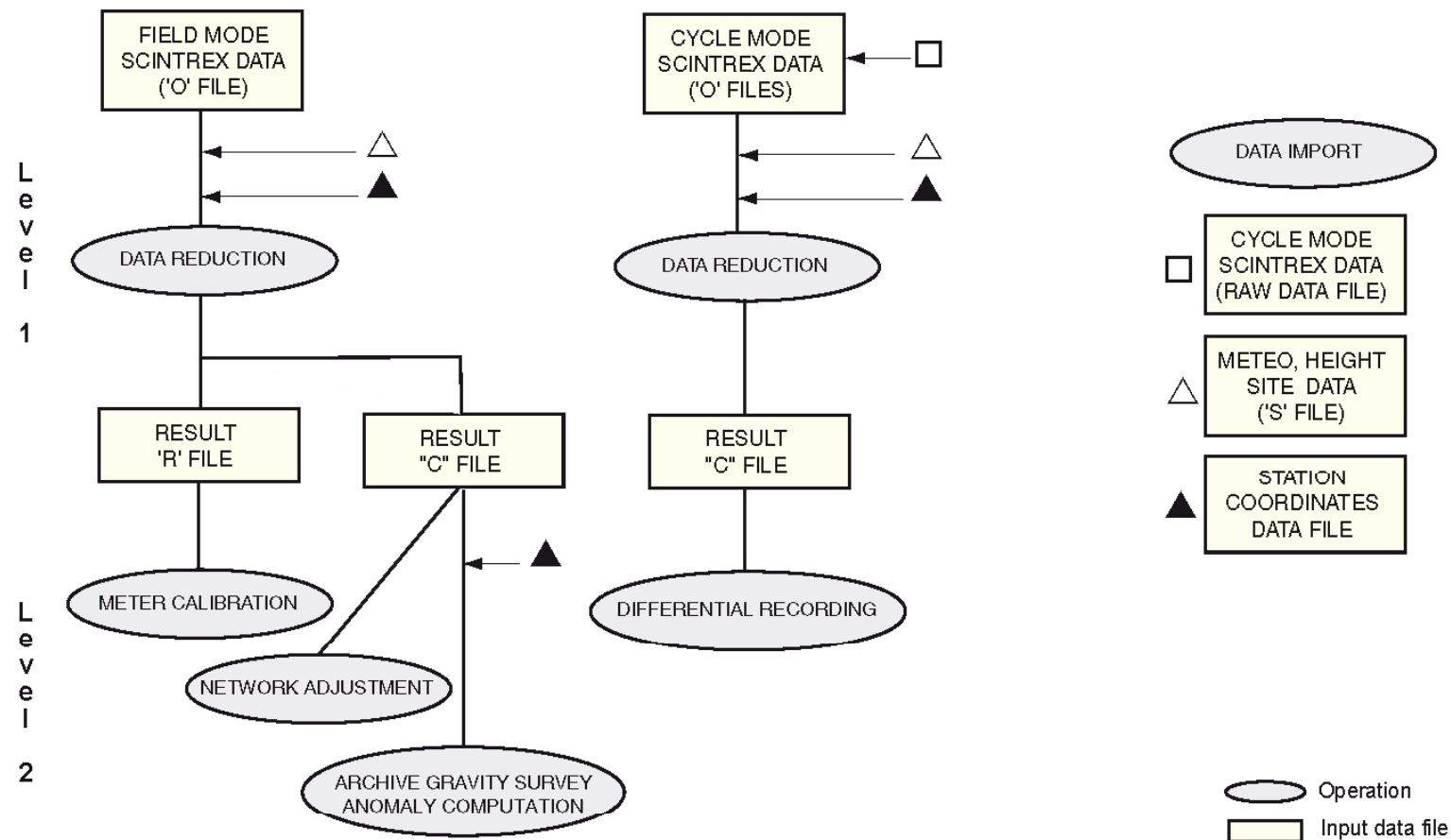
- ...



Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

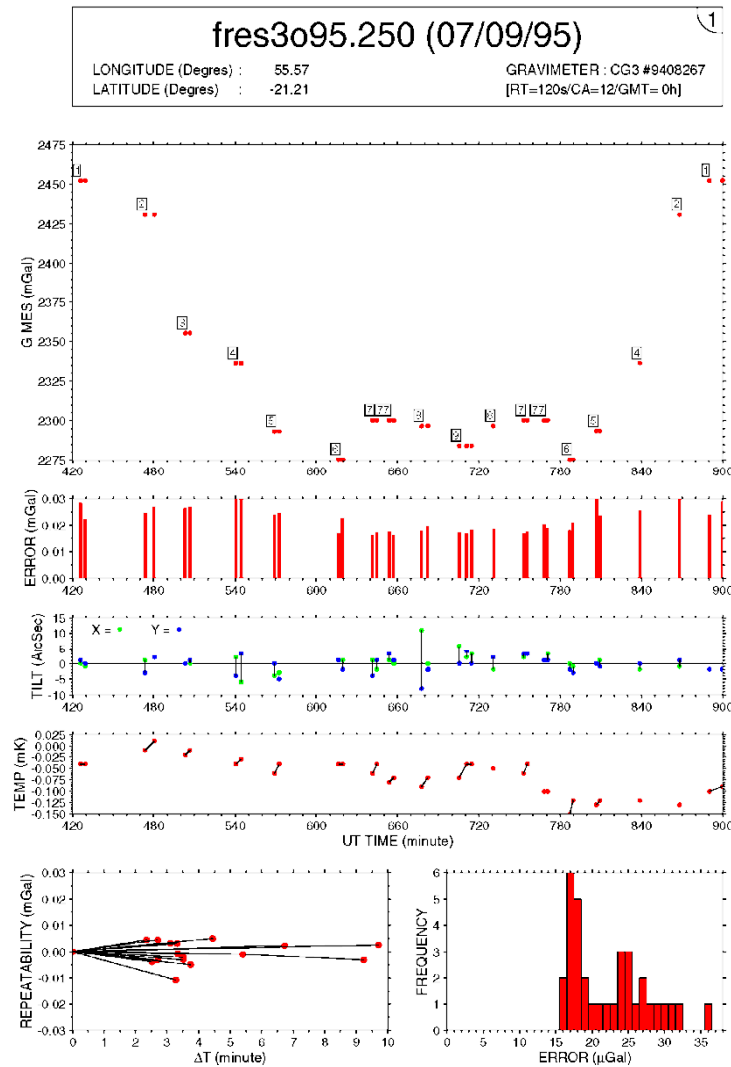
□ CG3TOOL / CGXTOOL : Principe des opérations

CG3TOOL : Simplified operations and main input data files



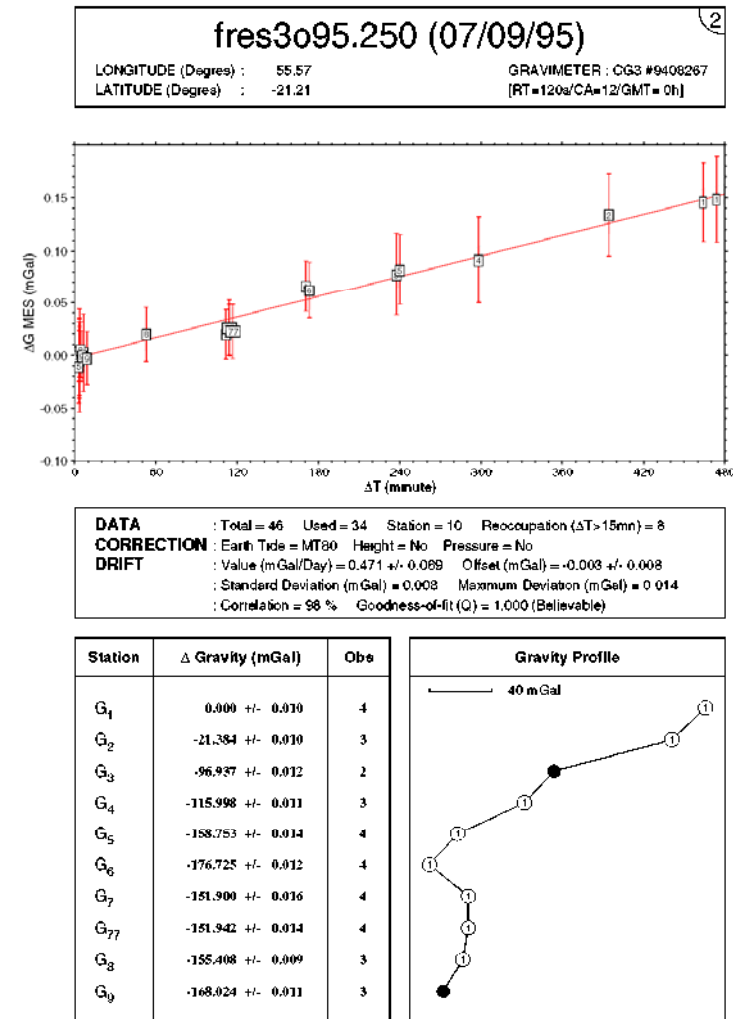
Traitement des mesures relatives (Scintrex CG3/CG5)

□ CG3TOOL / CGXTOOL : Réduction des mesures



CG3TOOL 3.1 08/11/2000

Figure 4A



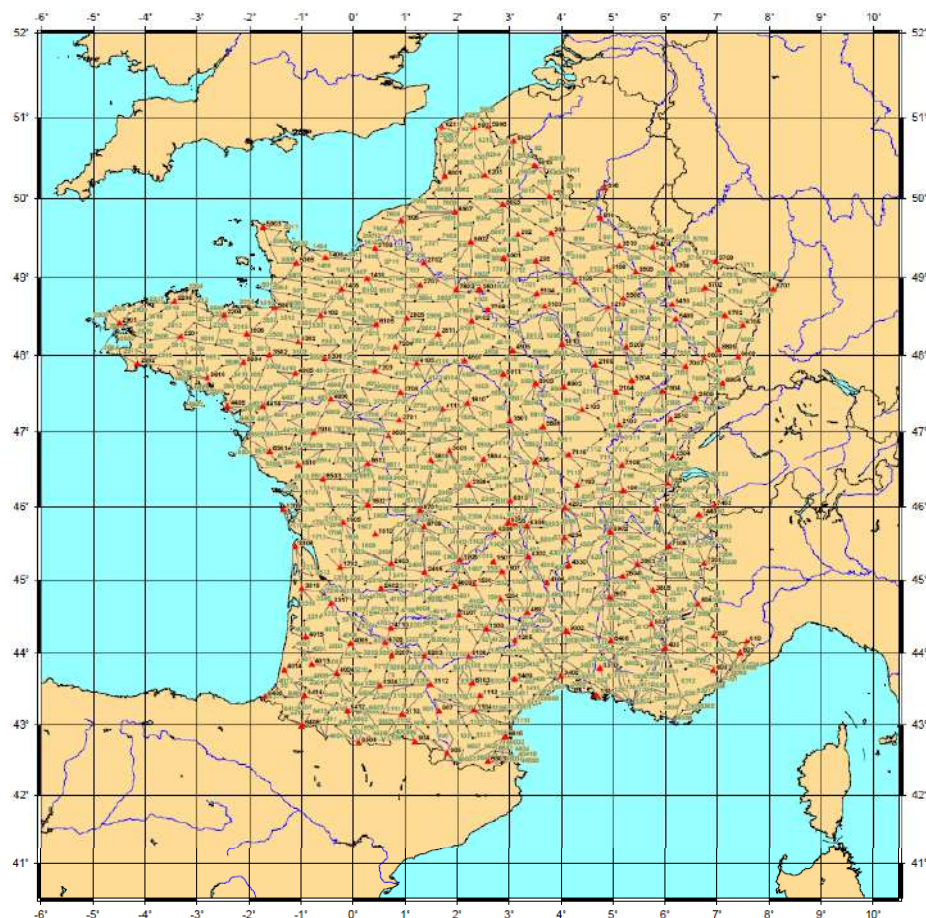
CG3TOOL 3.1 08/11/2000

Figure 4B

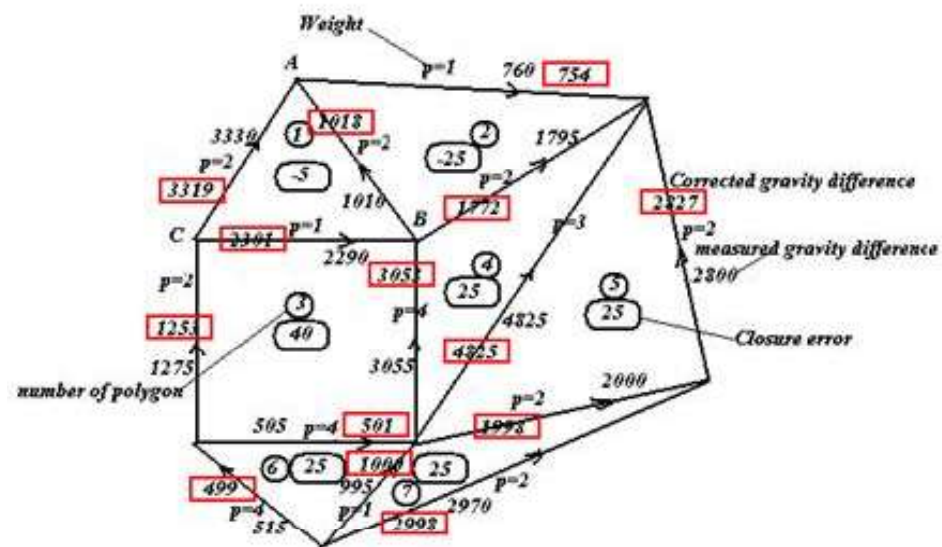
Ajustement de réseaux gravimétriques

□ Cas des levés statiques (levés de reconnaissance, réseaux)

- Densité / Redondance d'information (m stations, i observations, f instruments, k cheminements)
- Possibilités d'Ajustement / Recalage (stations absolues) des mesures relatives



Source : IGN France - SGN/LAREG (J. Beilin , F. Duquenne et al.)



http://www.idm.gov.vn/nguon_luc/Xuat_ban/2008/B31-32/b54_files/image010.jpg

Ajustement de réseaux gravimétriques

□ Principe (1/2)

▪ Equation d'observation $(1 + C_f) \times g_i = G_m + (a_k + b_k \times t) + \varepsilon_i$

g_i : gravité mesurée (observation i au temps t)

G_m : gravité ajustée à la station m

$(1+C_f)$: facteur d'échelle du gravimètre f (par rapport au gravimètre de référence)
($C_f=0$ pour l'instrument de reference)

a_k, b_k : Constante et terme linéaire décrivant la dérive instrumentale du cheminement k

ε_i : Résidu défini comme la difference entre la valeur de g corrigée de la dérive (observation i) et la valeur ajustée G_m pour la station m.

▪ Equation généralisée

Quantités : N observations (i), M stations (m), K cheminement (k), F gravity meters (f)

Poids : w_i , sur chaque observation i

$$w_i g_i = \sum_{m=1}^M (\alpha_{im} \times w_i) \times G_m + \sum_{k=1}^K (\beta_{ik} \times w_i) \times a_k + \sum_{k=1}^K (\beta_{ik} \times w_i \times t_i) \times b_k - \sum_{f=1}^F (\gamma_{if} \times w_i \times g_i) \times C_f + w_i \times \varepsilon_i$$

$\alpha_{im} = 1$ si i^{ème} observation pour la station m ; $\beta_{ik} = 1$ si i^{ème} observation pour le cheminement k

$\gamma_{if} = 1$ si i^{ème} observation pour l'instrument f (sinon, α, β et $\gamma = 0$).

Ajustement de réseaux gravimétriques

□ Principe (2/2)

- Série d'équations (écriture matricielle) formant un système linéaire: $y = Gx + \varepsilon$

y : vecteur de n observations ; x : vecteur de u unknowns (G_m, a_k, b_k, C_f);

G : matrice $n \times u$ reliant observation aux inconnues

Variance :

$$\sum_{i=1}^M (w_i \times \varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^M \left[w_i \times g_i - \sum_{m=1}^M (w_i \times \alpha_{im} \times G_m) - \sum_{k=1}^K (w_i \times \beta_{ik} \times a_k) - \sum_{k=1}^K (w_i \times \beta_{ik} \times b_k \times t_i) + \sum_{f=1}^F (w_i \times \gamma_{if} \times C_f \times g_i) \right]^2$$

Résolution d'un système d'équation linéaire / Minimisation par méthode des moindres carrés

“rms error” de l'ajustement de N observations:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}$$

Ajustement de réseaux gravimétriques

❑ Exemple : Programme MCGRAVI (J. Beilin, IGN LAREG)

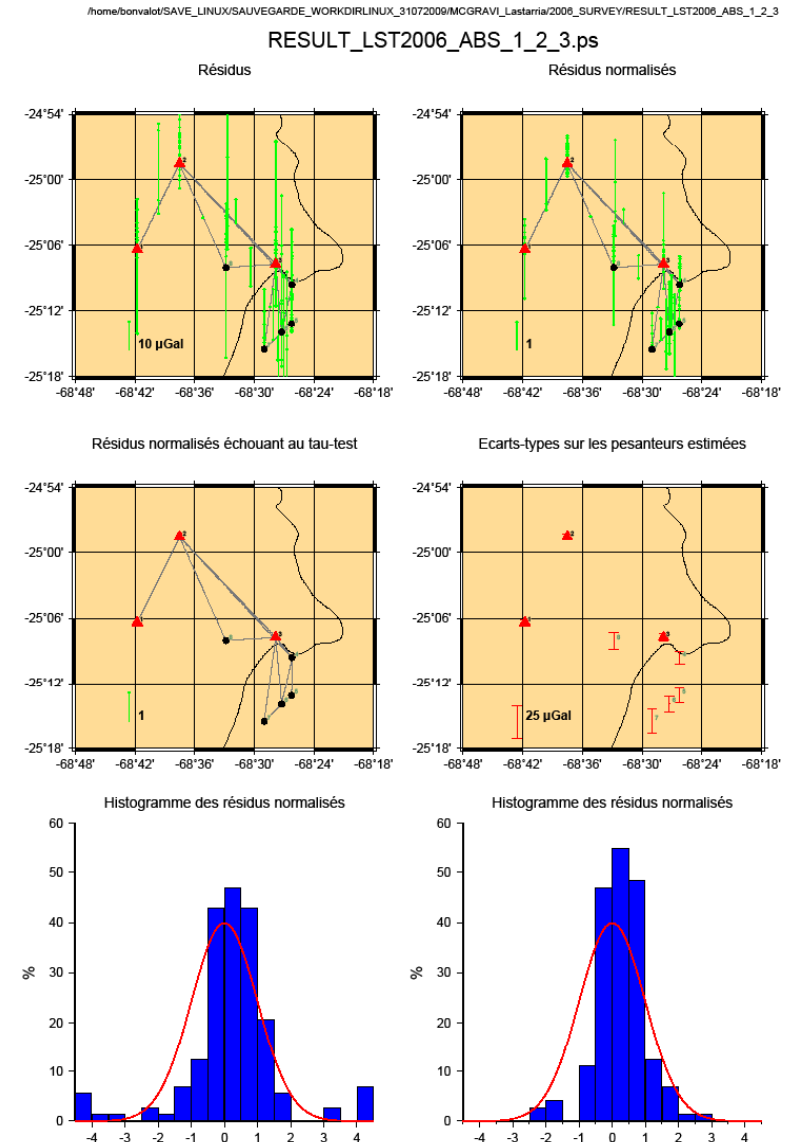
- Application Fortran 1990 / Linux / PC
- Fichier directeur (options, poids...)

Fichiers entrée

- Fichiers d'observations relative (Scintrex) (données corrigées de la marée)
- Fichiers d'observations absolues (FG5/A10)
- Fichier de coordonnées de stations

Fichiers sortie

- Page HTML
- Plots et Shell Script
- Fichiers résultats (données ajustées et recalées sur stations absolues)



Gravimètres absolus FG5 /A10



FG-5 meter
Laboratory gravity meter



A-10 meter
Field gravity meter

Gravimètres absolus FG5 /A10

□ Main FG5 and A10 specifications

- “Portable” or “transportable” absolute meters
- No drifts or tares
- Accuracy (observed agreement between instruments)
 - FG5: 2 μGal
 - A10 : 5 to 10 μGal
- Operating dynamic range: World-Wide
- Operating temperature range:
 - FG5: -15°C to 30°C
 - A10 : -30°C to 49°C



Source : Micro-g LaCoste

Potential Interest for both laboratory & field measurements

(Source : Micro-g LaCoste)

Gravimètres absolus FG5 /A10

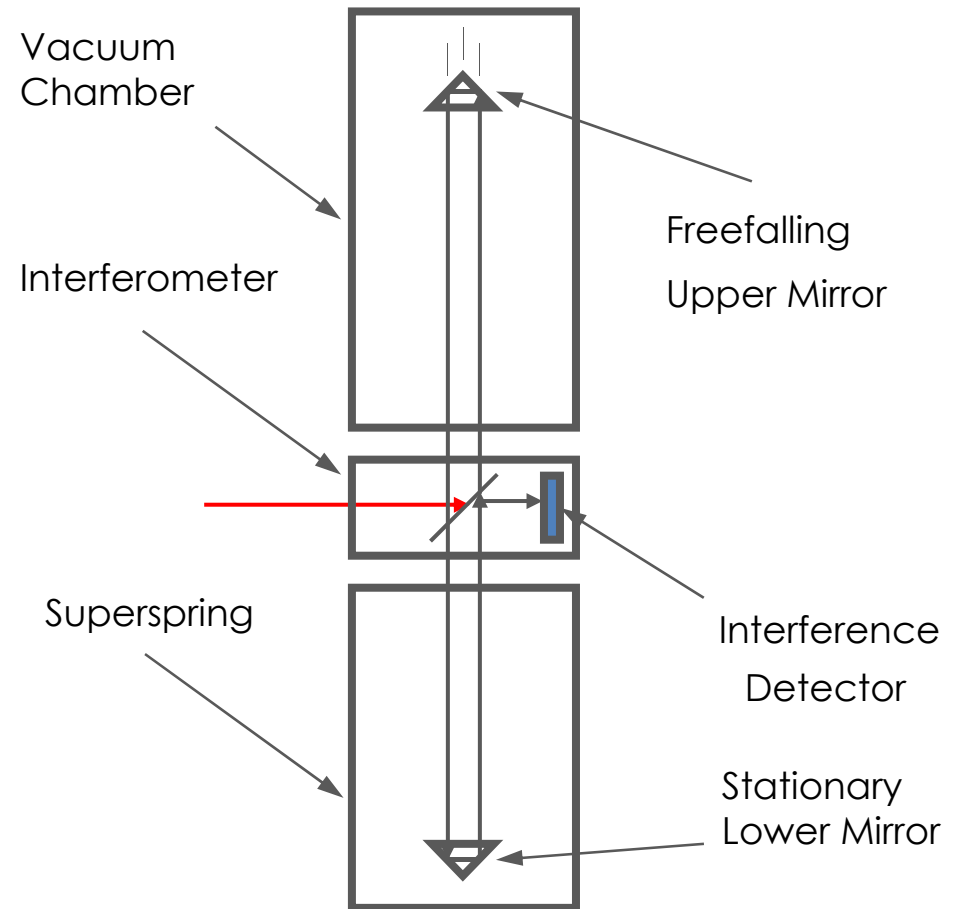
□ Principles

A freely falling reflective test mass is dropped in a vacuum

This causes optical fringes to be detected at the output of an interferometer

This signal is used to determine the local gravitational acceleration

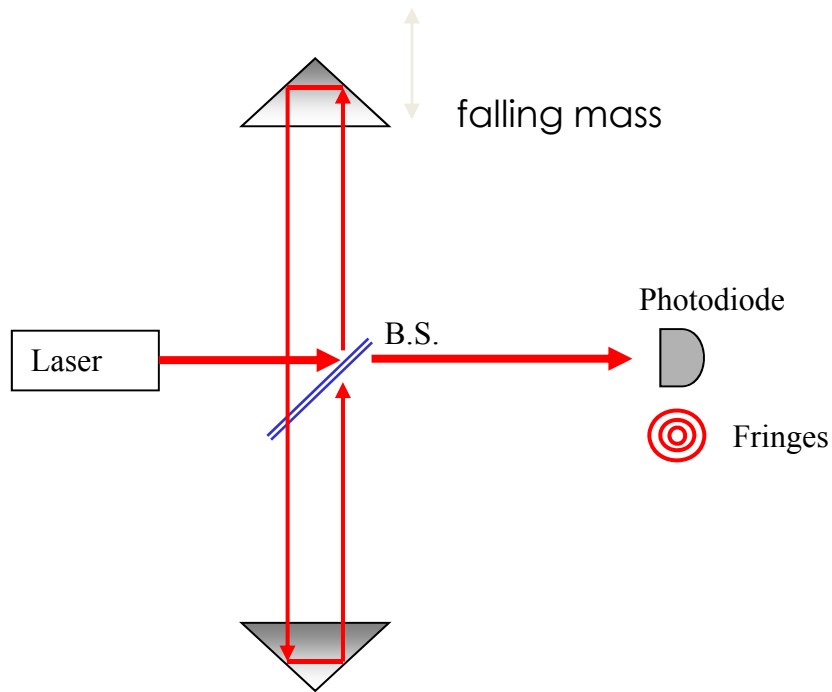
Principle is quite simple, but requires precise measurements of length (laser interferometer) and time (atomic clock) : FG5 free fall : 20 cm in 0,1 ns



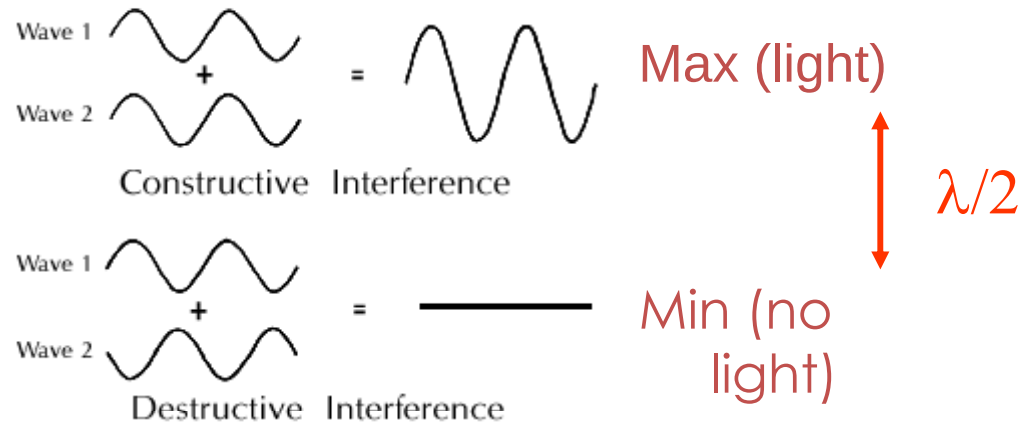
(Source : Micro-g LaCoste)

Gravimètres absolus FG5 /A10

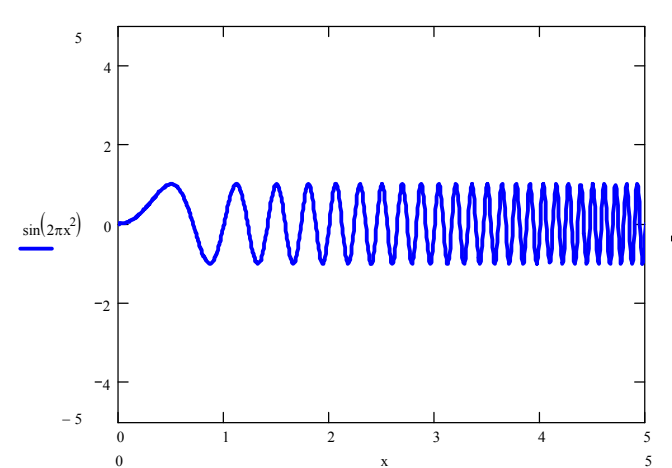
❑ Interferometer



(Michelson interferometer)



fringe signal sweeps in frequency as test mass falls under influence of gravity



time recorded (w.r.t. rubidium oscillator) at each minimum creating (t,d) pairs at every $\lambda/2$

(Source : Micro-g LaCoste)

□ Determination of g value

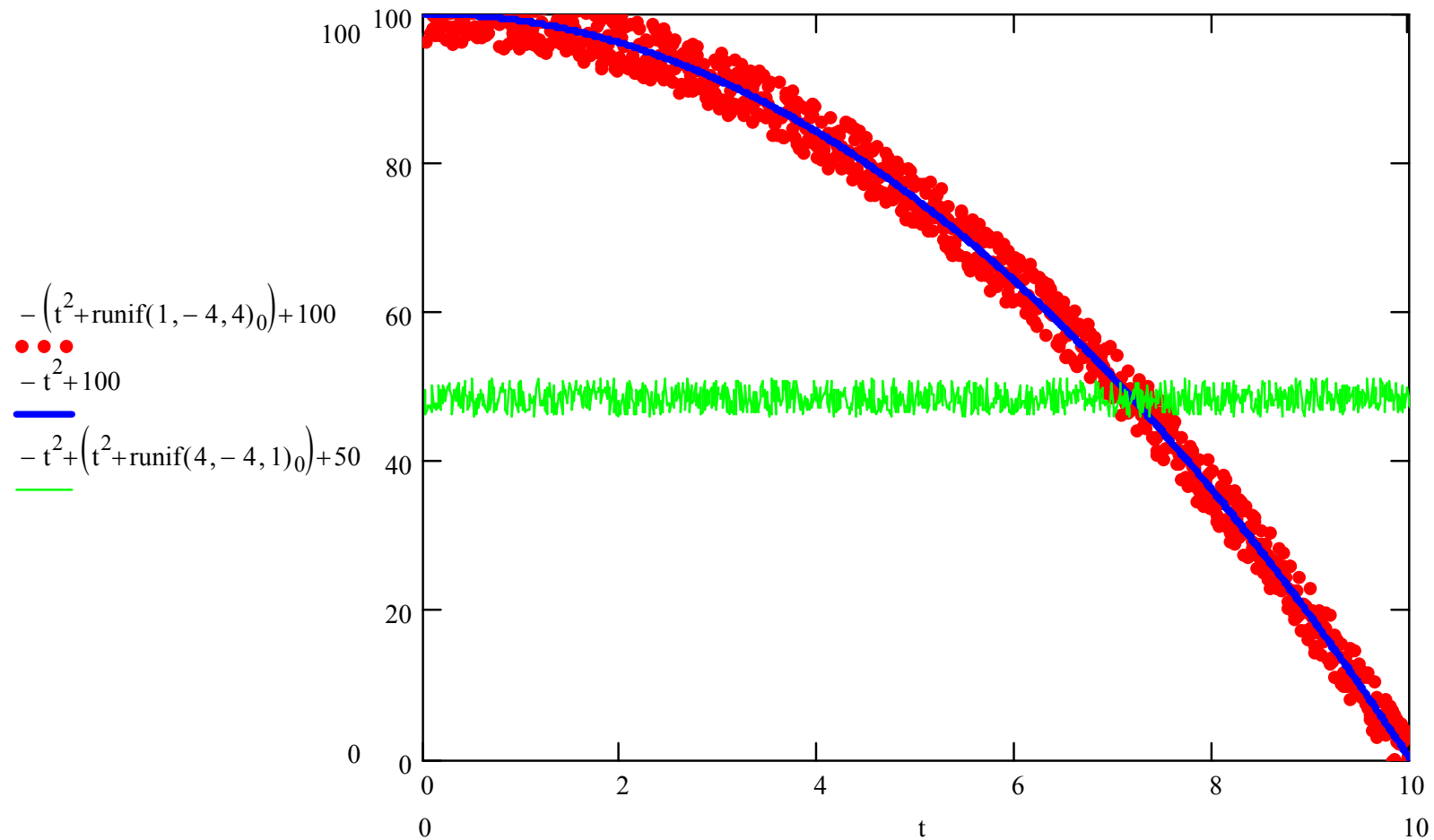
- Fringe = $l/2 \mathbf{x}_i$
- For each $\mathbf{x}_i$, a measured time $\mathbf{t}_i$
- The following function is fitted to the data $\mathbf{x}_i, \mathbf{t}_i$:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = x_0 + v_0 \tilde{t} + \frac{g_0 \tilde{t}^2}{2} + \frac{\gamma x_0 \tilde{t}^2}{2} + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{t}^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{t}^4 \\ \tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c} \end{array} \right\} x_i, t_i, i = 1, \dots, 250$$

- γ is the vertical gravity gradient ($\sim 3 \mu\text{Gal/cm}$),
- c the speed of light
- x_0 the initial position
- v_0 the initial velocity
- g_0 the initial acceleration

Gravimètres absolus FG5 /A10

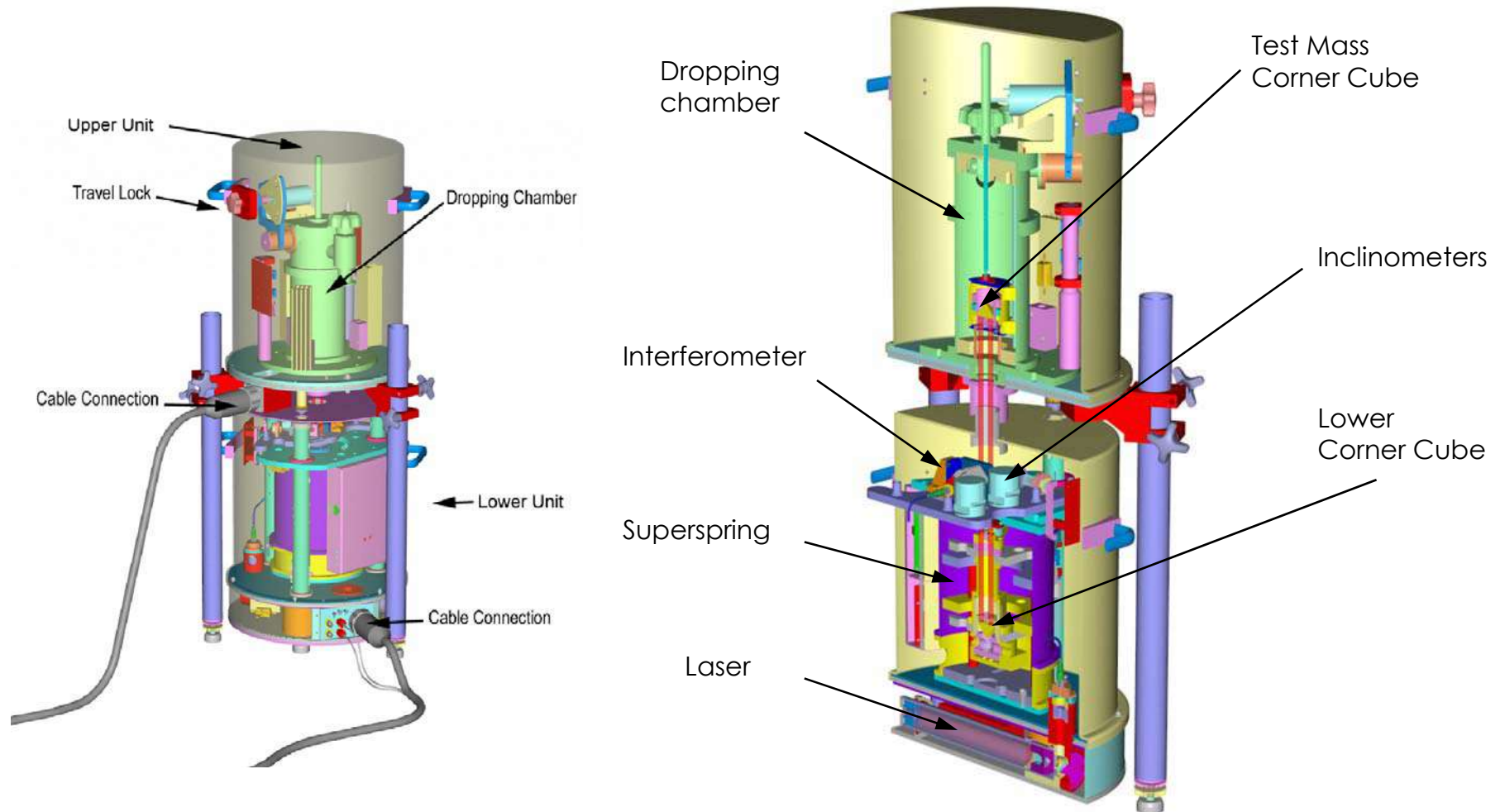
□ Fitting trajectory



(Source : Micro-g LaCoste)

Gravimètres absolus FG5 /A10

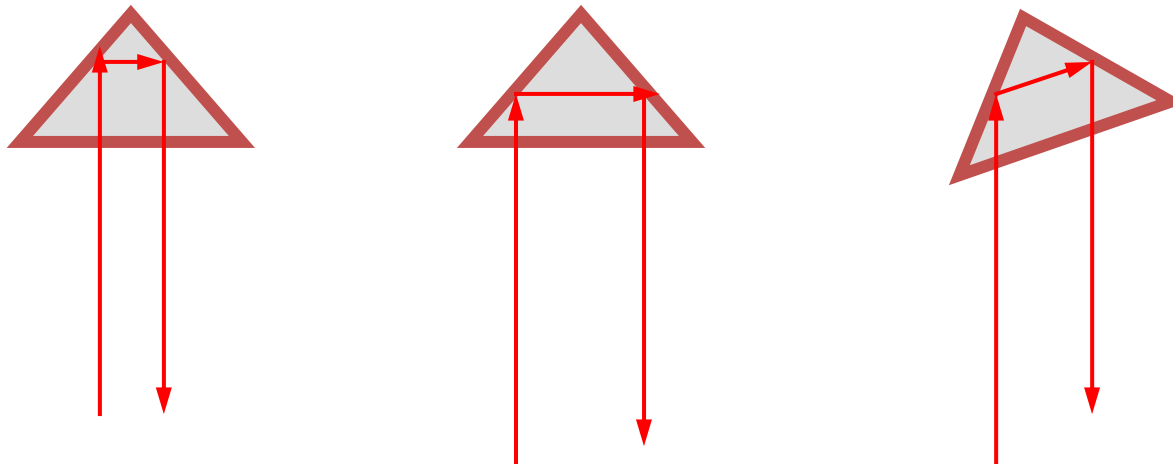
❑ A10 components



(Source : Micro-g LaCoste)

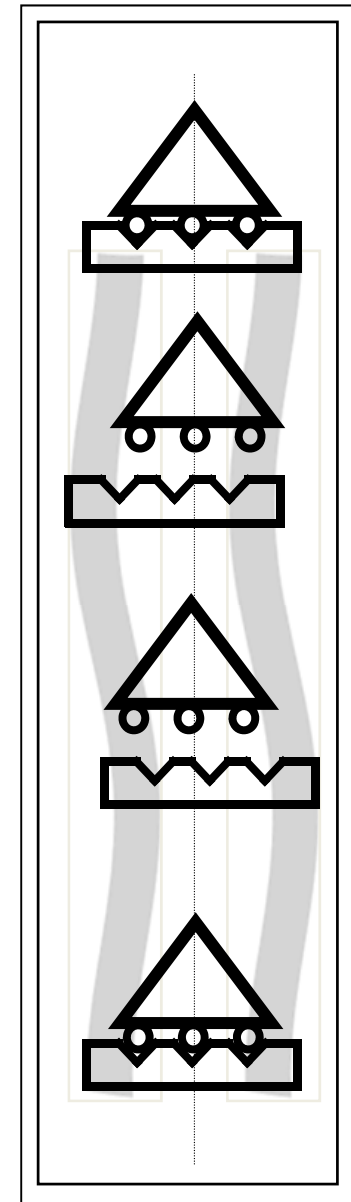
□ Proof mass : Corner cube reflectors

- Reflected ray parallel to input ray
- No phase change in wavefronts



Insensitive to translation and rotation

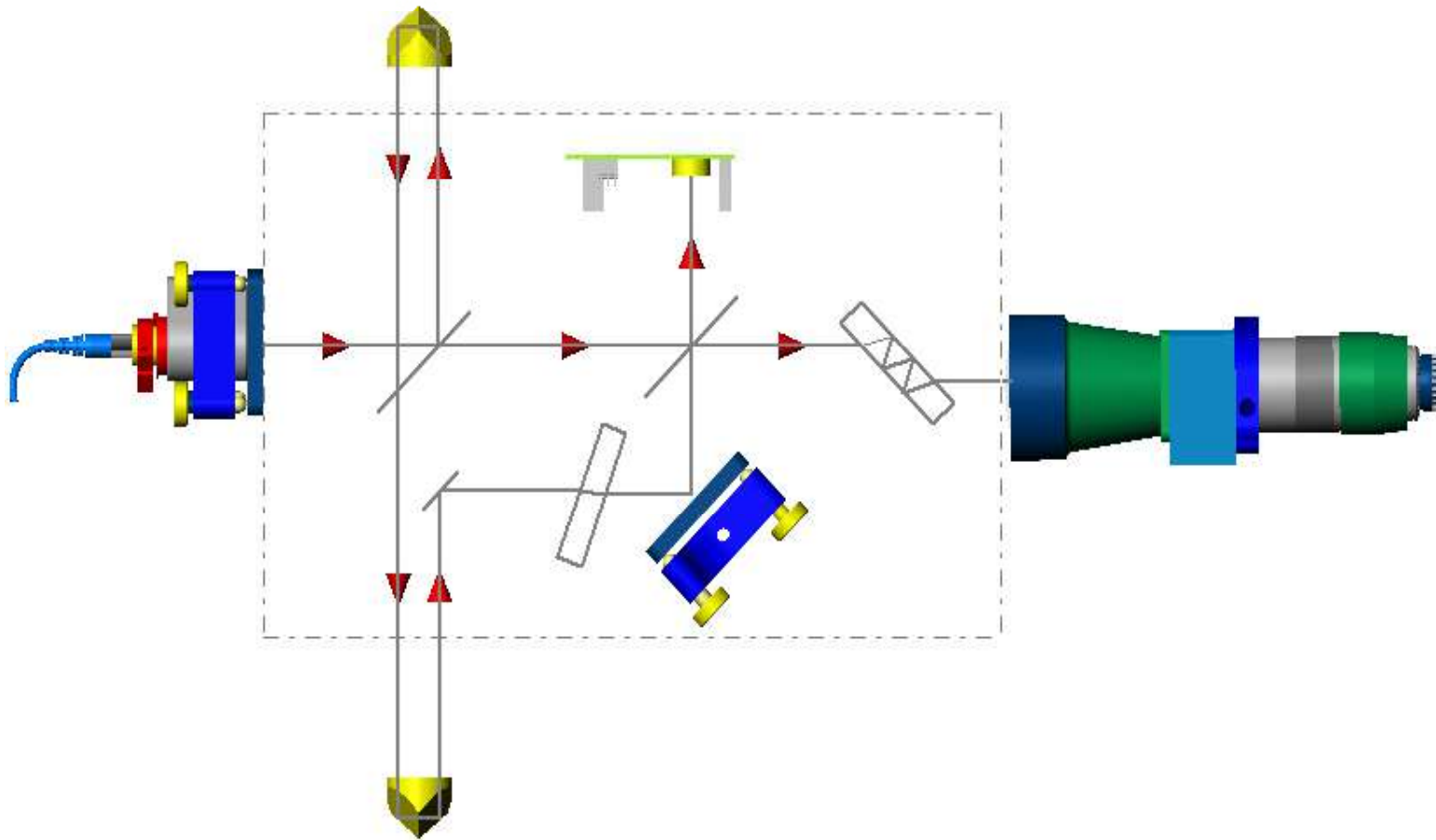
Used in both Dropping test mass and Stationary mass



(Source : Micro-g LaCoste)

Gravimètres absolus FG5 /A10

❑ Interferometer: complete laser trajectory

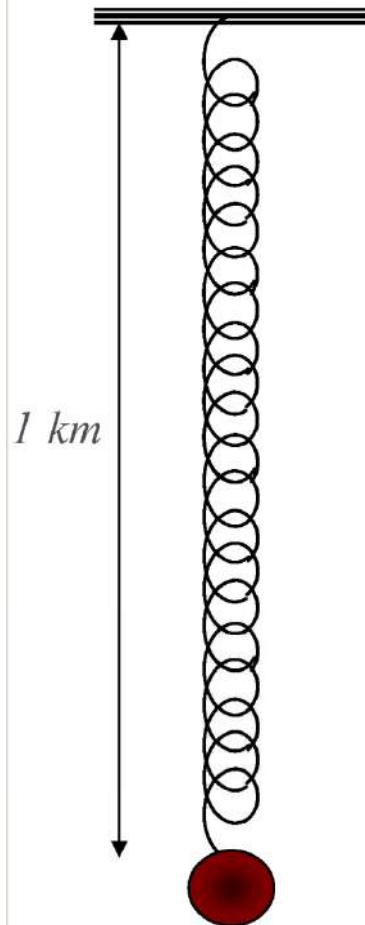


(Source : Micro-g LaCoste)

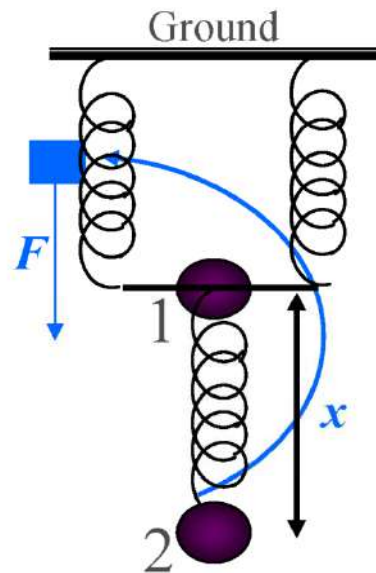
Gravimètres absolus FG5 /A10

❑ **Super Spring** (Long period ($T=60$ sec) seismometer)

Passive Spring (60s $\Rightarrow$ 1km)



Active Spring Concept

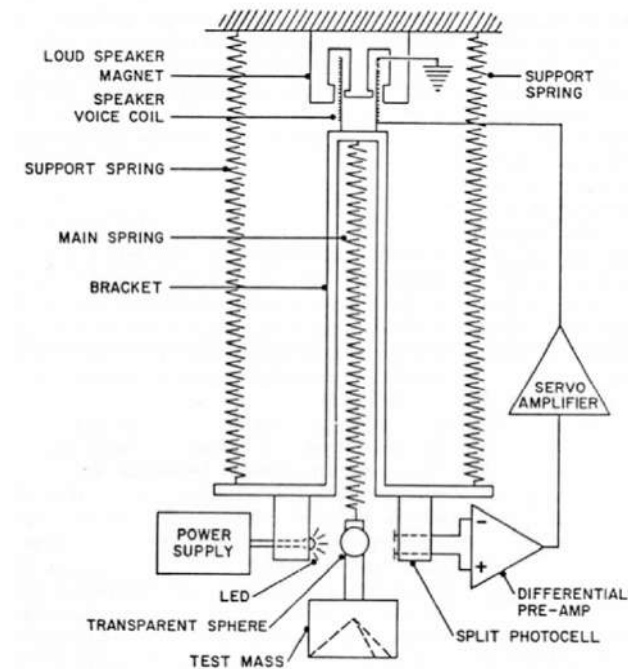


Practical Realization

▲ Nested Spring System

▲ free period ~ 60 s

▲ Height: 30cm



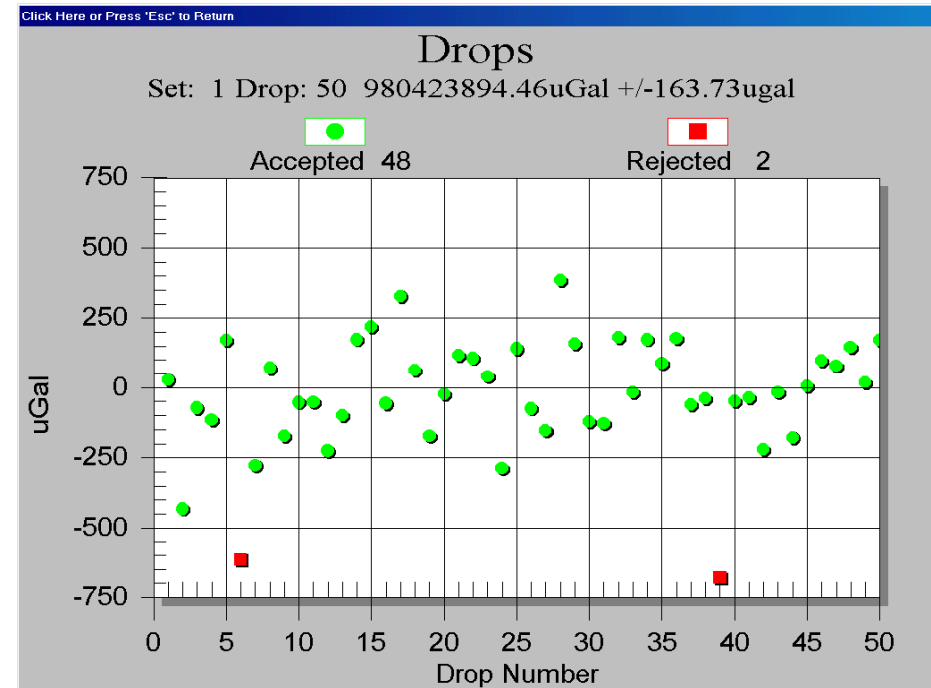
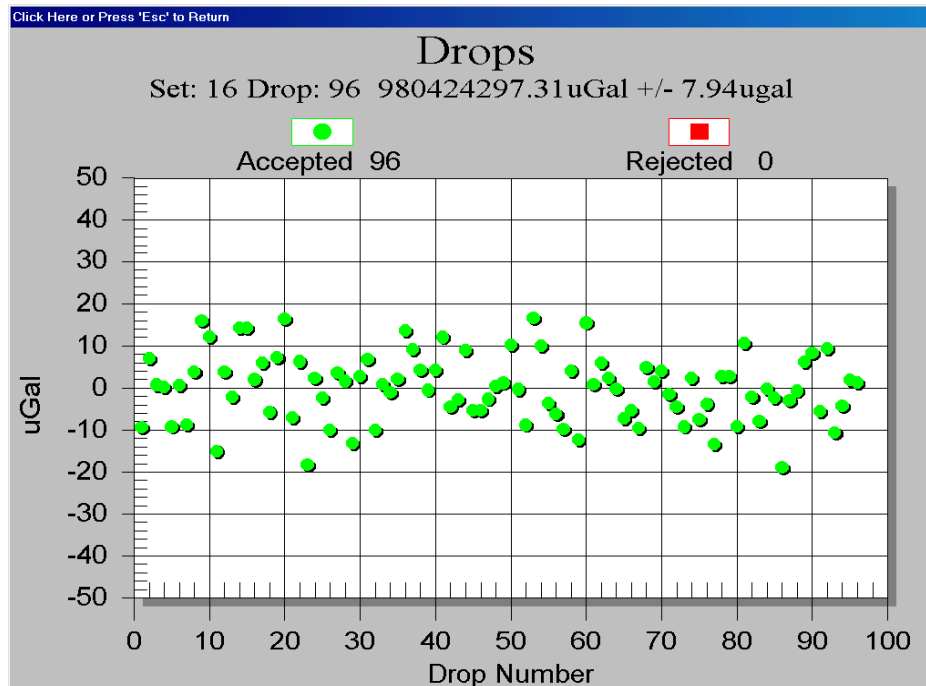
Isolate reference corner cube from microseismic noise

(Source : Micro-g LaCoste)

Gravimètres absolus FG5 /A10

❑ Super Spring contribution

WITHOUT
(set scatter +/-160μGal)

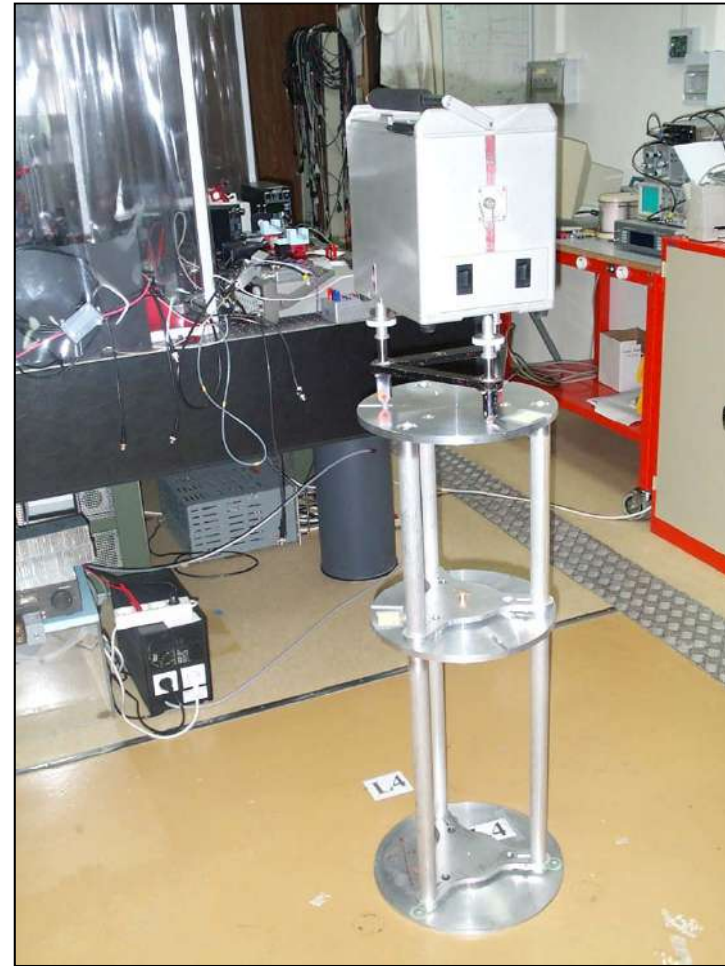


WITH
(set scatter +/- 8μGal)

(Source : Micro-g LaCoste)

Mesures du gradient vertical (gravimètres Scintrex)

- **Motion Equation** : γ is the vertical gravity gradient
- **Gravity reduction** : from meter to a reference point (ground)



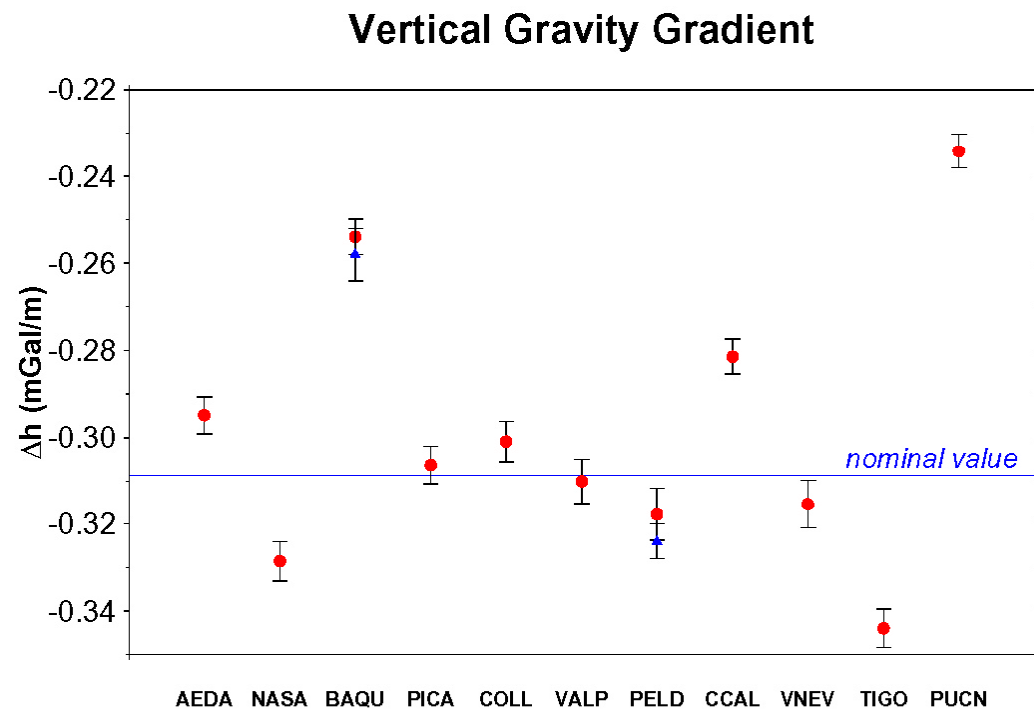
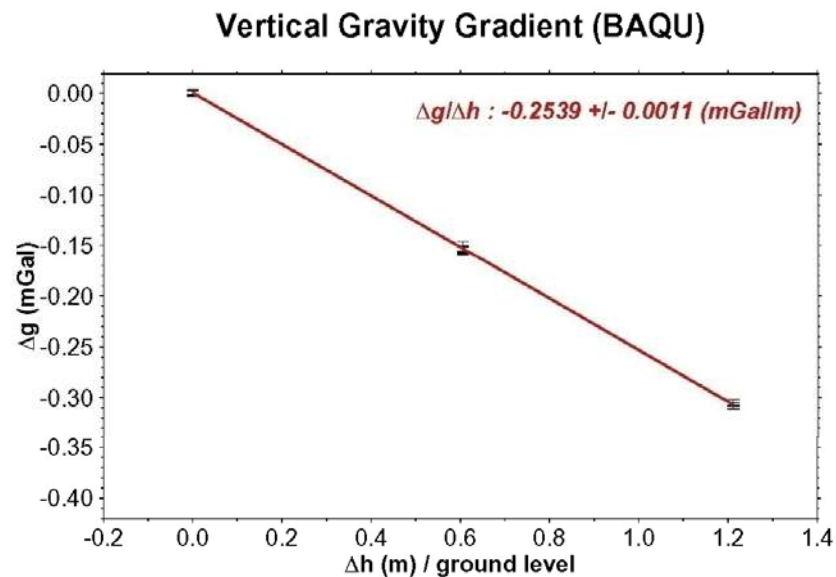
Mesures du gradient vertical (gravimètres Scintrex)

❑ Mesures annexes (relatives) : gradient vertical de pesanteur



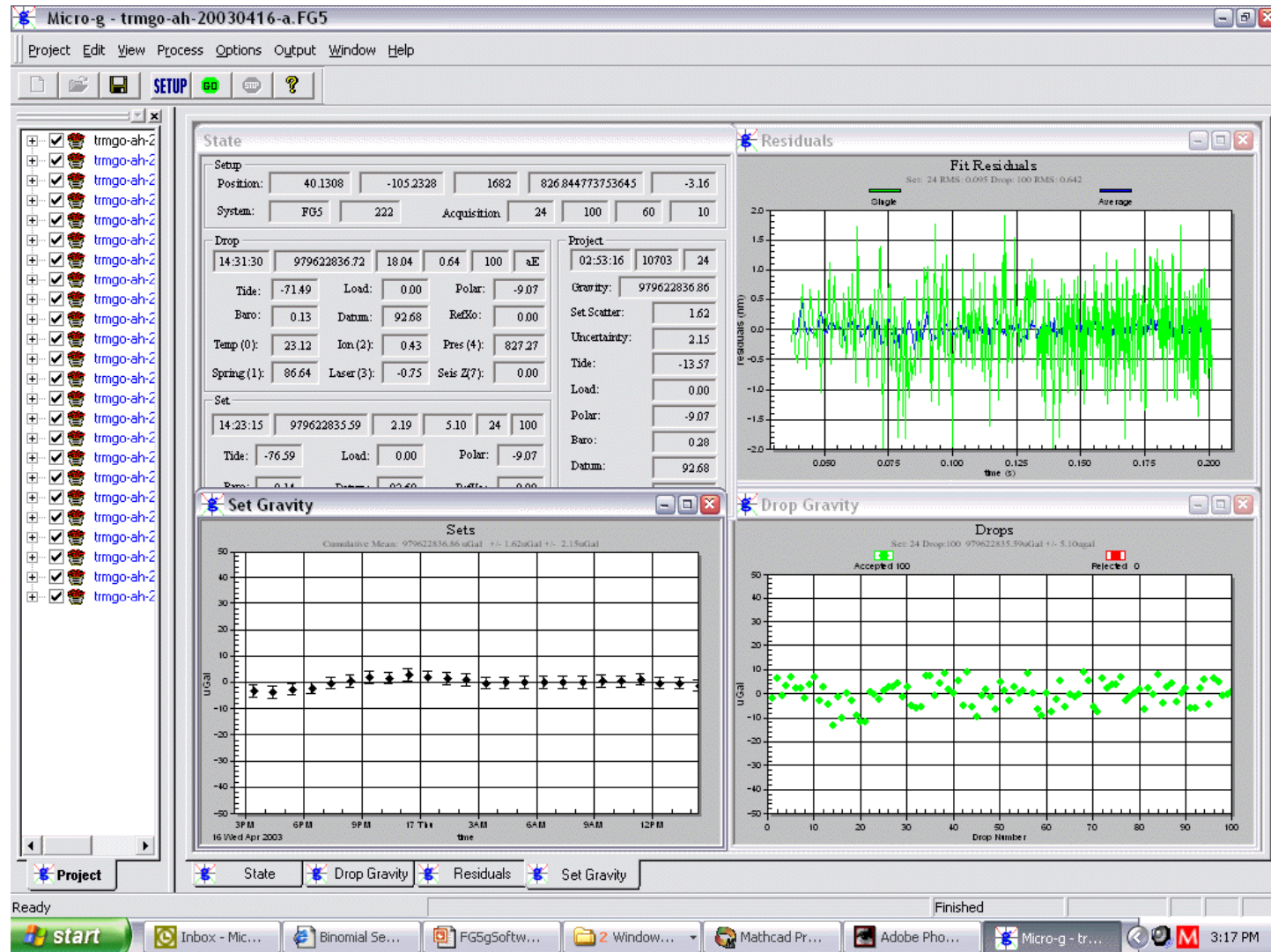
Mesures du gradient vertical (gravimètres Scintrex)

□ Examples of vertical gravity gradient determinations



Traitement des mesures absolues

❑ Data acquisition and processing (Micro-g “g” software)



Windows
Based
Graphics
package

Gravity
corrections

Statistical
analysis

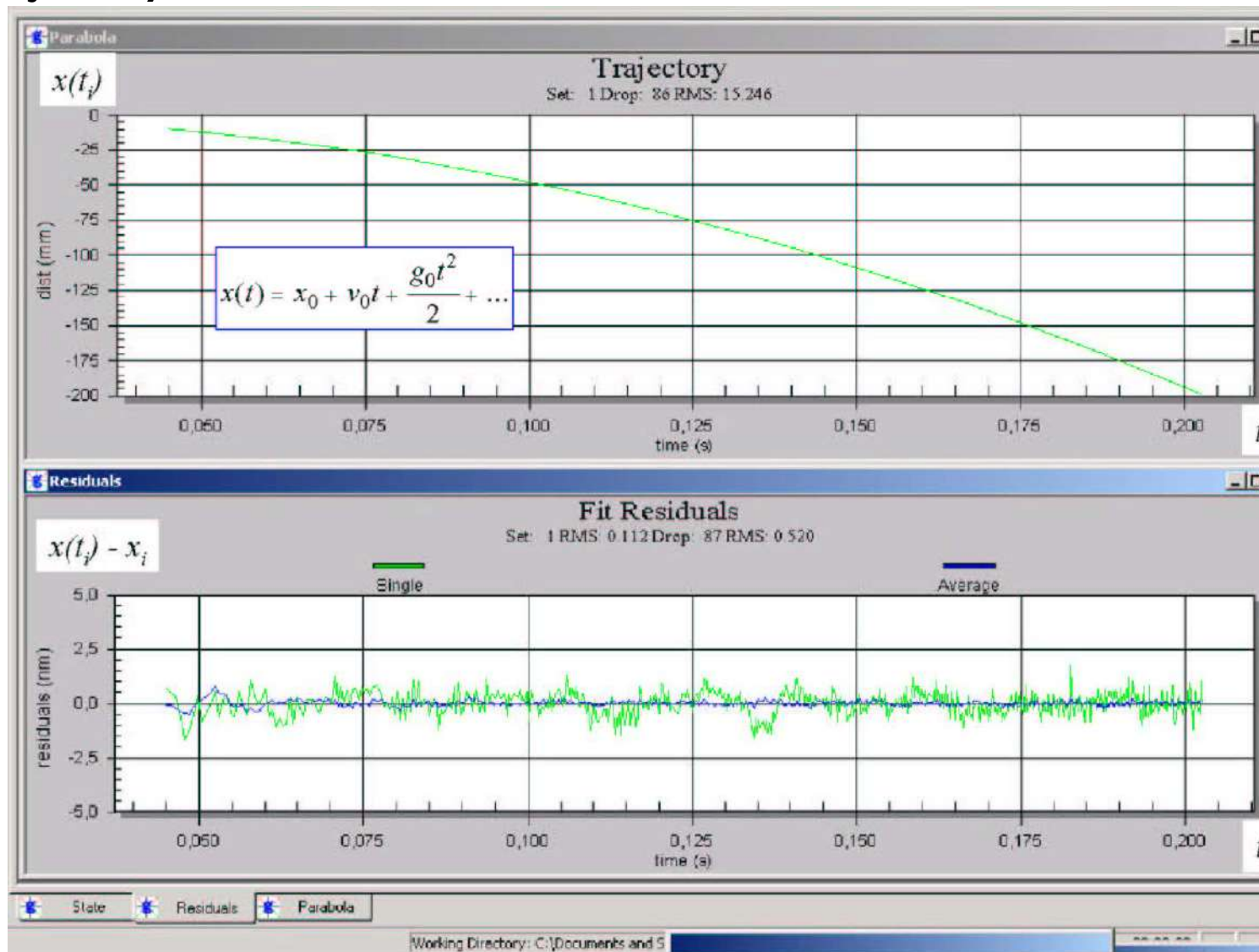
Real time data
acquisition

Post
processing

(Source : Micro-g LaCoste)

Traitement des mesures absolues

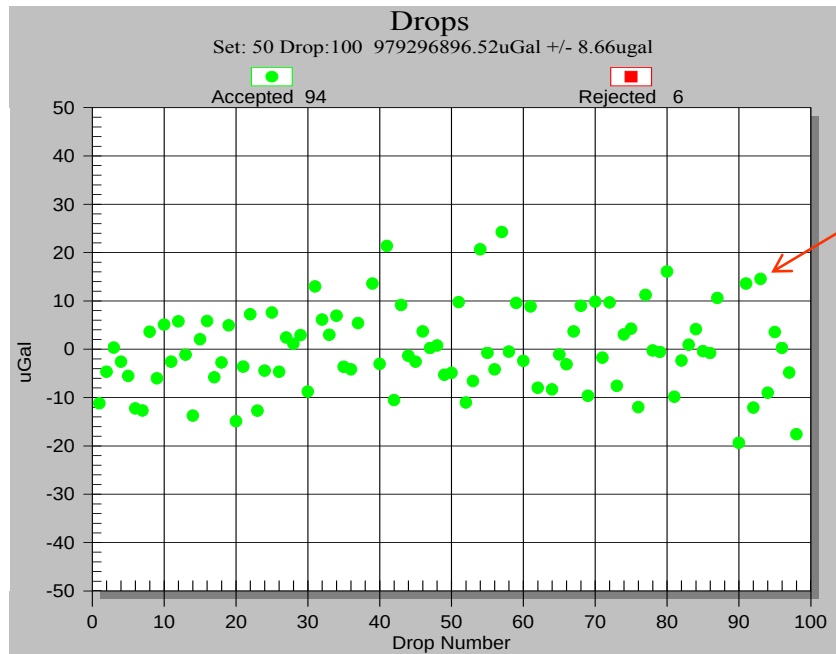
□ Trajectory / Fit residuals



(Source : Micro-g LaCoste)

Traitement des mesures absolues

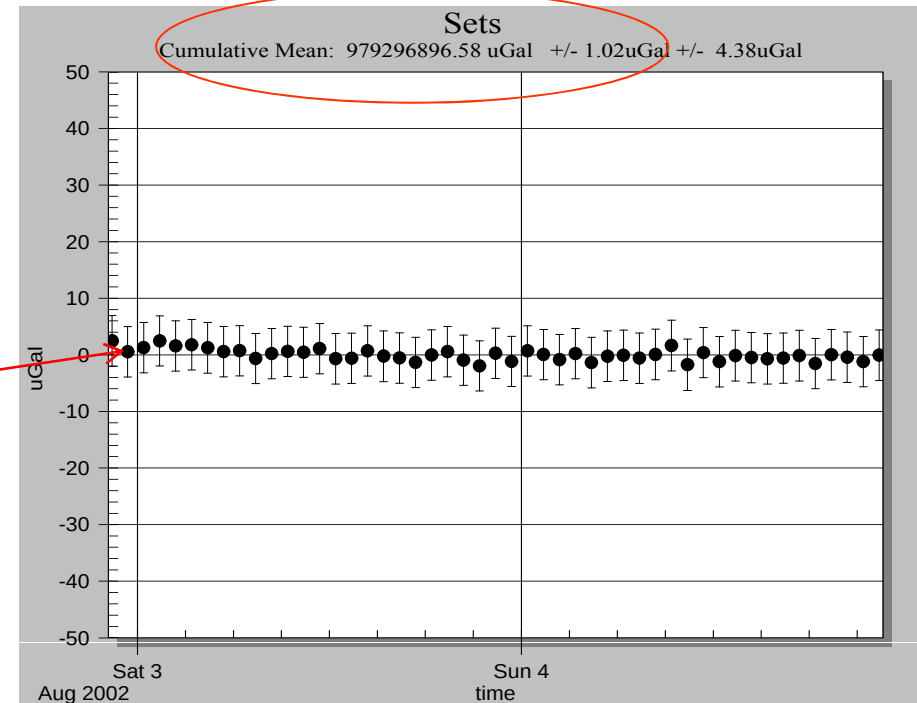
Local gravity value average from series of sets



1 drop

**Final gravity value
(cummulative mean of m sets)**

**1 set
(averaged from n drops)**



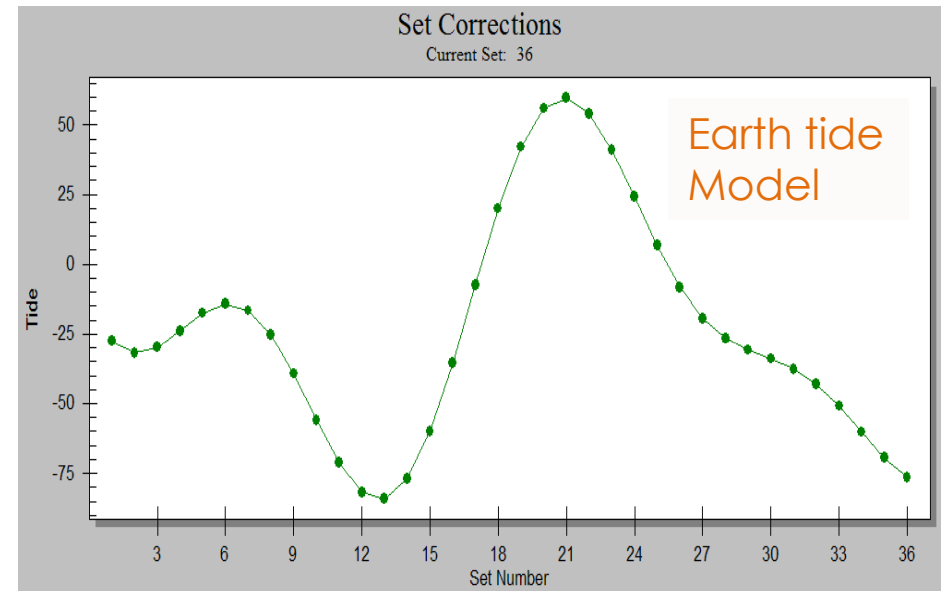
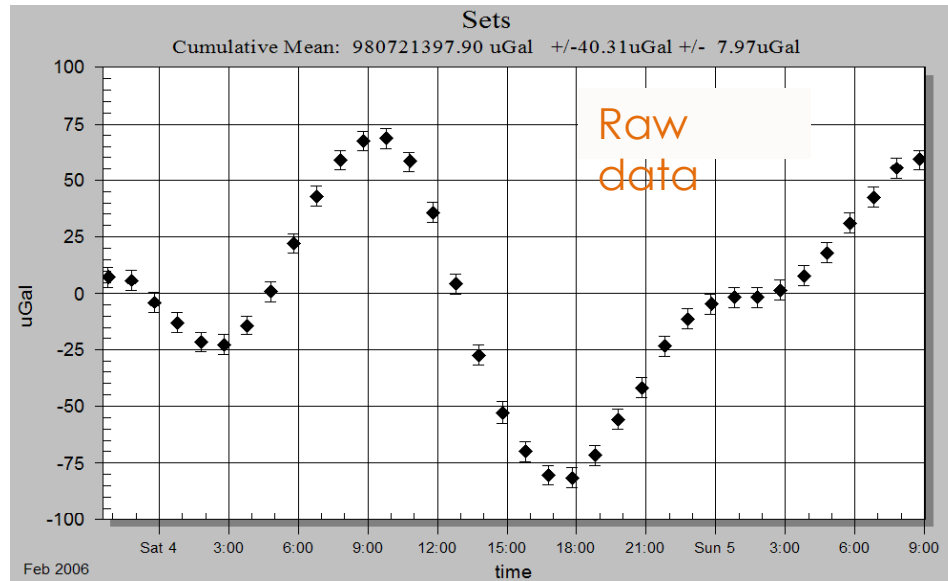
❑ On-line corrections

Order of magnitude of applied gravity corrections

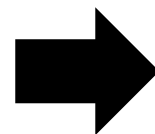
- Earth Tides (+/- 100 μGal)
- Ocean Loading (+/- 5 μGal)
- Barometric variations (-0,3 μGal / hPa)
- Polar motion (+/- 5 μGal)
- Vertical gravity gradient (-3 μGal / m)

Traitement des mesures absolues

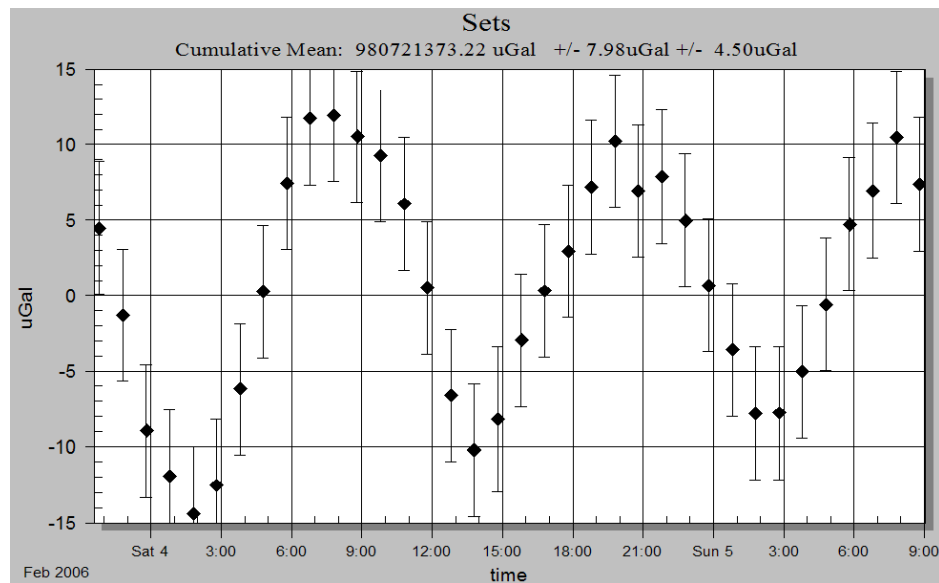
❑ Earth tide correction



Residual
(rms 8μGal)

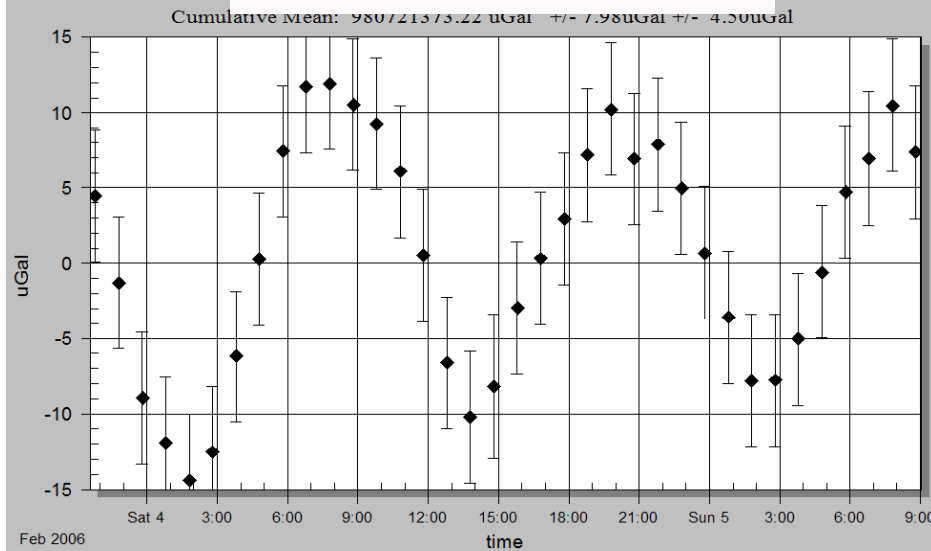


ocean loading effect

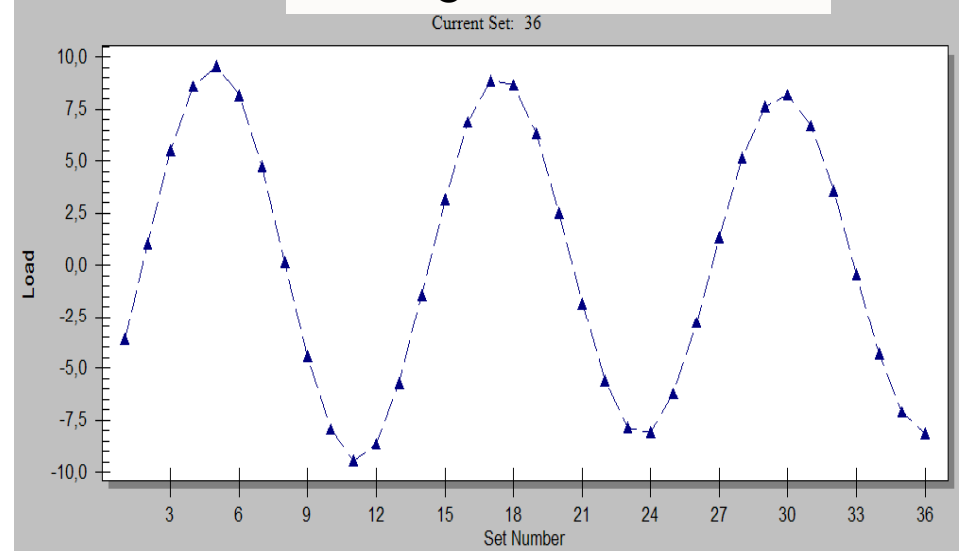


Traitement des mesures absolues

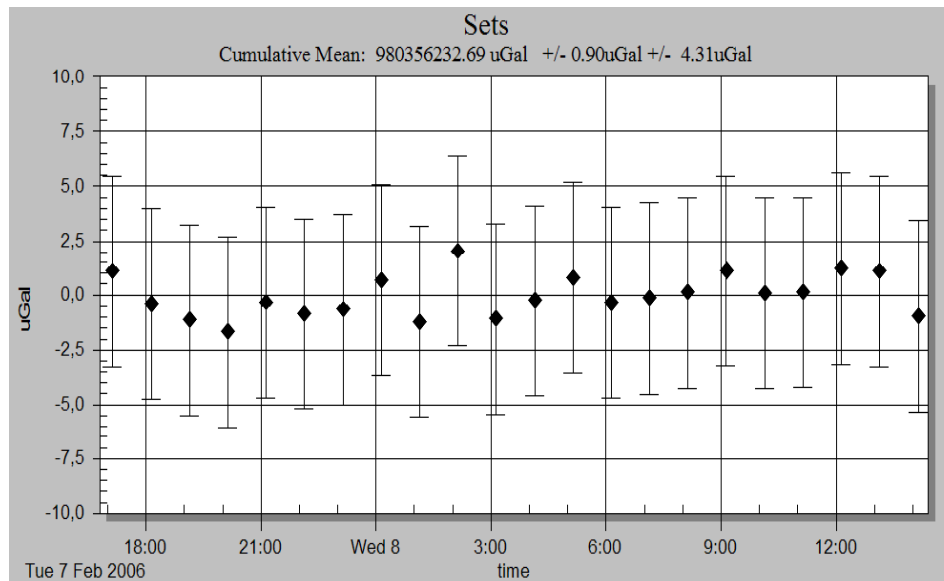
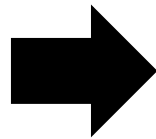
Earth tide corrected data



Model of ocean loading

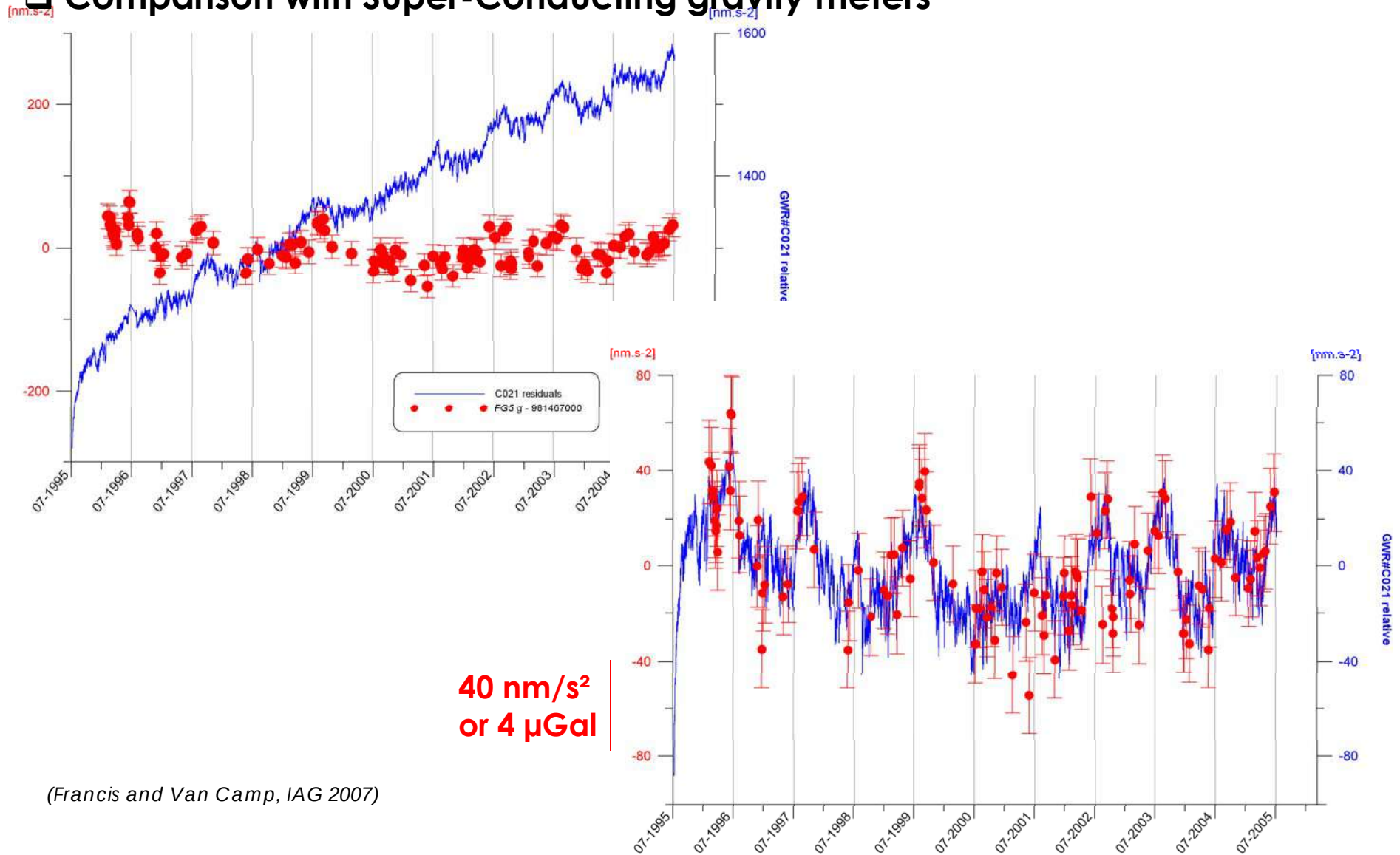


Residual
(rms 0.90 μ Gal)



Incertitude des mesures ?

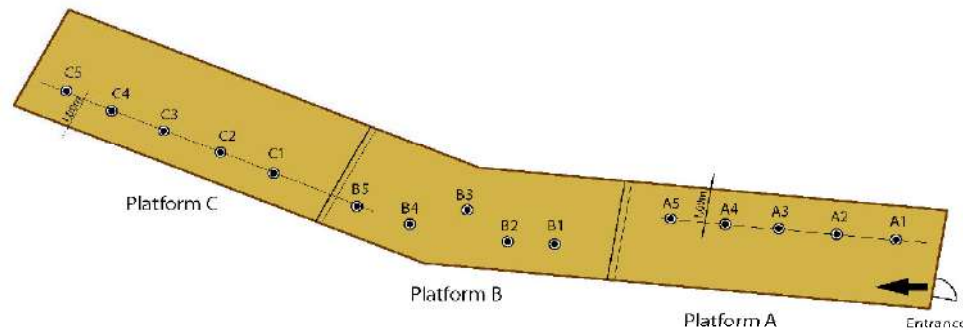
Comparison with Super-Conducting gravity meters



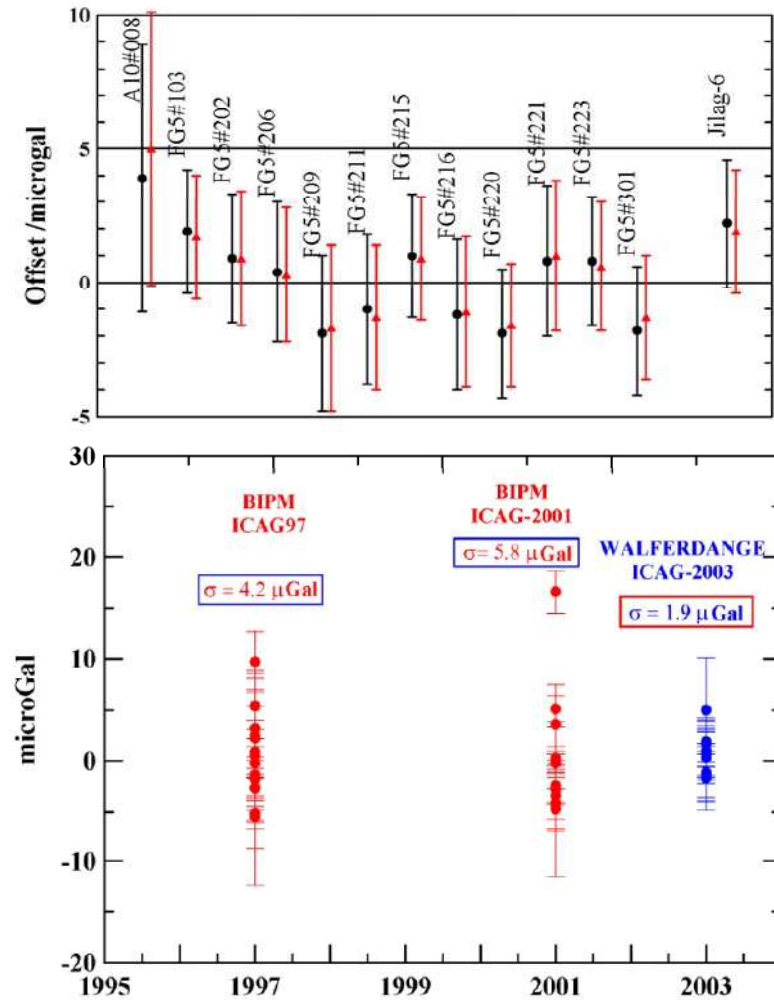
Incertitude des mesures ?

❑ International inter-comparisons (since 1997)

BIPM (FR) & Walferdange (Lux)



● Absolute Gravimeter

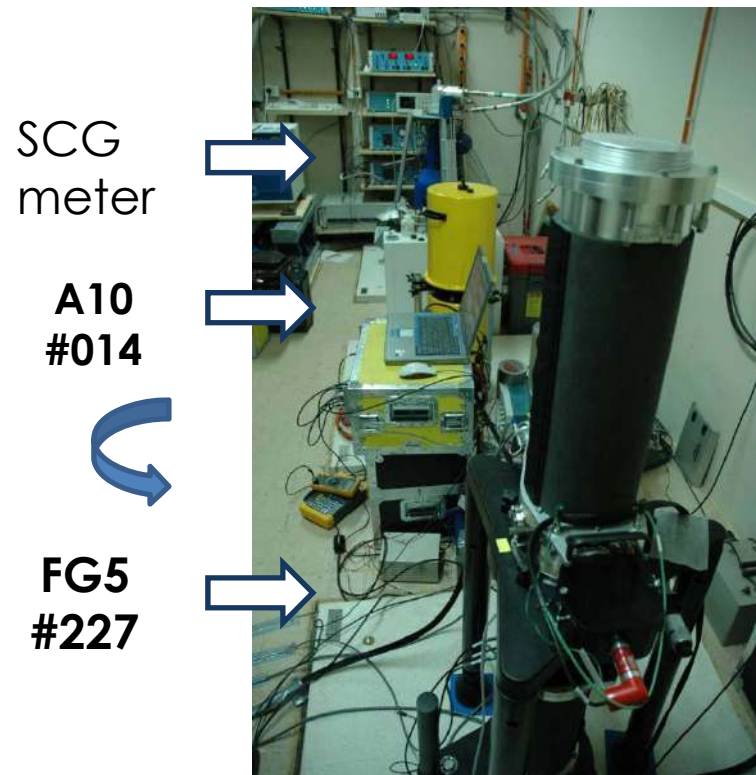


(Francis and Van Dam, 2004)

Incertitude des mesures ?

❑ Inter-comparisons of instruments (FG5-A10)

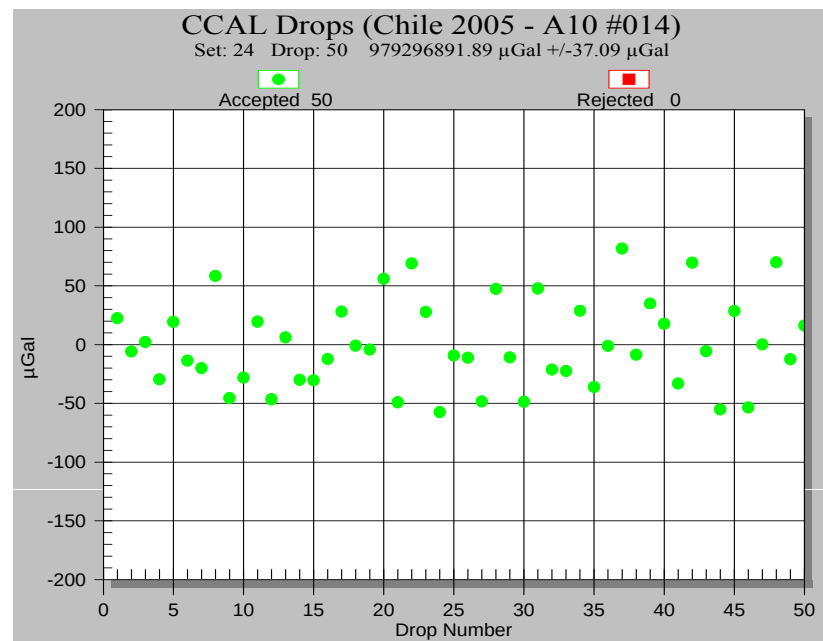
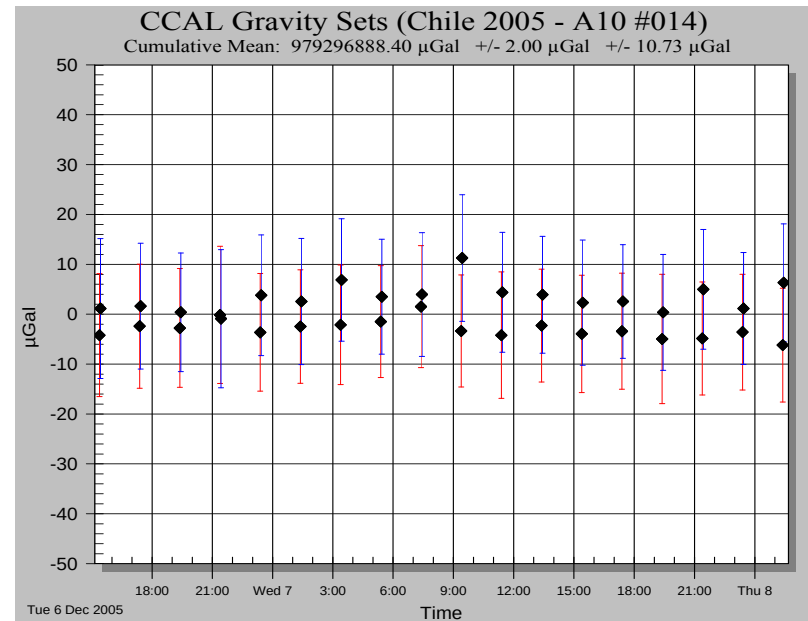
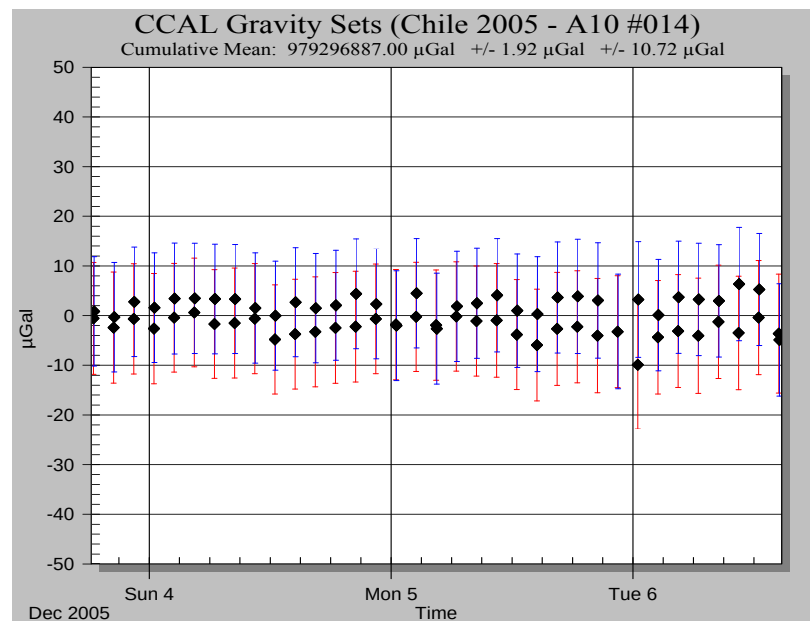
Example at TIGO Geodetic Observatory (Chile)



Site #	FG5 227	A10 014	DIFF FG5-A10
402	979923643.84 +/- 0.53	979923642.45 +/- 2.10	1.39
403	979923637.81 +/- 1.08	979923635.37 +/- 2.07	2.44
DIFF 403-402	-6.03	-7.08	

	FG5 227	A10 014	Scintrex 267
DIFF 403-402	-6.03	-7.08	-8

(Bonvalot and VanWestrum)

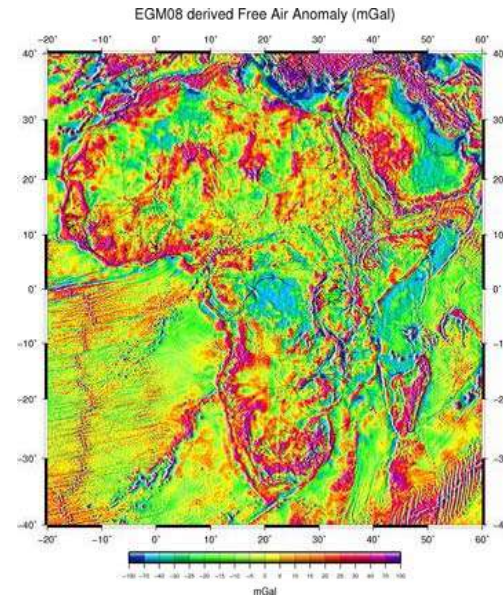
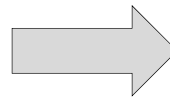


3. CALCUL D'ANOMALIES GRAVIMÉTRIQUES EN GÉOPHYSIQUE

DES OBSERVATIONS.....AUX ANOMALIES
(AIR LIBRE / BOUGUER / ISOSTATIQUES)



Source : Pierre Hascoët
<http://prospectionpetrole.free.fr>



Source : BGI

Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ But de l'interprétation géophysique

- Caractériser / Quantifier / Interpréter les distributions de masse / densité
- Approche classique pour des études locales à régionale: mise en évidence des perturbations par rapport à un modèle de référence en vue d'une modélisation sur la base de formes +/- simples (modèles analytique, numériques)
- Notion d'anomalie = écart à un modèle (dont on sait calculer la réponse gravimétrique)

□ Définition de l'anomalie de Bouguer

- Ecart à un modèle de terre simplifié
(ellipsoïde en rotation, masse, topographie, bathymétrie, densité superficielle...)
- Approche basée sur une simplicité de calcul par étapes successives
(initiée avant les facilités de calcul numérique → difficulté calcul terme $C_{Terrain}$)

$$AB = g_{mes} - g_{théorique}$$

$$AB = g_{mes} - (\gamma_0 + C_{Air libre} + C_{Bouguer (slab / curvature)} + C_{Terrain (topographie / bathymétrie)})$$

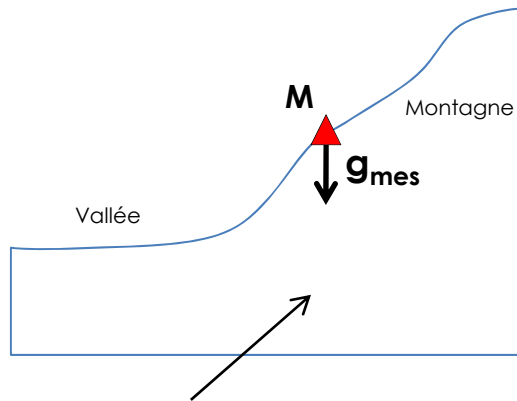
Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ Définition de l'anomalie de Bouguer

$$AB(M) = g_{\text{mes}}(M) - g_{\text{théorique}}(M)$$

$$AB(\varphi, \lambda, h) = g_{\text{mes}}(\varphi, \lambda, h) - (\gamma_0(\varphi) + C_{\text{Airlibre}}(\varphi, h) + C_{\text{Bouguer}}(\varphi, h)_{\text{slab / curvature}} + C_{\text{Terrain}}(\varphi, \lambda, h)_{\text{topographie / bathymétrie}})$$

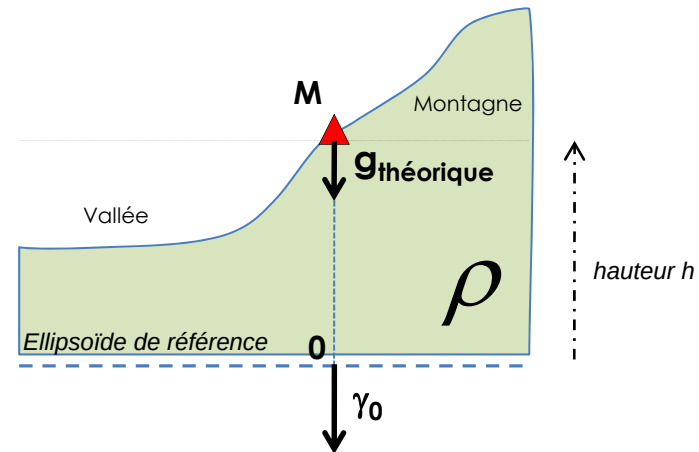
Mesure de g en une station M
(latitude, longitude, hauteur h)



Structure interne ?
Distribution de densité ?

?

Calcul de la valeur théorique en M
pour un modèle de terre simplifié
à partir de la valeur g_0 et de corrections
(hauteur de la station, topographie, densité ρ)



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

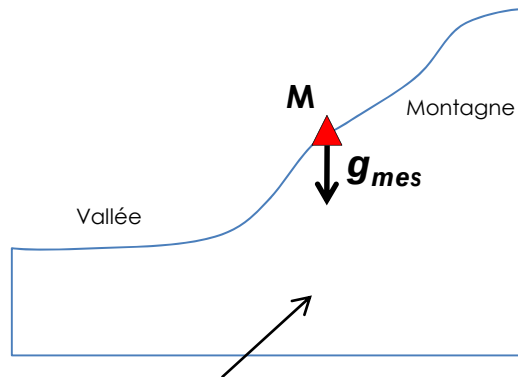
□ Définition de l'anomalie de Bouguer

$$AB(M) = g_{mes(M)} - g_{théorique(M)}$$

$$AB(\varphi, \lambda, h) = \underbrace{g_{mes(\varphi, \lambda, h)} - (\gamma_0(\varphi) + C_{Airlibre}(\varphi, h))}_{\text{Anomalie Air Libre}} + \underbrace{C_{Bouguer}(\varphi, h)_{slab / curvature}}_{\text{Anomalie Bouguer}} + C_{Relief}(\varphi, \lambda, h)_{topographie / bathymétrie}$$

Anomalie Bouguer Complète

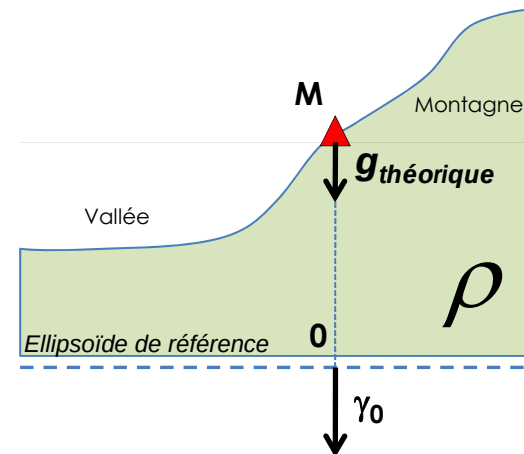
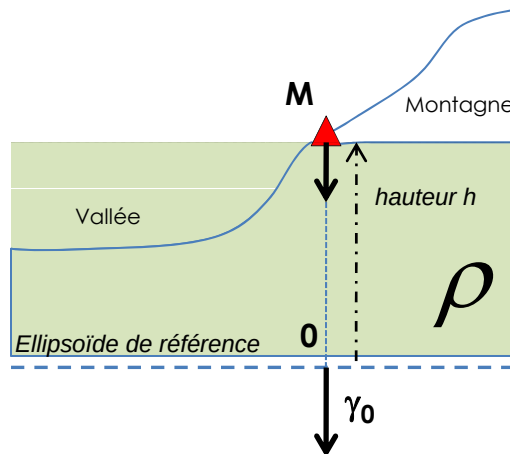
Mesure de g en une station M
(latitude φ , longitude λ , hauteur h)



Structure interne ?
Distribution de densité ?

?

Calcul de la valeur théorique g en M
pour un modèle de terre simplifié
à partir de la valeur g0 et de corrections
(hauteur de la station, topographie, densité ρ)



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ Pesanteur normale sur l'ellipsoïde (g_0)

La pesanteur normale (ou pesanteur théorique) en un lieu donné est l'attraction gravitationnelle prédite rendant compte de la masse, de la forme et de la rotation de la terre.

L'ellipsoïde le plus récent recommandé par l'IUGG est le GRS1980 (Geodetic Reference System), (Moritz, 1980).

La pesanteur théorique γ_0 pour une latitude φ est donnée par la formule de Somigliana (1930):

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_e (1 + k \sin^2 \varphi)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$$

$$\gamma_e = 978032,67715 \text{ mGal} \quad (\text{pesanteur théorique à l'équateur})$$

$$k = 0,001931851353 \quad (\text{constante})$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0,0066943800229 \quad (\text{excentricité})$$

Forme linéaire simplifiée

$$\gamma_0 = 978032,7(1 + 0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) \text{ mGal}$$

Nouvelles réalisations de l'ellipsoïde de référence depuis 1980 ont un effet négligeable sur la pesanteur théorique (variations de quelques millièmes de mGal)

Le GRS80 reste le système gravimétrique officiel actuel (en 2010)

Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ Correction à l'air libre

Formulation de la valeur théorique de pesanteur (mGal) à une hauteur h (m) au dessus de l'ellipsoïde déduite de l'approximation au 2^o ordre de la formule de Heiskanen et Moritz (1969)

$$\delta g_h = -\frac{2\gamma_e}{a} \left[1 + f + m + \left(-3f + \frac{5}{2}m \right) \sin^2 \varphi \right] h + \frac{3\gamma_e h^2}{a^2}$$

$a = 1/2$ grand axe ; $b = 1/2$ petit axe ; $f =$ aplatissement

$m = \frac{\omega^2 a^2 b^2}{GM}$; $\omega =$ vitesse angulaire ; $GM =$ Constante gravitationnelle géocentrique

Pour l'ellipsoïde GRS1980 (formule recommandée):

$$a = 6378137 \text{ m} ; b = 6356752.3141 \text{ m} ; f = 0,0033522810681$$

$$\omega = 7292115 \times 10^{11} \text{ radians/s} ; GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$$

$$\delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2 \varphi) h + 7.2125 \times 10^{-8} h^2$$

Approximation fréquente du gradient à l'air libre : $\frac{\delta g}{\delta h} = -0.3086 \text{ mGal/m}$

Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

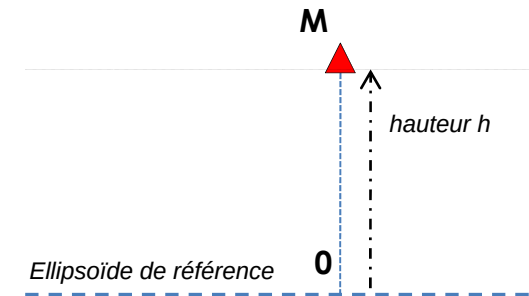
□ Correction de Bouguer ($C_{Bouguer}$)

Correction de Plateau

Rend compte de l'effet d'attraction des masses comprises entre le datum vertical (ellipsoïde) et la station située à une hauteur h

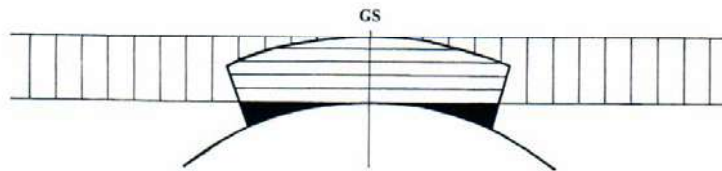
Approximation de la correction δg_h (en mGal) par l'effet d'un plateau horizontal infini de densité ρ (kg/m³) et de hauteur h (m) :

$$\delta g_{slab} = 2\pi G \rho h = 0.4193 \rho h$$



Correction de courbure (ou Bullard B)

Terme correctif pour prendre en compte la courbure de la Terre (LaFehr, 1991): calotte sphérique (166,7 km rayon de surface)

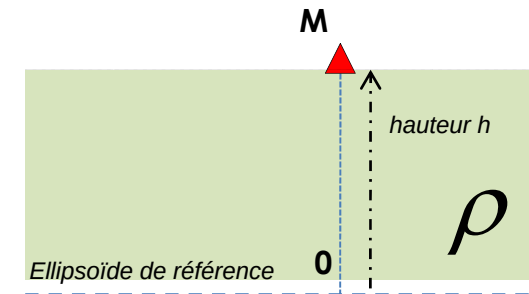


$$\delta g_{curvature} = 2\pi G \rho (\mu h - \lambda R)$$

μ, λ : coefficients sans dimension

R : rayon de la Terre à la station ($R_0 + h$)

R_0 : rayon terrestre moyen ; h : hauteur au dessus de l'ellipsoïde



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Calcul de l'effet d'un plateau infini

Composante verticale de l'attraction d'un élément de couronne

$$dg_y = \frac{(2 \pi r.dr.dy) \rho G}{r^2 + (y+b)^2} \left\{ \frac{y+b}{[r^2 + (y+b)^2]^{1/2}} \right\}$$

Intégration entre sur y $[0,h]$ et sur r $[0,R]$

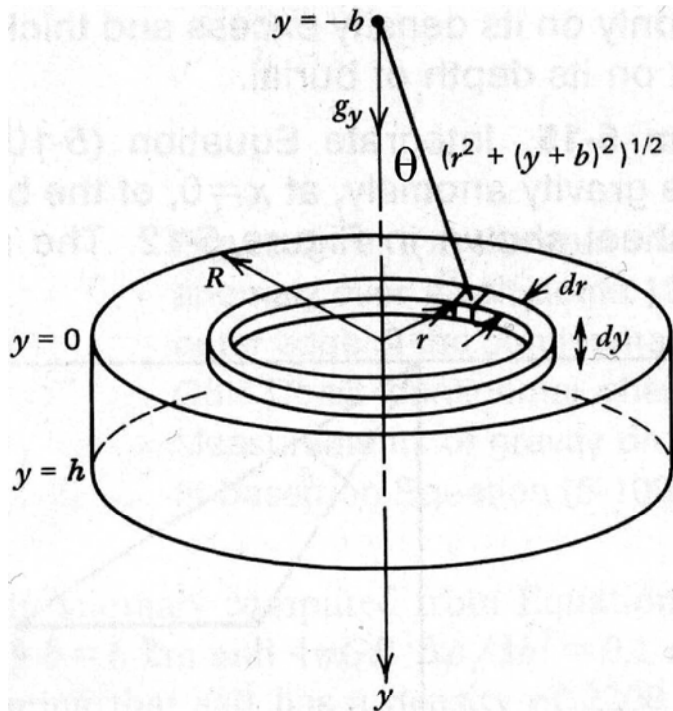
$$g_y = 2\pi G \int_0^h \int_0^R \frac{(y+b)r}{[r^2 + (y+b)^2]^{3/2}} \rho(y) dr dy$$

$$= 2\pi G \int_0^h \left[1 - \frac{(y+b)}{[R^2 + (y+b)^2]^{1/2}} \right] \rho(y) dy$$

$$R \rightarrow \textit{infini}$$

$$g_y \approx 2\pi G \int_0^h \rho(y) dy$$

$$= 2\pi G \rho h$$



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ Corrections de terrain

Par rapport au modèle "plateau", on prend en compte ici, un défaut d'attraction au point M,

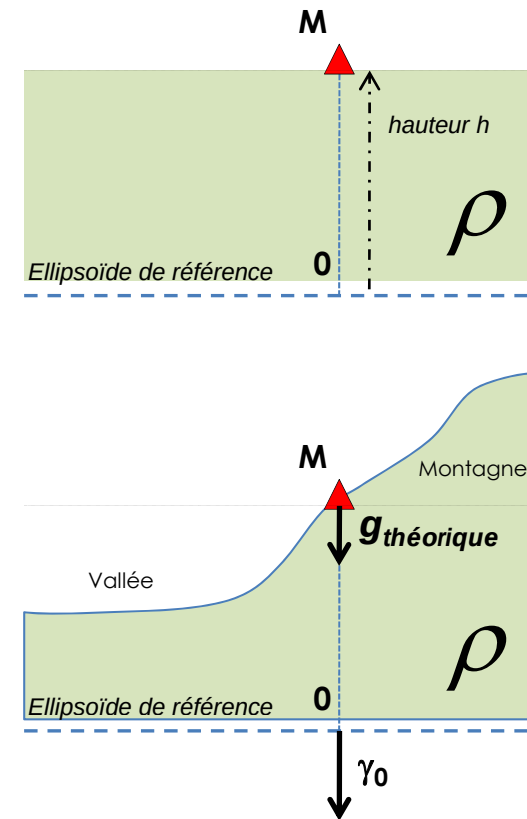
- lié à l'effet de la montagne (ajout de masse au dessus du point M)
- lié à l'effet de la vallée (retrait de masse au dessous du point M)

Nécessite un calcul en 3D intégrant l'effet de l'ensemble des reliefs par rapport au point de mesure M (altitude h)

Calcul généralement effectué jusqu'à une distance DMAX autour de la zone d'étude, au delà de laquelle l'effet gravimétrique des masses lointaines devient négligeable

Besoins :

- Connaissance de la topographique (fine dans la zone d'étude ; plus grossière en zone lointaine)
- Méthode de calcul efficace pour intégrer l'effet de l'ensemble des reliefs en chacun des points d'observation



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Avant les Modèles Numériques de Terrain (MNT) : abaques de Hammer (1939)

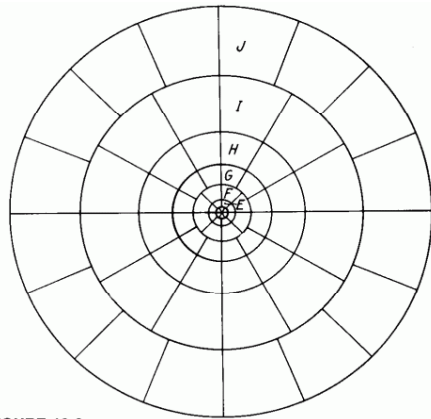
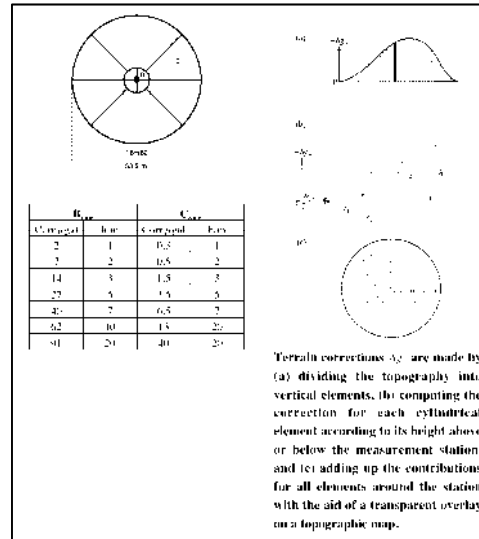


FIGURE 13-8

Terrain correction-zone chart designed by Hammer,²⁴ used in conjunction with Table 12-1 for zones through J. Scale is 1750000. (Gulf Research & Development Co.) [From Dobrin & Savit]



Cartes topographiques à différentes échelles

Zone B, 4 compartments, radius 6.56-54.6 ft		Zone C, 6 compartments, radius 54.6-175 ft		Zone D, 8 compartments, radius 175-558 ft		Zone E, 8 compartments, radius 558-1280 ft		Zone F, 8 compartments, radius 1280-2936 ft		Zone G, 12 compartments, radius 2936-5018 ft		Zone H, 12 compartments, radius 5018-6578 ft		Zone I, 12 compartments, radius 6578-14,662 ft		Zone J, 16 compartments, radius 14,662-21,826 ft		Zone K, 16 compartments, radius 21,826-32,490 ft		Zone L, 16 compartments, radius 32,490-48,365 ft		Zone M, 16 compartments, radius 48,365-71,996 ft	
sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T	sh, ft	T
0-1.1	0	0-4.3	0	0-7.7	0.00	0-18	0	0-27	0	0-58	0	0-75	0	0-99	0	0-167	0	0-204	0	0-249	0	0-304	0
1.1-1.9	0.1	4.3-7.5	0.10	7.7-13.4	0.10	18-30	0.10	27-46	0.10	58-100	0.10	75-131	0.1	99-171	0.01	167-290	0.1	204-354	0.1	249-431	0.1	304-526	0.1
1.9-2.5	0.2	7.5-9.7	0.20	13.4-17.3	0.20	30-39	0.20	46-60	0.20	100-129	0.20	131-169	0.2	171-220	0.2	290-374	0.2	354-457	0.2	431-557	0.2	526-680	0.2
2.5-2.9	0.3	9.7-11.5	0.30	17.3-20.5	0.30	39-47	0.30	60-71	0.30	129-153	0.30	169-200	0.3	220-261	0.3	374-443	0.3	457-540	0.3	557-659	0.3	680-804	0.3
2.9-3.4	0.4	11.5-13.1	0.40	20.5-23.2	0.40	47-53	0.40	71-80	0.40	153-173	0.40	200-226	0.4	261-296	0.4	443-502	0.4	540-613	0.4	659-747	0.4	804-912	0.4
3.4-3.7	0.5	13.1-14.5	0.50	23.2-25.7	0.50	53-58	0.50	80-88	0.50	173-191	0.50	226-250	0.5	296-327	0.5	502-555	0.5	613-677	0.5	747-826	0.5	912-1008	0.5
3.7-7	1	14.5-24	1	25.7-43	1	58-97	1	88-146	1	191-317	1	250-414	1	327-540	1	555-918	1	677-1119	1	826-1365	1	1008-1665	1
7-9	2	24-32	2	43-56	2	97-126	2	146-189	2	317-410	2	414-535	2	540-696	2	918-1185	2	1119-1445	2	1365-1783	2	1665-2150	2
9-12	3	32-39	3	56-66	3	126-148	3	189-224	3	410-488	3	535-633	3	696-827	3	1185-1403	3	1445-1711	3	1783-2086	3	2150-2545	3
12-14	4	39-45	4	66-76	4	148-170	4	224-255	4	488-552	4	633-719	4	827-938	4	1403-1592	4	1711-1841	4	2086-2366	4	2545-2686	4
14-16	5	45-51	5	76-84	5	170-189	5	255-282	5	552-611	5	719-798	5	938-1038	5	1592-1762	5	1941-2146	5	2366-2617	5	2686-3191	5
16-19	6	51-57	6	84-92	6	189-206	6	282-308	6	611-688	6	796-866	6	1038-1129	6	1762-1917	6	2146-2335	6	2617-2846	6	3191-3470	6
19-21	7	57-63	7	92-100	7	206-222	7	308-331	7	686-716	7	866-931	7	1129-1213	7	1917-2060	7	2335-2509	7	2846-3058	7	3470-3728	7
21-24	8	63-68	8	100-107	8	222-238	8	331-353	8	716-764	8	931-992	8	1213-1292	8	2060-2195	8	2509-2672	8	3058-3257	8	3728-3970	8
24-27	9	68-74	9	107-114	9	238-252	9	353-374	9	764-809	9	992-1050	9	1292-1367	9	2195-2322	9	2672-2826	9	3257-3444	9	3970-4198	9
27-30	10	74-80	10	114-120	10	252-266	10	374-394	10	809-852	10	1050-1105	10	1367-1438	10	2322-2443	10	2826-2973	10	3444-3622	10	4198-4414	10
		80-86	11	120-127	11	266-280	11	394-413	11	852-894	11	1105-1158	11	1438-1506	11	2443-2558	11			3622-3728	11		
		86-91	12	127-133	12	280-293	12	413-431	12	894-933	12	1158-1209	12	1506-1571	12	2558-2669	12				12		
		91-97	13	133-140	13	293-306	13	431-449	13	933-972	13	1209-1257	13	1571-1634	13	2669-2776	13				13		
		97-104	14	140-146	14	306-316	14	449-466	14	972-1009	14	1257-1305	14	1634-1694	14	2776-2879	14				14		
		104-110	15	146-152	15	318-331	15	466-483	15	1009-1046	15	1305-1350	15	1694-1753	15	2879-2978	15				15		

Each zone is a circular ring of given radius (in feet) divided into 4, 6, 8, 12, or 16 compartments of arbitrary azimuth.

h is the mean topographic elevation in feet (without regard to sign) in each compartment with respect to the elevation of the station.

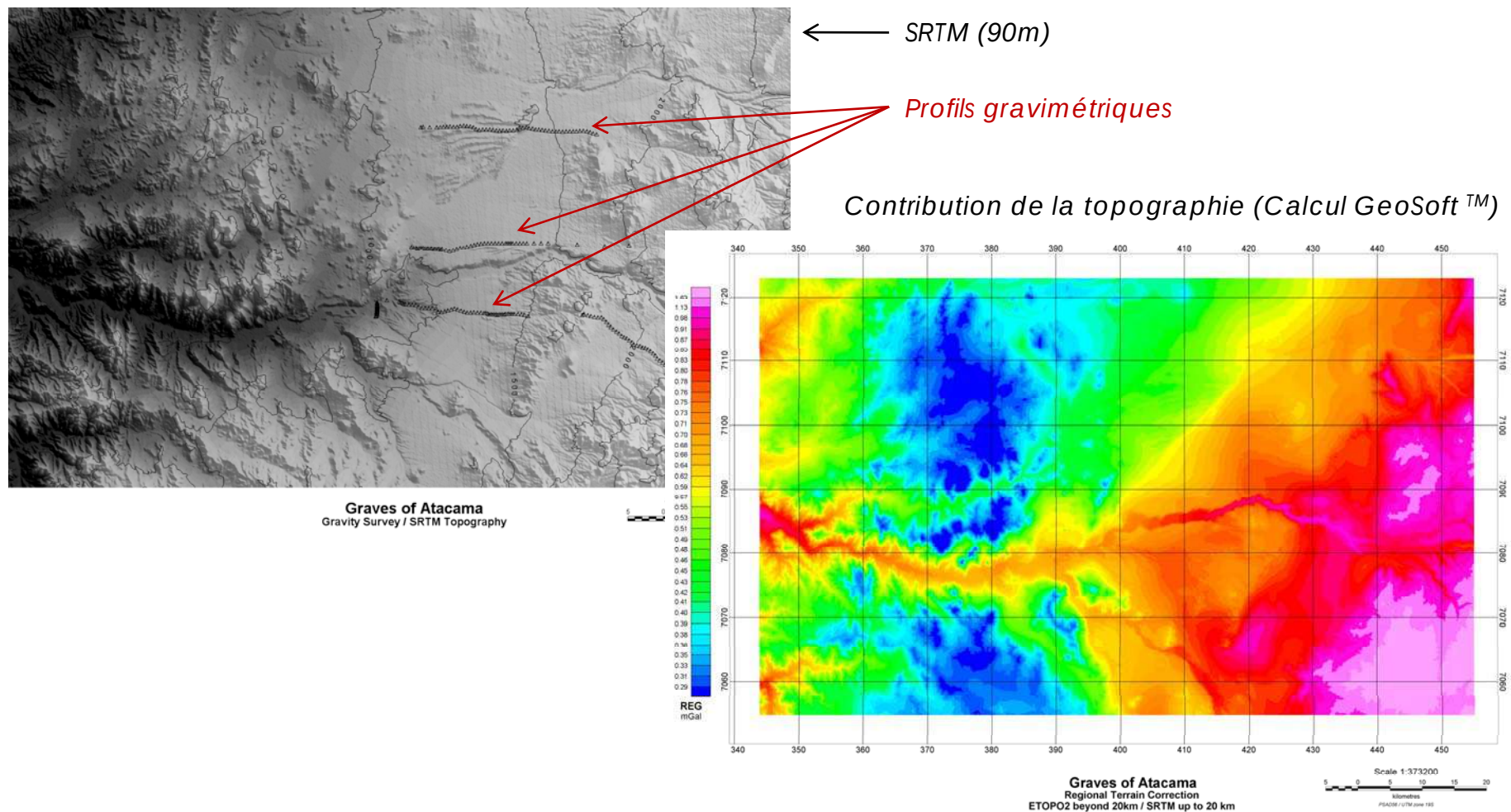
The tables give the correction T for each compartment due to undulations of the terrain in units of 1/100 mGal for density 2.0 g/cm³.

This correction, when applied to Bouguer anomaly values which have been calculated with the simple Bouguer correction, is always positive.

Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Depuis les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

- MNT ou DEM (Digital Elevation Models)
- Utilisation de MNT à différentes résolutions (levés topo, cartes numérisées, SRTM, ETOPO...)
- Calcul et sommation numérique d'éléments de topographie discrétisés



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Depuis les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Méthodes de calcul

- Lignes de masse, plans inclinés, prismes droits, tesseroids,...
- Géométrie plane ou sphérique

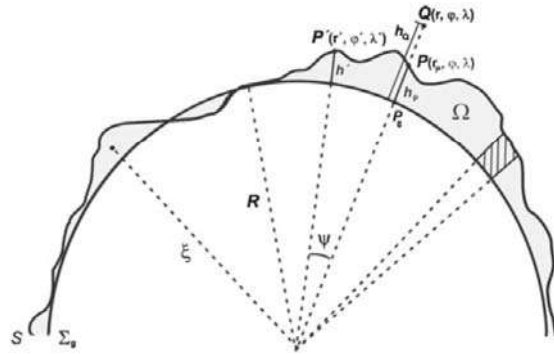


Fig. 1 Geometry of the topography in spherical approximation

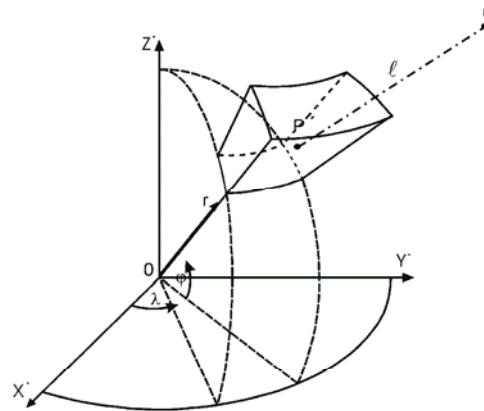


Fig. 2 Tesseroid in the global coordinate system

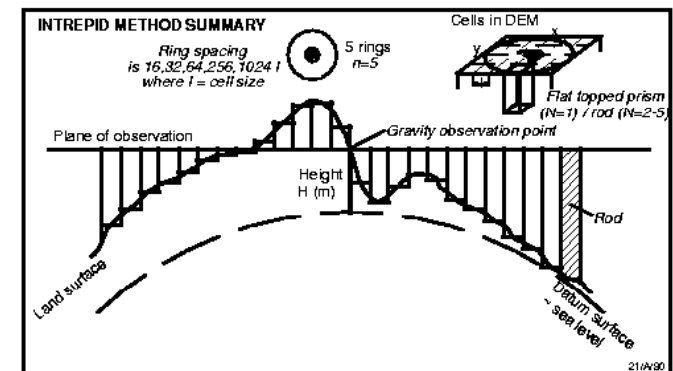
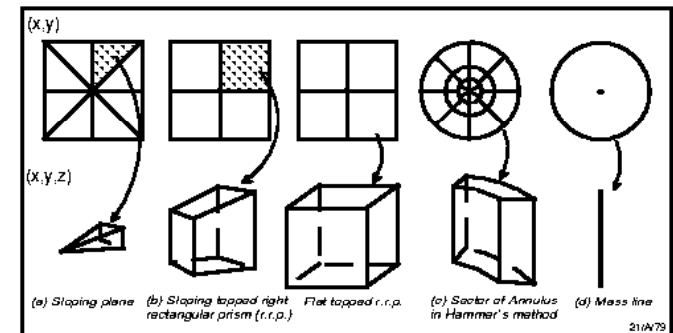
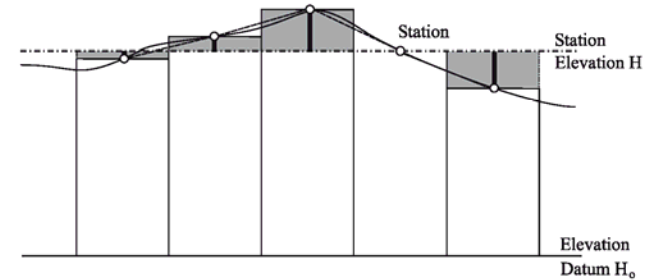
- Source d'inspiration permanente pour les géodésiens et géophysiciens (littérature abondante sur le sujet)

Ex. de programmes scientifiques

- Fulla et al., *Computers & Geosciences*, 2008
- Tesseroids - <http://code.google.com/p/tesseroids>

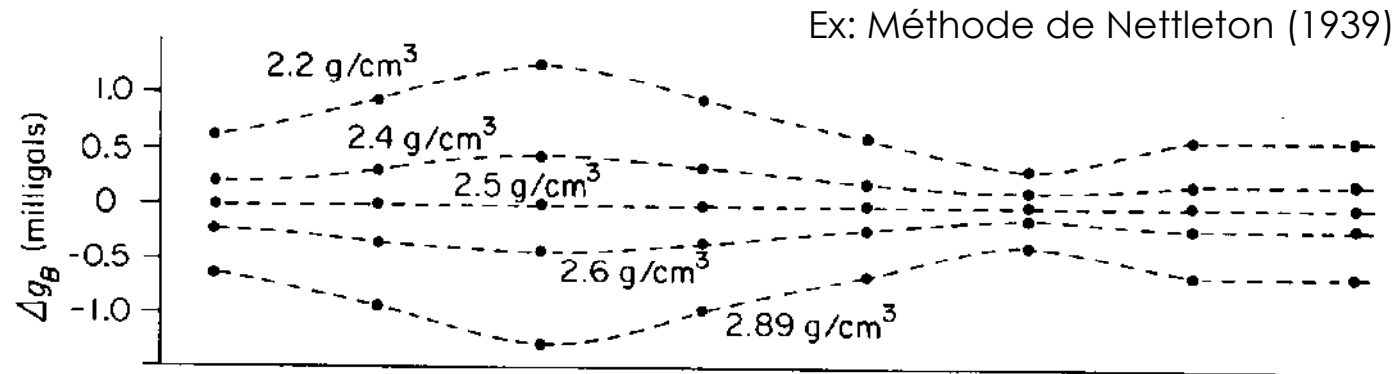
Ex de logiciels commerciaux

- Geosoft - <http://www.geosoft.com>
 - Intrepid - www.intrepid-geophysics.com
- orientés prospection minière
(géométrie plane, zones terrestres limités)



Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Choix de la densité de réduction



(From Robinson and Coruh, 1988)

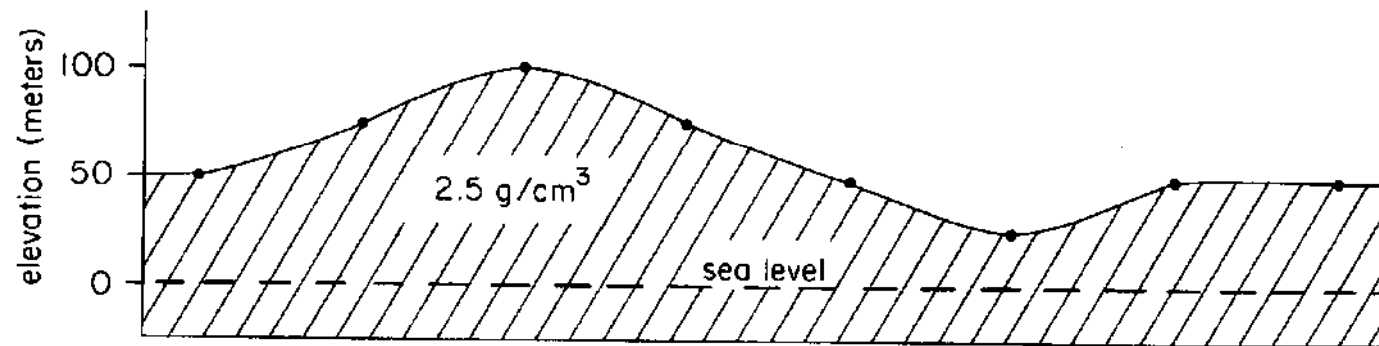


Figure 8-8

Graph illustrating the Nettleton method of density estimation. Dashed curves show Bouguer gravity calculated for several trial values of density.

Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Remarques sur le calcul de l'anomalie de Bouguer

- Concept (écart à un modèle de référence) utile pour la modélisation géophysique (recherche de sources perturbatrices) à différentes échelles (locale, régionale, globale)
 - Méthode de calcul simple et adaptée à un jeu de données locales (facilement accessible surtout hors corrections de terrain)
- Dans sa forme la plus simple (pour des stations à terre^{*}):

$$AB = g_{mes} - \gamma_0 + 0,3086h - 0,0419\rho h + \rho T$$

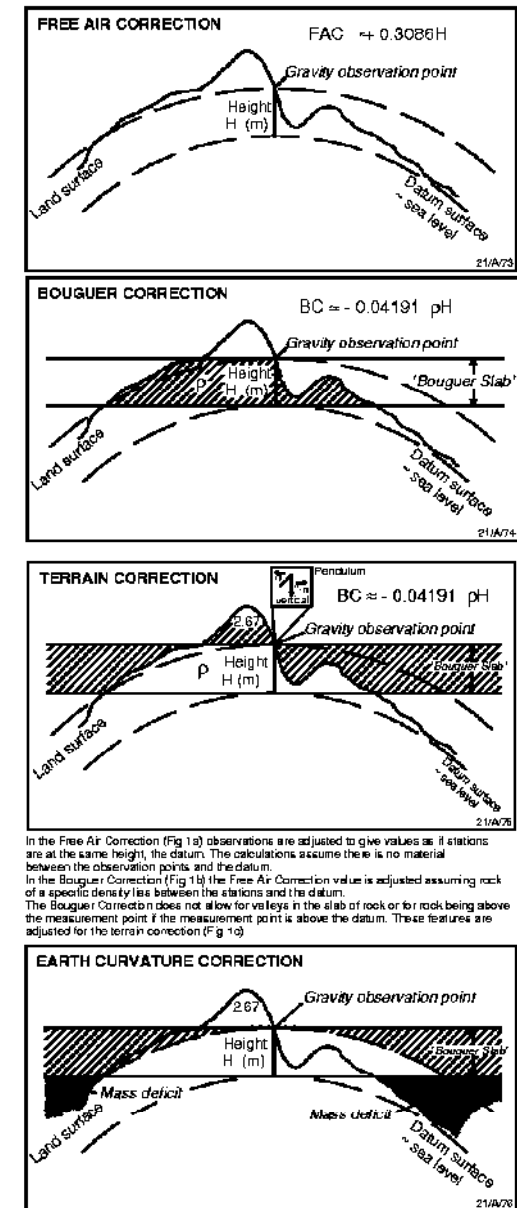
* différentes formulations pour des mesures faites dans différents contextes (mer, fond de mer, lac, fond de lac, calotte glaciaire, aéroportés...)
Cf. documents NGA ou BGI :

<http://bgi.omp.obs-mip.fr/index.php/eng/Data-Products/Documentation>

- **Problèmes**

- Approximation plane (limites du calcul plan / calcul sphérique)
- Approximation altitude / hauteur pour le calcul de γ_0
(effet géophysique indirect)
- Distance pour la correction de terrain (167 km)

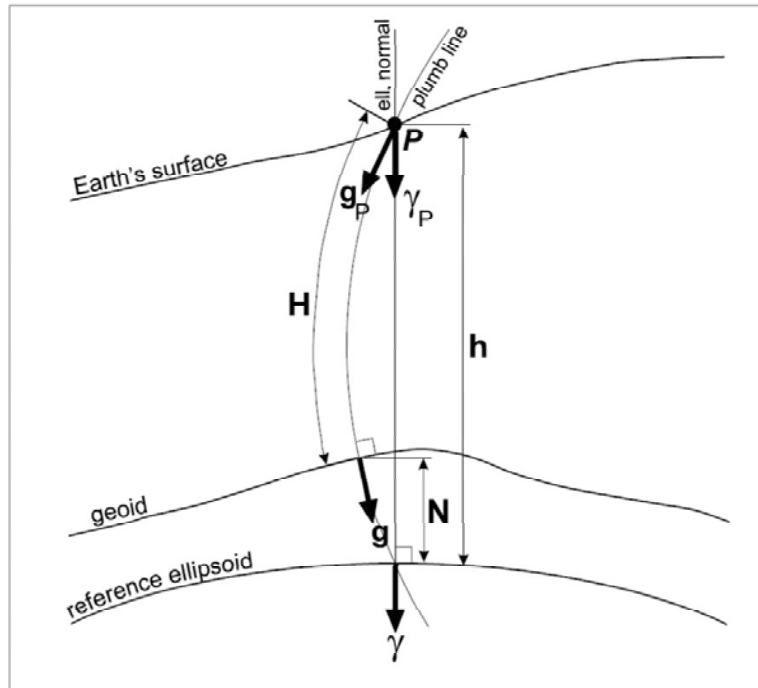
**Ne convient pas à une approche régionale ou globale
(nouvelle approche géophysique / géodésique)**



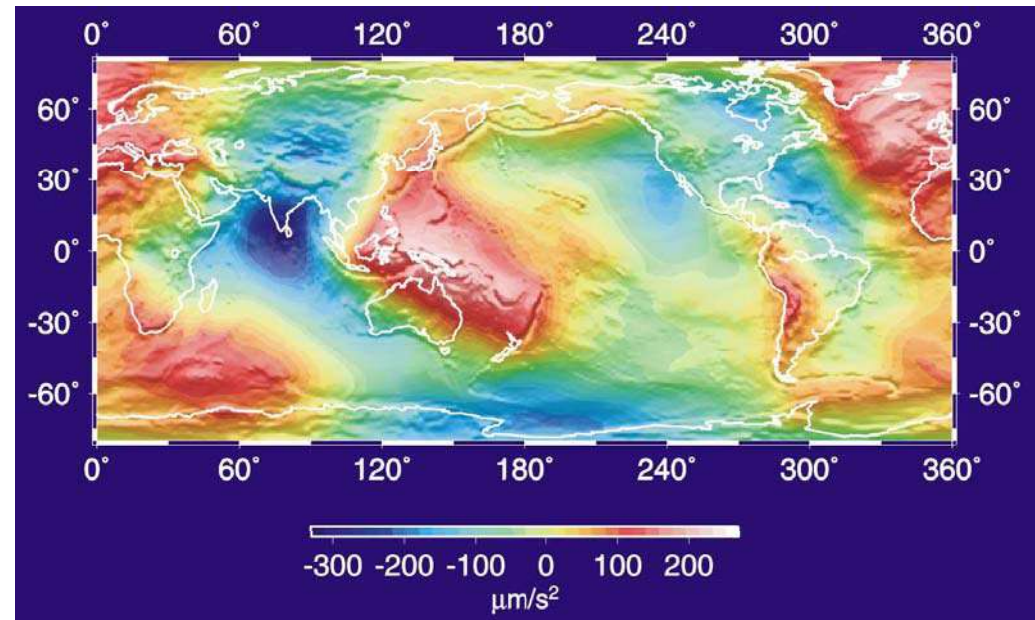
Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

Perturbations de gravité + Calcul direct sphérique de l'effet des masses topographiques

$$\delta g_P = g_P - \gamma_P$$



Effet géophysique indirect global : -30 à 25 mGal
(Hackney & Featherstone, 2001)



Quelques références sur le sujet...

- Nozaki. « The generalized Bouguer anomaly ». Earth Planets Space, 2006
- Hackney and Featherstone. « Geodetic versus geophysical perspectives of the gravity anomaly », Geophy. Journal Int., 2001
- Li and Götze. « Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy and geophysics », Geophysics, 2001
- Vanicek and Novak. « Comparison between planar and spherical models of Topography », 1999
- Featherstone and Dentith. "A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics". Computers & Geosciences, 1997
- LaFehr. « Standardization in gravity reduction ». Geophysics, 1991.

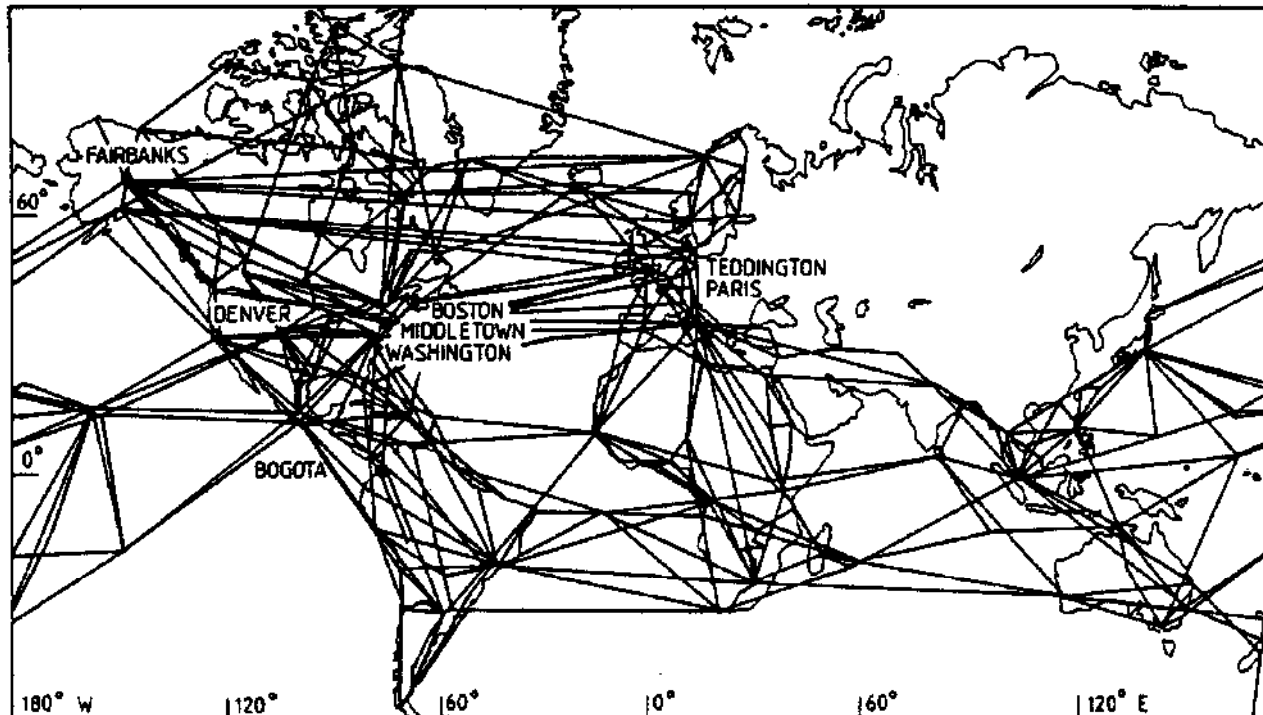
Calcul d'anomalies gravimétriques en géophysique

□ Système de référence gravimétrique

Indispensable pour “recaler” les mesures relatives (terrestres, marines aéroportées): $\Delta g \rightarrow g_{mes}$

International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71)

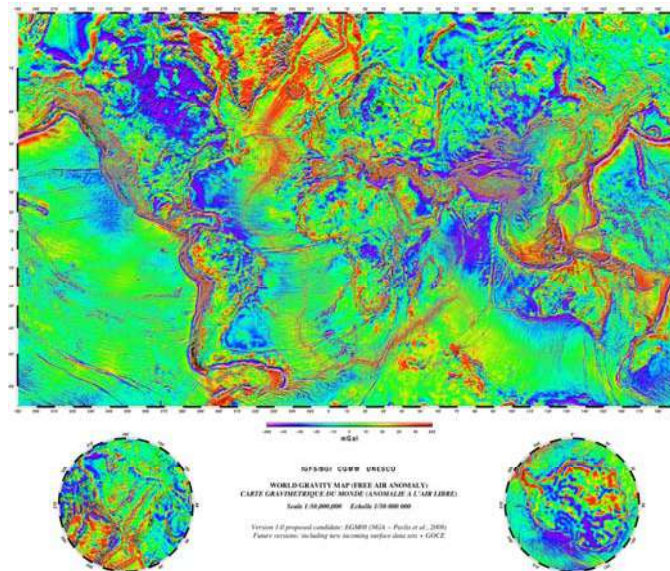
- Etablissement entre 1950 et 1970 (coopération internationale)
- Observations : 10 absolues (chute libre), 1200 relatives (pendule), 24000 relatives (ressort)
- 1854 stations (dont 500 stations centrales) ajustées (précision moyenne : +/- 0,1 mGal)
- Adopté par l'IUGG (Moscou, 1971) ; remplace le système Postdam 1930 (mesure pendulaire)
- Ecart entre les deux réseaux : 14 mGal à Postdam (formule de conversion)



4. DONNÉES ET PRODUITS GRAVIMÉTRIQUES À L'ECHELLE GLOBALE

BASES DE DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES
(COLLECTE, VALIDATION, REDISTRIBUTION)

INTERNATIONAL GRAVITY FIELD SERVICE



Bases de données gravimétriques globales

❑ Principales BDD gravimétriques

Plusieurs centres de collecte, d'archivage et de validation des mesures terrestres ou marines

Centre officiel IAG : BGI (créé en 1951)

Autres centres de données (global): NGA, NOAA/NGDC, GETECH...



NOAA NATIONAL GEOPHYSICAL
DATA CENTER
NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION



❑ Intérêt

Information précise à haute résolution

Information complémentaire avec données satellitaires (altimétrie, Grace, Goce...)

❑ Problème majeur

Information très hétérogène (plus de 60 années de campagnes) / Evolution des techniques

Sources d'hétérogénéité : positionnement, mesure de g , systèmes de référence gravimétriques, géodésique, topographie...

Information locale à régionale, couverture spatiale irrégulière

Necessite un important travail de collecte, d'archivage et de validation

Validation des données terrestres

❑ But

- Détecter les erreurs isolées ou systématiques provenant des campagnes de mesures (acquisition, traitement) ou d'autres sources (MNT)
- Produire des resituations précises d'anomalie gravimétriques ou géoïde

❑ Erreurs gravimétriques

<u>Locales</u>	Erreur	Impact	Méthode
	Mesure gravimétrique	g, anomalies	Prédiction de cartes d'anomalie (triangulation)
	Carte numérisée	[X,Y], hauteur, anomalies	
<u>Systématiques</u>	Erreur	Impact	Méthode
	Station de référence	g, anomalies	Comparaison de campagnes Réoccupation de stations de Ref.
	Ellipsoïde de référence	anomalies	Comparaison de campagnes Recalcul des anomalies
	Datum [X,Y, h]	Latitude, longitude, hauteur, anomalies	Comparaison MNT, cartes topographiques, orthophotos

❑ **Datum** Potsdam 1930 / IGSN71 / GRS80) / Datum (vertical) / Datum (horizontal)

❑ Erreurs généralement non récupérables

- Corrections temporelles (marées terrestres, dérive instrumentale)
- Etalonnage des gravimètres relatifs

❑ **Procédures usuelles** (validations internes et externes de jeux de données)

- Ellipsoïde de référence : 1930, 1967, 1980...
- Station ou réseau de référence : g ?
- Comparaison de campagnes sur une même région
- Formules de calcul d'anomalies
- Prédiction / Tracé des anomalies
- Comparaison des anomalies avec modèles globaux (ex : EGM2008)
- Comparaison des altitudes de stations / MNT
- Comparaison des positions de station / Cartes

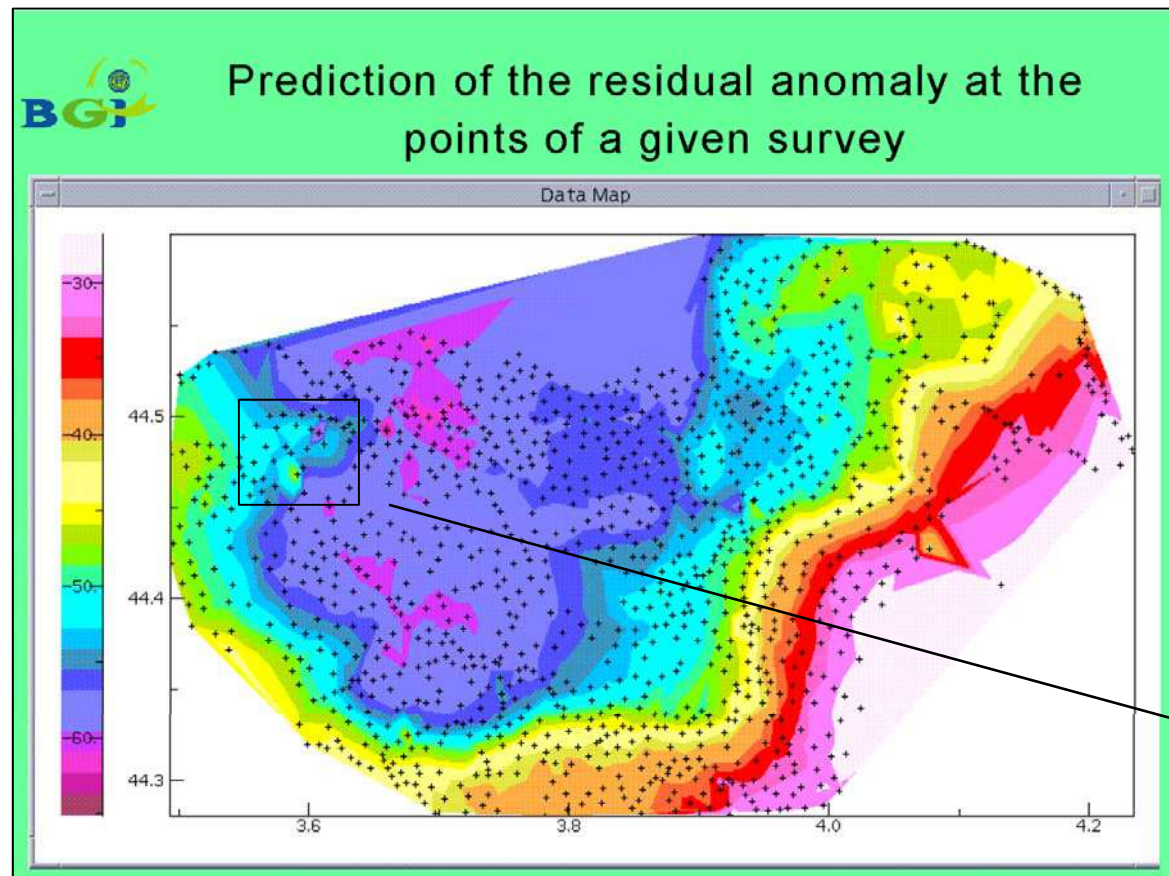
❑ **Outils utilisés au BGI** (à base d'interface graphique)

- Contrôle / Validation des données terrestres : DIVA (M. Sarrailh)
- Contrôle / Validation / Ajustement de données de campagnes marines
→ SeaValid (M. Sarrailh) / Sea-Gravi-Adjust (T. Fayard)

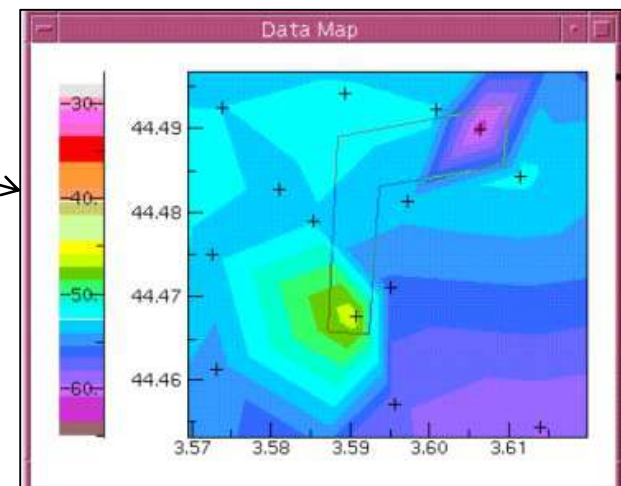
Validation des données terrestres

❑ Exemple de validation (BGI)

- Triangulation des valeurs d'anomalie gravimétriques (air libre, Bouguer)
- Détection des points douteux (valeur de g , altitude, position ?)



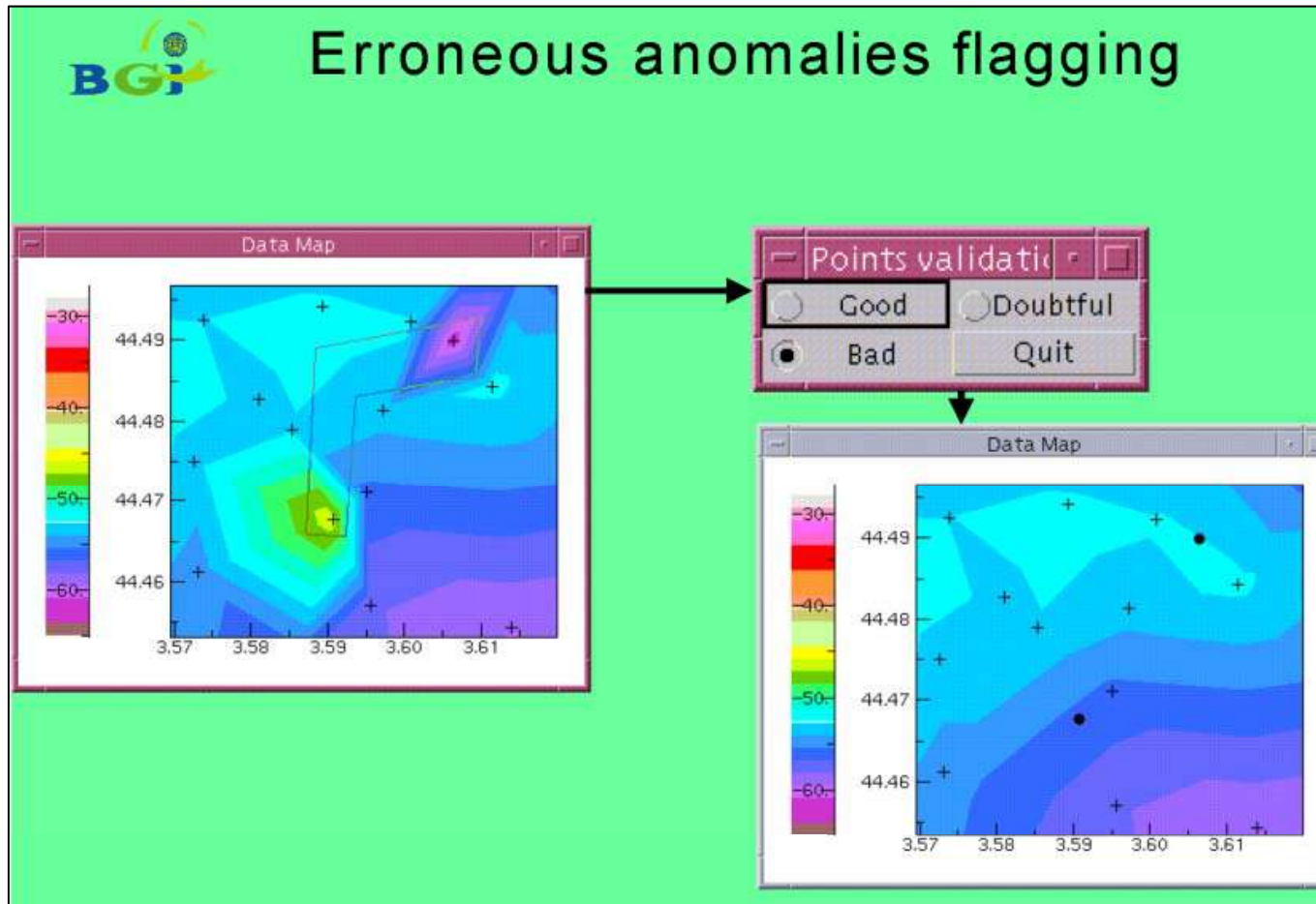
Source : M. Sarrailh (BGI)



Validation des données terrestres

❑ Exemple de validation (BGI)

- Sélection des points douteux / Réitération de la triangulation
- Marquage des points douteux dans la base ("flag")

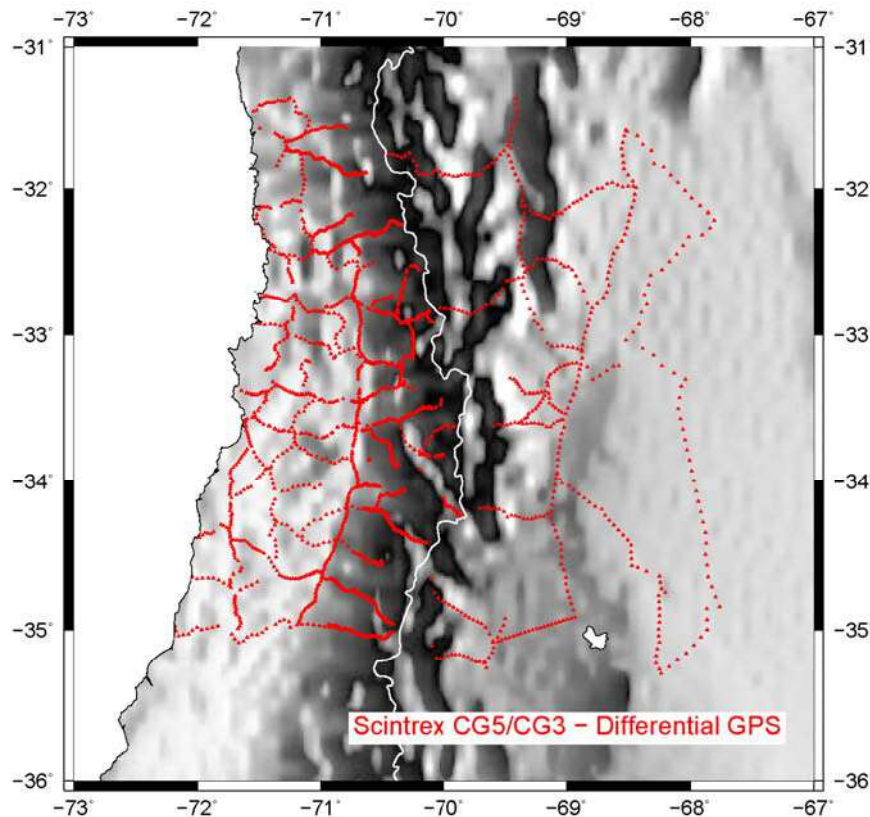


Source : M. Sarrailh (BGI)

Validation des données terrestres

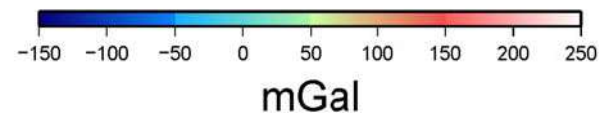
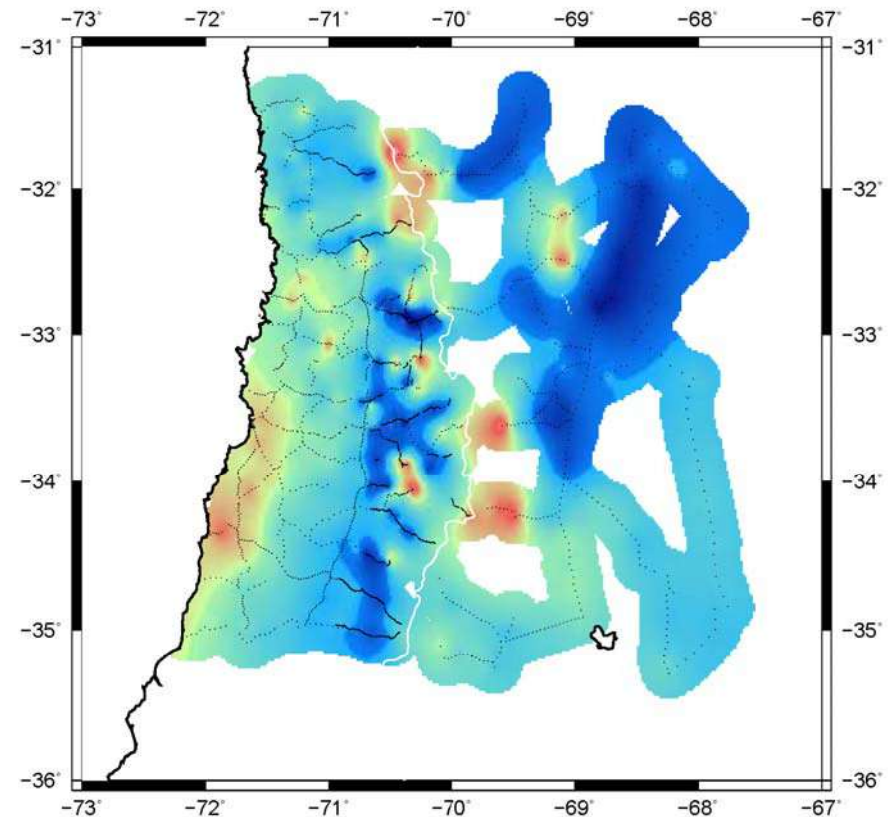
□ **Apport des mesures sol ?** Ex. de campagnes récentes (Andes centrales)

Field Surveys 2006–2009
(UChile/DGF – IRD France)



~ 3500 new field measurements
(gravimètres modernes, positionnement GPS)

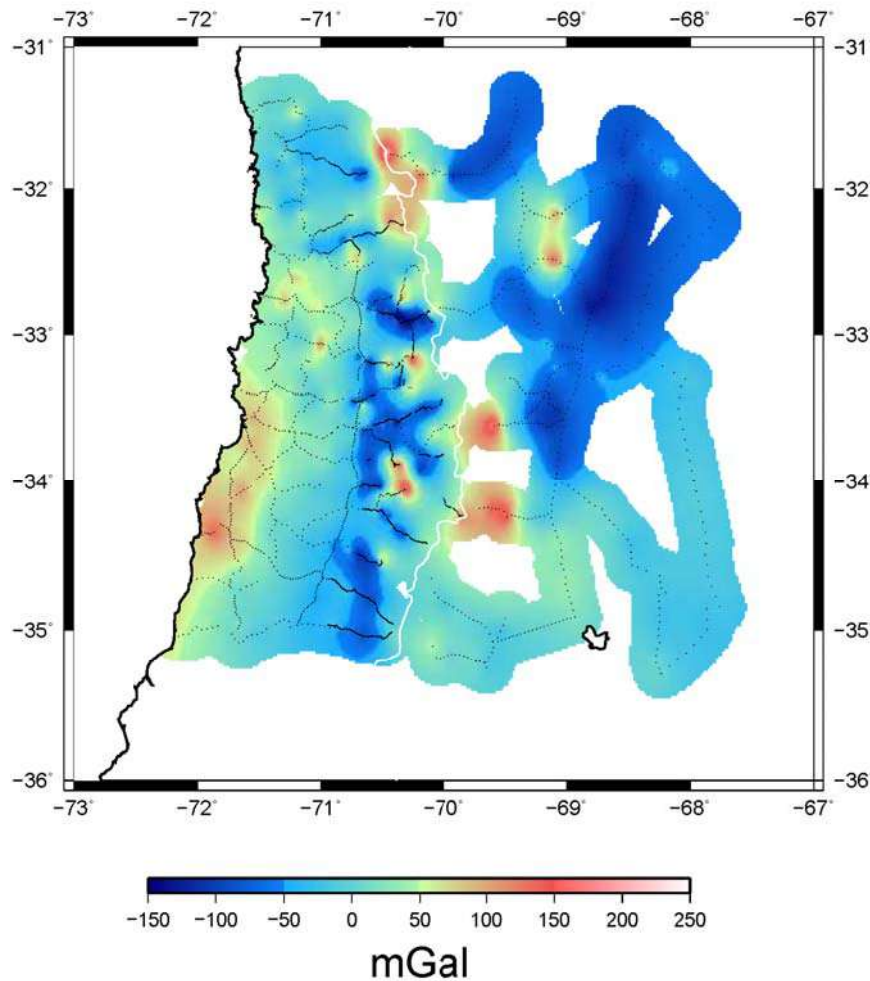
FAA from Field Surveys 2006–2009
(UChile/DGF – IRD France)



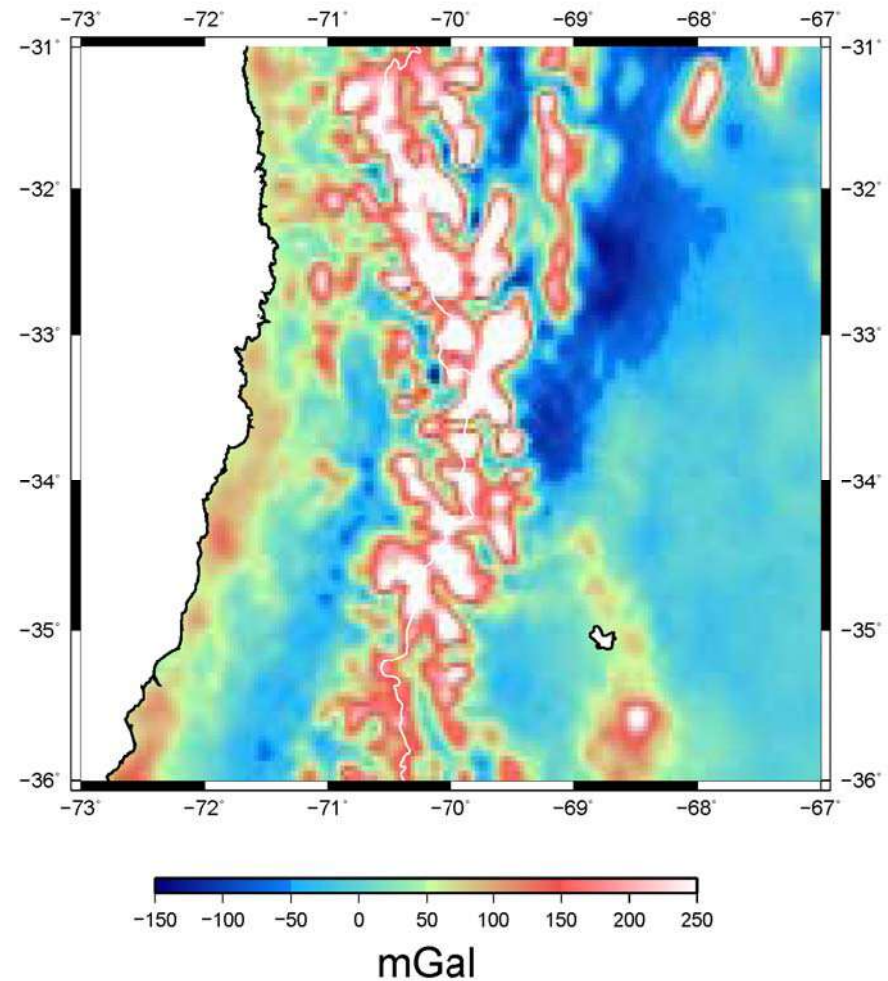
Validation des données terrestres

- ❑ **Apport des mesures sol ?** Comparaison des anomalies (free air)
(mesures sol récentes / modèle EGM2008)

FAA from Field Surveys 2006–2009
(UChile/DGF – IRD France)



FAA from EGM08

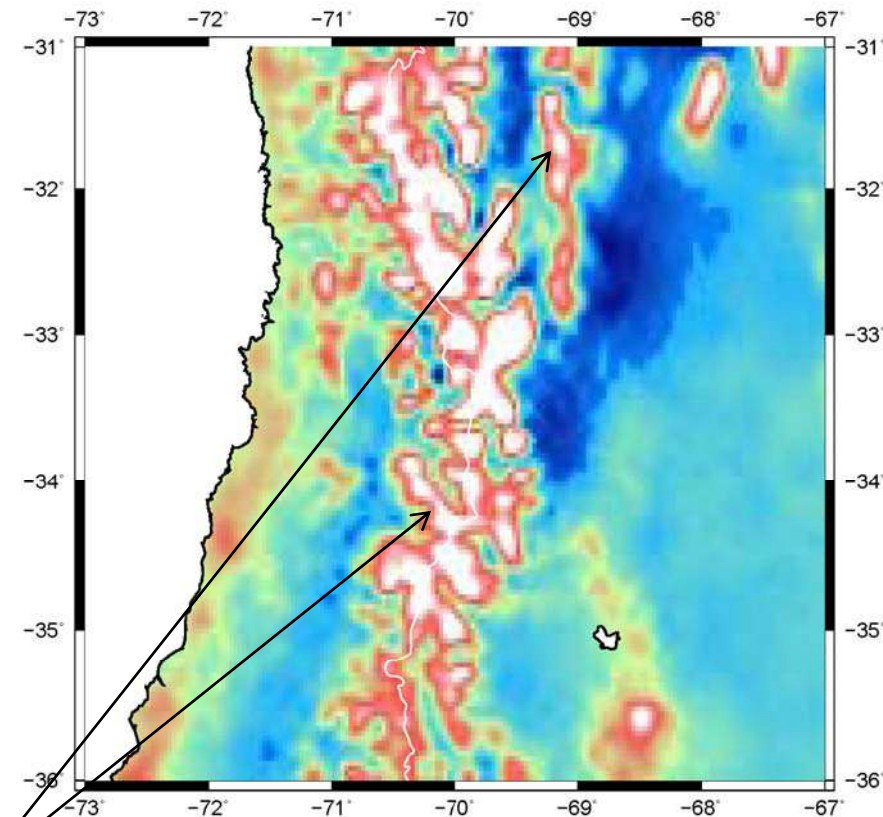
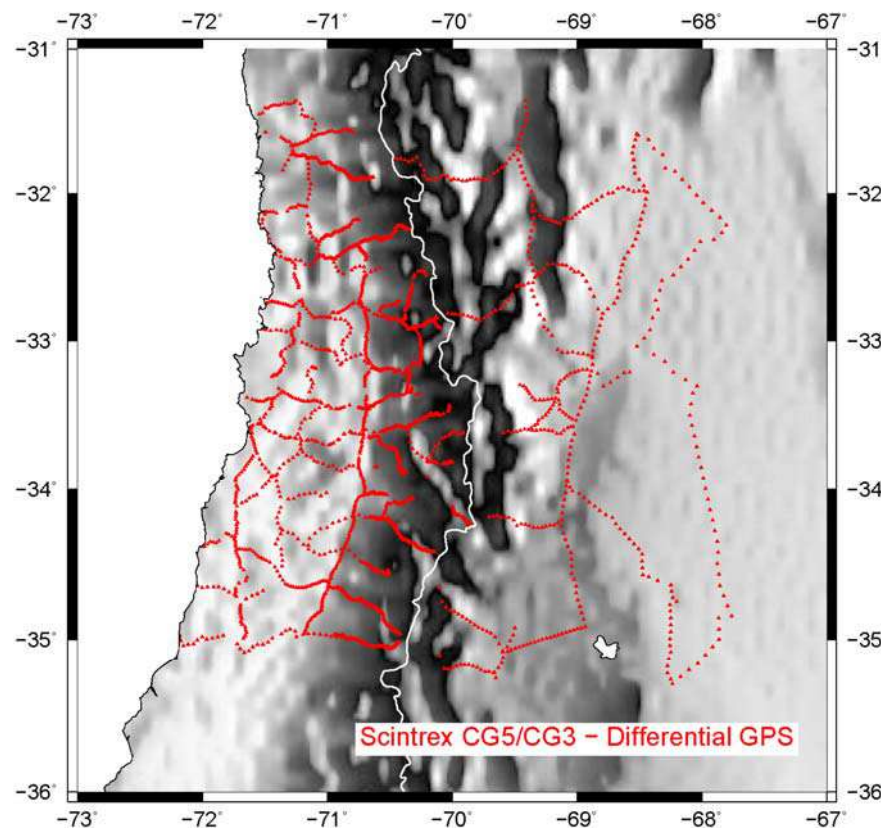


Validation des données terrestres

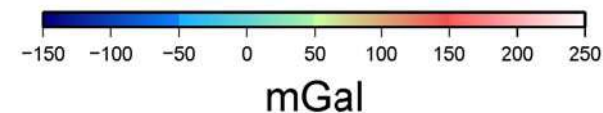
- ❑ **Apport des mesures sol ?** Comparaison des anomalies (free air)
(mesures sol récentes / modèle EGM2008)

Field Surveys 2006–2009
(UChile/DGF – IRD France)

FAA from EGM08



Ex. d'anomalies « artificielles » dans le modèle EGM08
générées par le modèle topographique



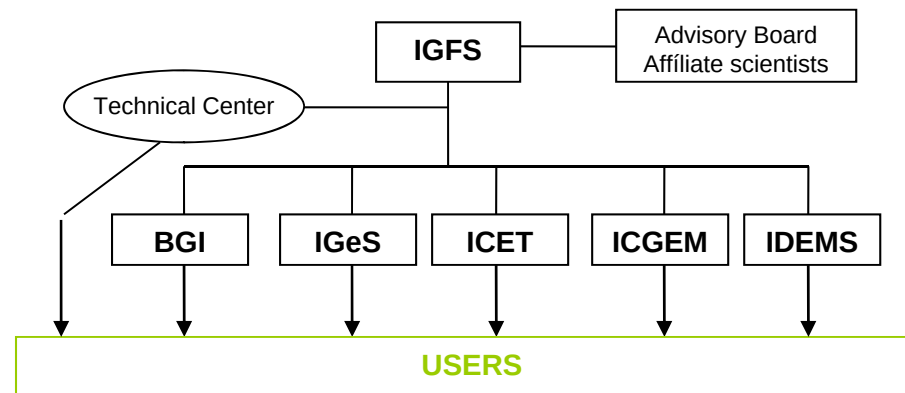
International Gravity Field Service (IGFS)

Création 2003 : regroupement des services gravimétriques de l'IAG



<http://www.iag-aig.org/>

IGFS Structure (Dir. R. Forsberg (Danish National Space Center))



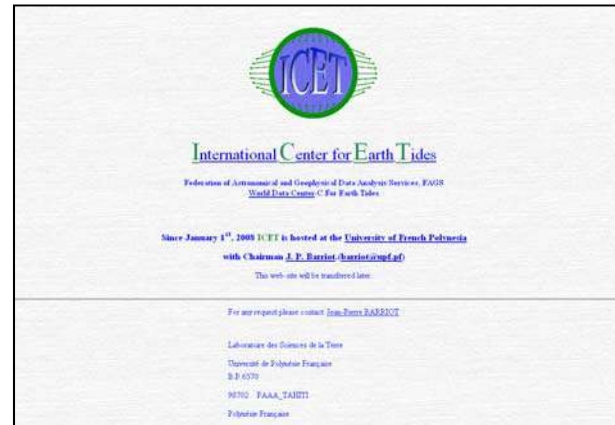
- ❑ International Gravimetric Bureau (BGI) – (*OMP Toulouse, France*)
- ❑ International Geoid Service (IGeS) – (*POLIMI Milani, Italy*)
- ❑ International Center for Earth Tides (ICET) – (*Université du Pacifique, Tahiti*)
- ❑ International Center for Global Earth Models (ICGEM) – (*GFZ Potsdam, Germany*)
- ❑ International DEM Service (IDEMS) – (*DeMontfort University, UK*)
- ❑ Technical Center of the IGFS – (*NGA S^t Louis, USA*)

International Gravity Field Service (IGFS)

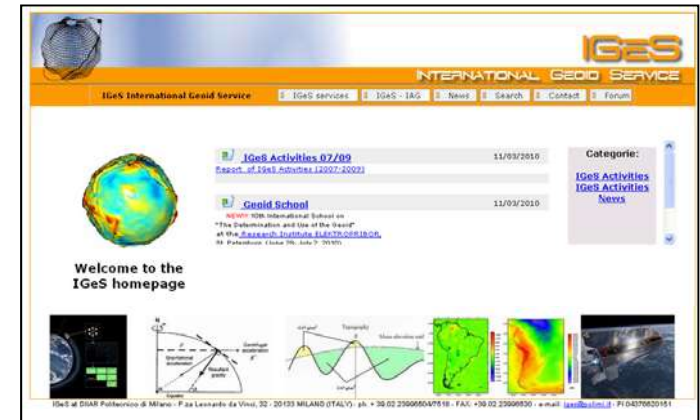
Services contribuant à l'IGFS



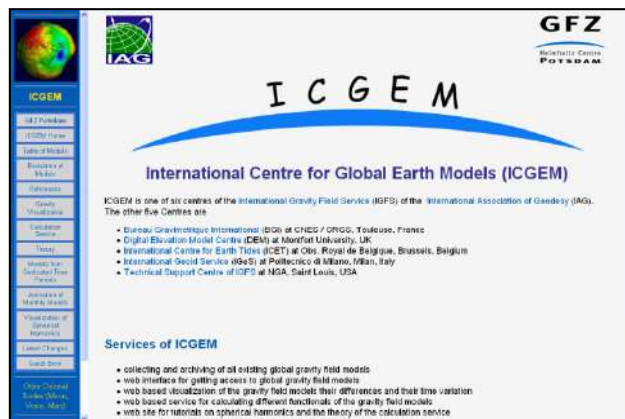
International Gravimetric Bureau
<http://bgi.omp.obs-mip.fr>



International Center for Earth Tides
<http://www.astro.oma.be/ICET/>



International Geoid Service
<http://www.iges.polimi.it/>



International Center for Global Earth Models
<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>



International DEM Service
<http://www.cse.dmu.ac.uk/EAPRS/iag>



National Geospatial Intelligence Agency
<http://earth-info.nima.mil/GandG/>

International Gravity Field Service (IGFS)

IGFS role and procedures (IGFS/GGOS meeting, 2008)



Satellite missions

- IGFS participation to the **design of satellite gravity missions**
- IGFS participation **with GRACE, GOCE (and future missions) for data reduction (error analysis, data filtering, geopotential model development,...) and data validation and calibration (ground truth)**
- Study and promote **future satellite gravity missions**
- Provide **global earth gravity models (static and time varying)**
- Improve **regional gravity models by combining and integrating satellite, airborne and terrestrial measurements**
- Integrate **gravity field and altimetry missions**
- Integrate **gravity field and satellite derived DTMs (e.g. SRTM)**



IAG Services

- Provide **relative and absolute gravity data**
- Provide **static and time varying global gravity field models**
- Provide **regional high resolution geoid models**
- Provide **tide parameters and models**
- Provide **Digital Elevation Models**
- Provide **tools for data validation and evaluation**



Standards and Conventions

- Define **standards for gravity data observation procedures**
- Define **data reduction** (tides, atmosphere, ...)
- Define **data exchange format and archive**
- Define **the standards for associated data (pressure, hydrology...)**
- Define **data processing methods** (adjustment,...)
- Define **gravity anomaly/disturbance computation (free-air, Bouguer)**
- Define **the gravity reference system (replace IGSN71)**
- Define **the geopotential reference system (W0, GRS80)**
- Evaluate and recommend **relevant geophysical models**



Networks and Communications

- Design and realization of **the global absolute gravity network**
- Design and realization of **the global superconducting gravity network**
- Contribute to **the definition and realization of the global height system**
- Contribute to **the GGOS co-located site network (AG, SG, W,...)**
- Provide **gravity field parameters at tide gauge stations**
- Integrate **gravity and leveling networks**
- Contact **with external networks (oceanic, atmospheric, hydrologic)**
- Making **gravity data, gravity models and products available**
- Organize **schools on gravity and geoid**
- Making **SW and tutorials for gravity and geoid analysis available**
- Communication and coordination **among GGOS components**

International Center for Earth Tides

<http://www.astro.oma.be/ICET/>

❑ Données

- Séries temporelles de réseaux de gravimètres relatifs + (tilt, strain, barometric...)
- Lien avec GGP (Global Geodynamics Program) : gravimètres supra-conducteurs

❑ Modèles

- Prédictions des effets de surcharge océanique
- Facteurs de marées pour des stations données
- Modèles : [SCW80](#), [CSR3](#), [FES95](#), [ORI96](#), [CSR4](#), [NAO99](#), [GOT00](#), [FES02](#), [TPX06](#), [FES04](#))

❑ Logiciels (Analyse et traitement de données de marée, modèles...)

- T-Soft
- Tidal prediction
 - Theoretical Tidal Computation (MT80TW)
 - Tidal Gravity Parameters (WPARICET)
- ETERNA
- VAV_05
- EDAT_HiCum
- EDAT_MGR (MdasGrapher)

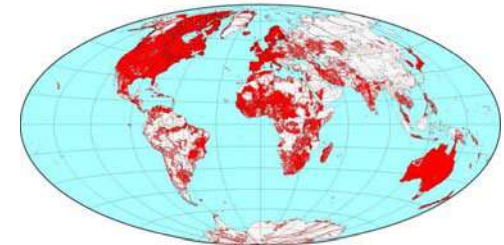
❑ Bibliographie / Bulletin des Marées Terrestres (BIM)

Bureau Gravimétrique International

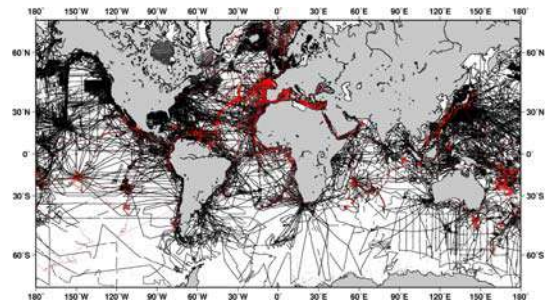


<http://bgi.omp.obs-mip.fr>

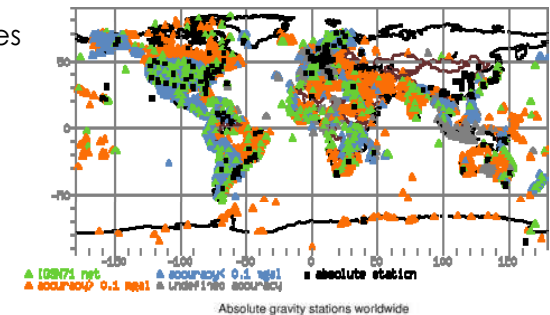
Mesures gravimétriques
terrestres
(2,3 millions de points)



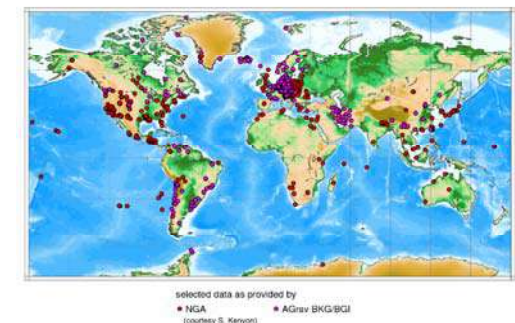
Mesures gravimétriques
marines
(10,5 millions de points)



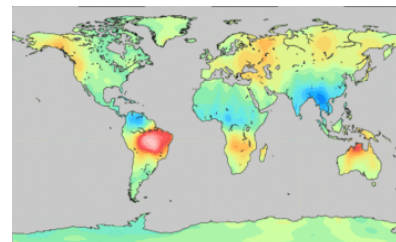
Stations gravimétriques
de référence
(>4500 stations)



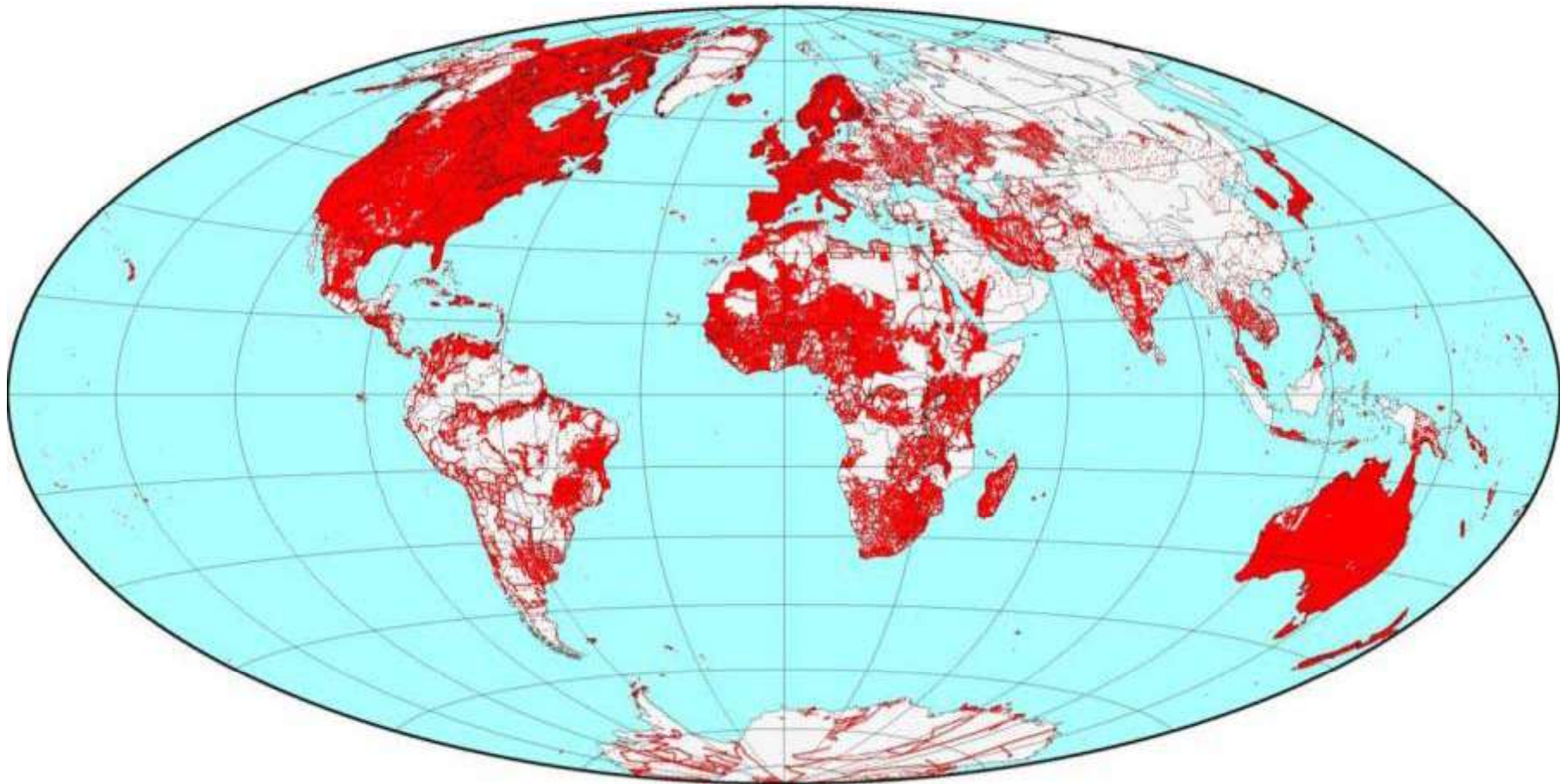
Mesures gravimétriques
absolues



Solutions GRACE
CNES/GRGS

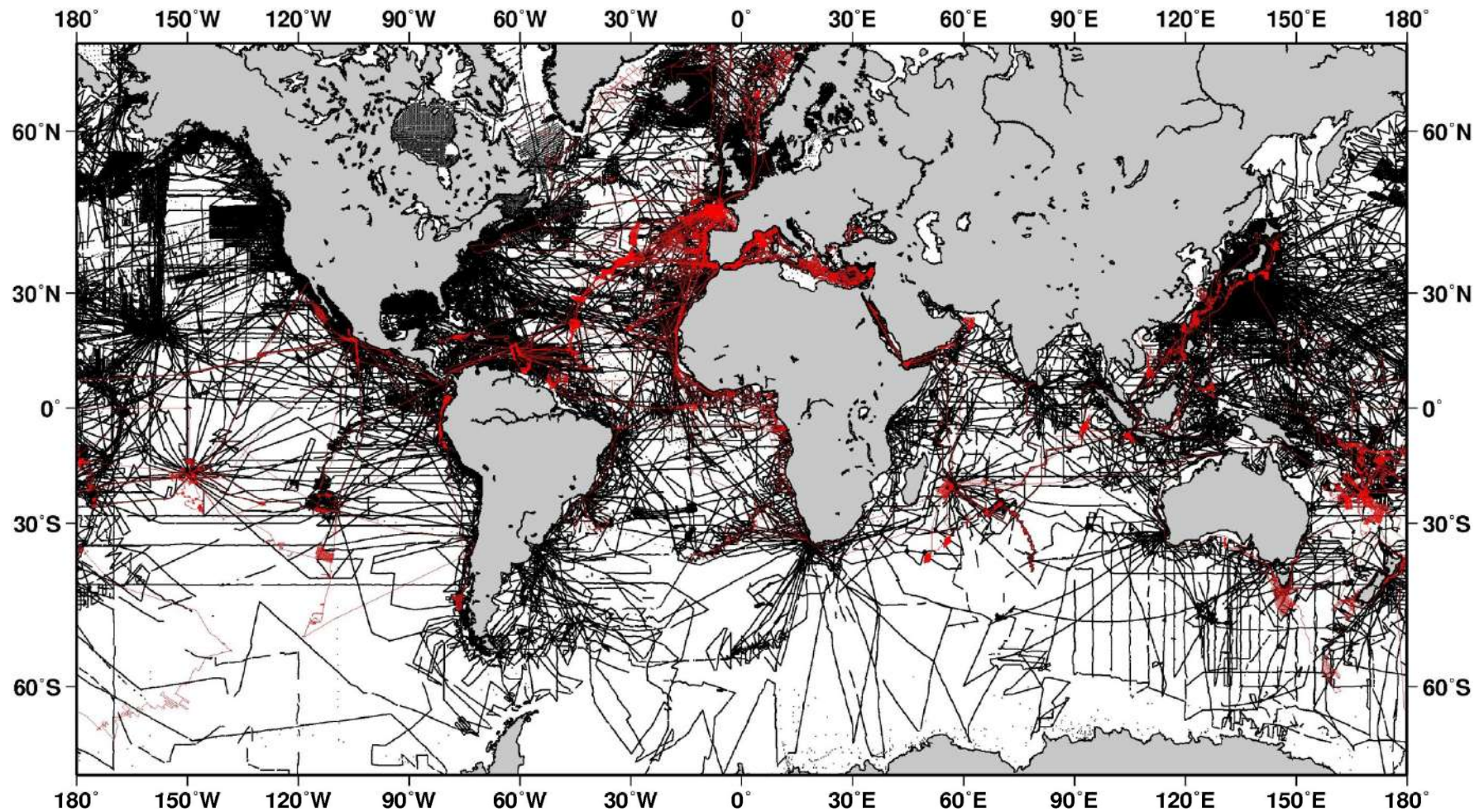


□ Mesures gravimétriques (relatives) terrestres



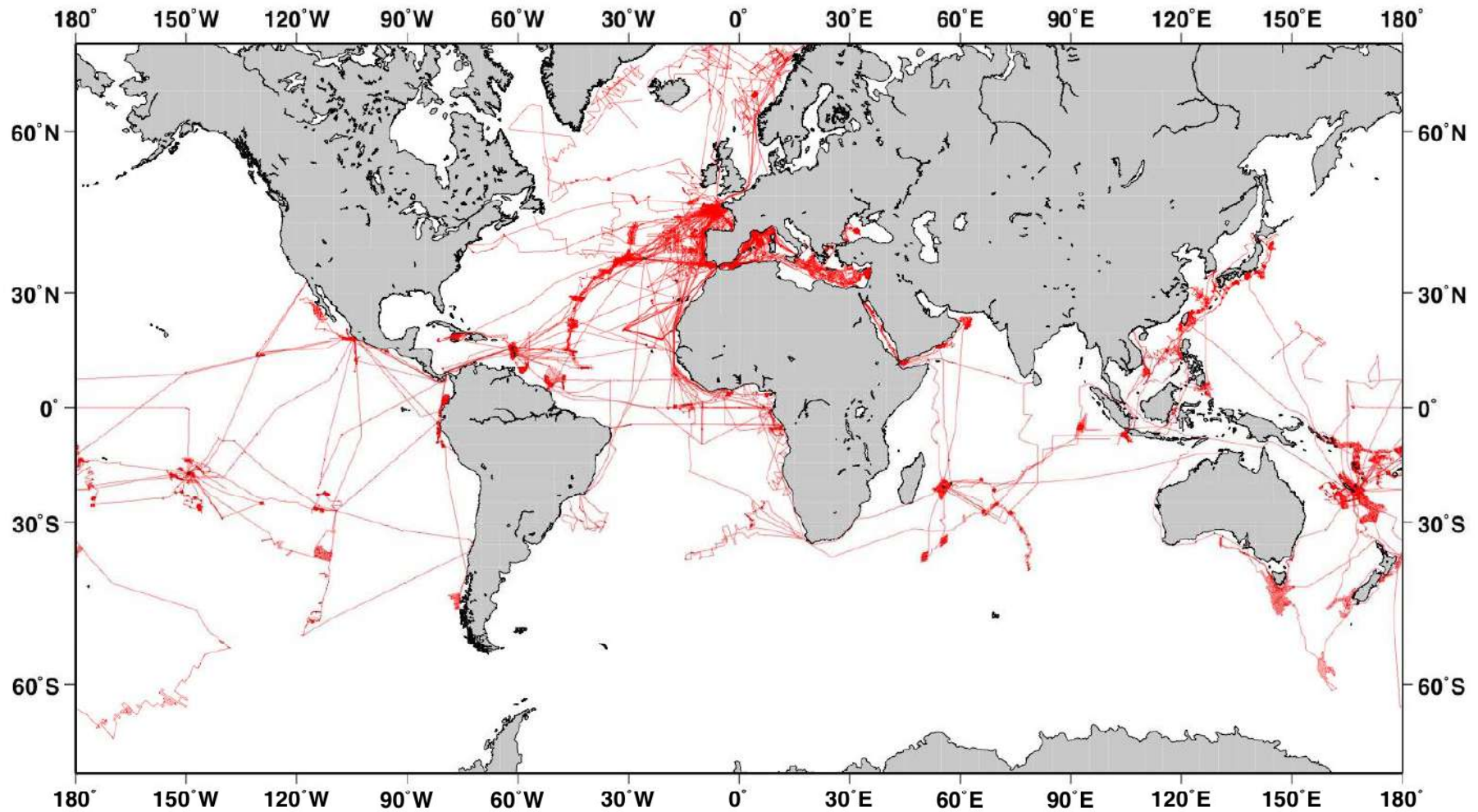
Mesures gravimétriques terrestres
(2,3 millions de points)

□ Mesures gravimétriques (relatives) marines



**Mesures gravimétriques marines
(10,5 millions de points)**

□ Mesures gravimétriques (relatives) marines

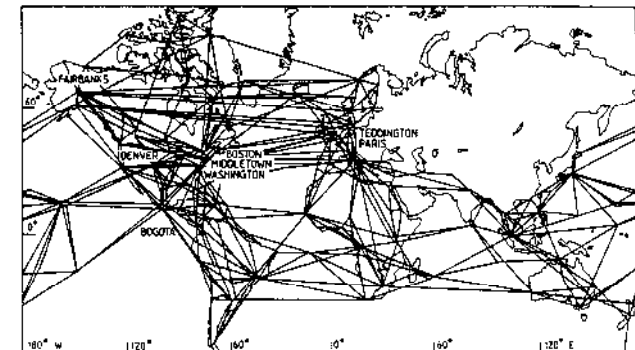
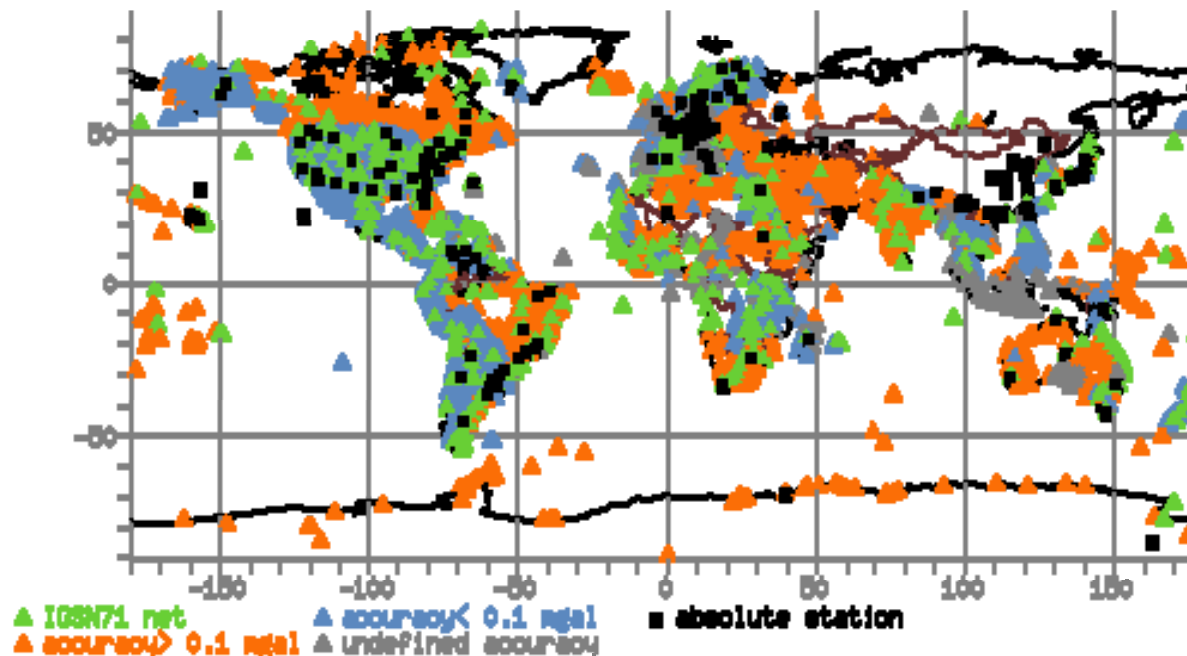


Ex: Campagnes océanographiques françaises (Ifremer)

Bureau Gravimétrique International

□ Stations de référence (> 4500 stations)

- Collectées, archivées, monographies scannées
- Mesures précises définissant un réseau global (Potsdam, IGSN71), mesures absolues
- Points géodésiques, monuments stables (églises !), sites accessibles (aéroports, ports...)



Rattachement de campagnes relatives terrestres, campagnes océanographiques (ports)

Bureau Gravimétrique International

□ Stations de référence (Accès aux coordonnées, valeurs de g, monographies...)

**Bureau Gravimétrique International**
International Gravimetric Bureau

OVERVIEW | DATA / PRODUCTS | ACTIVITIES | PUBLICATIONS | EVENTS | CONTACTS | LINKS

International Gravimetric Bureau / Data / Products / Gravity Databases / Reference Gravity Stations

BGI DATABASE - Reference station :

Absolute stations

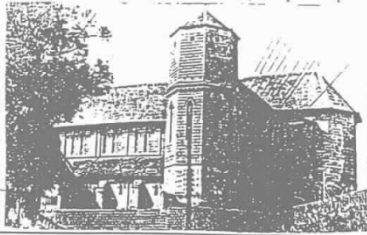
number	name	iagbn	latitude degree	longitude degree	altitude meter	mean g µgal	sketch
500225	AKUREYRI 1031		65.69000	-118.11000	20.00	982339644	
500173	ALICE SPRINGS AA	1413	-23.75890	133.88420	550.00	978630791	
500174	ALICE SPRINGS XA	1413	-23.75890	133.88420	550.00	978642761	
500196	ALTENWALDE 812		53.81000	8.67000		981374569	
500001	ANTANANARIVO	512	-18.91640	47.51640	1382.44	978207626	
500015	ATLANTA AA		33.77430	-84.39460	289.00	979515703	
500016	ATLANTA AB		33.79110	-84.32550	271.40	979524459	
500017	ATLANTA AC		33.81190	-84.14280	297.00	979525883	
500197	AURICH 1322		53.43000	9.50000		981356724	
500018	AUSTIN AA		30.28750	-97.73970	166.10	979277629	
500019	AUSTIN AB		30.38900	-97.98100	195.10	979267415	
500198	BAD HOMBURG AA		50.22000	8.01100	100.00	981000423	
500221	BAD HOMBURG AA		50.22810	8.61110	188.00	981055127	
500280	BAIJATAN (BEIJING)		40.02000	116.17000	200.00	0	
500261	BAKSAN		43.70000	43.55000		979910000	
500271	BAOSHAN	6506	25.12000	99.15000	1730.00	978387850	
500199	BARIENRODE 432		53.00000	0.00080		981230746	
500020	BEDFORD		41.23000	-73.61000		980378671	
500119	BEIJING BAIJATAN	1205	40.01830	116.17170	197.60	980110577	
500120	BEIJING XIANGSHAN		39.90000	116.20000	164.00	980129265	
500121	BEIJING YUYUANTAN CGBN85 NO.0810		39.90000	116.40000		980119647	
500122	BEIJING, XIANGSHAN		39.90000	116.40000		980129266	
500200	BENTHEIM 1312		52.30000	7.17000		981275908	
500021	BERGEN PARK AA		39.69940	-105.37310	2329.30	979469069	
500085	BERMUDA AA		32.37000	-64.69500	6.60	979807068	
500022	BLACKSBURG AA		37.21130	-80.42050	624.00	979715722	
500023	BOSTON A		42.45210	-71.27070	70.10	980378704	
500024	BOSTON AB		42.61330	-71.49390	96.60	980376473	
500025	BOULDER AA		40.00780	-105.20630	1034.00	979008545	
500026	BOULDER AE		40.01670	-105.25000	1802.00	979617234	

International Absolute Gravity Basestation Network (IAGBN)

Station Location: Antananarivo Country: Madagascar

$\varphi = 18^{\circ} 54' 59'' \text{ S}$ $\lambda = 47^{\circ} 30' 59'' \text{ E}$ $H = 1382,445 \text{ m}$ $g = 9.78207626 \text{ ms}^{-2}$

Overview / Access / Outside View / Topo Map



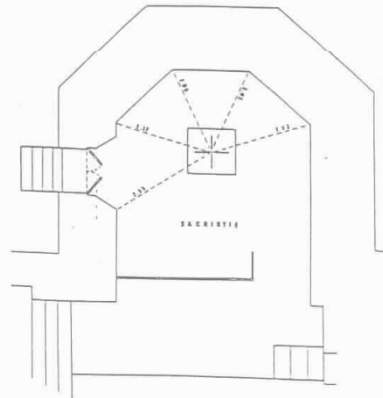
Remarks / Station Identity / Contact

Sacristy of the Anglican Cathedral St. Laurent at Ambohimano, Antananarivo

River at the centre of a slab of marble (1 m · 1 m)

Contact: Prof. S. Andriamihaja, Comité National de Géodésie et Géophysique, Secrétariat, B.P. 323, Antananarivo. Tel. 2 29-35

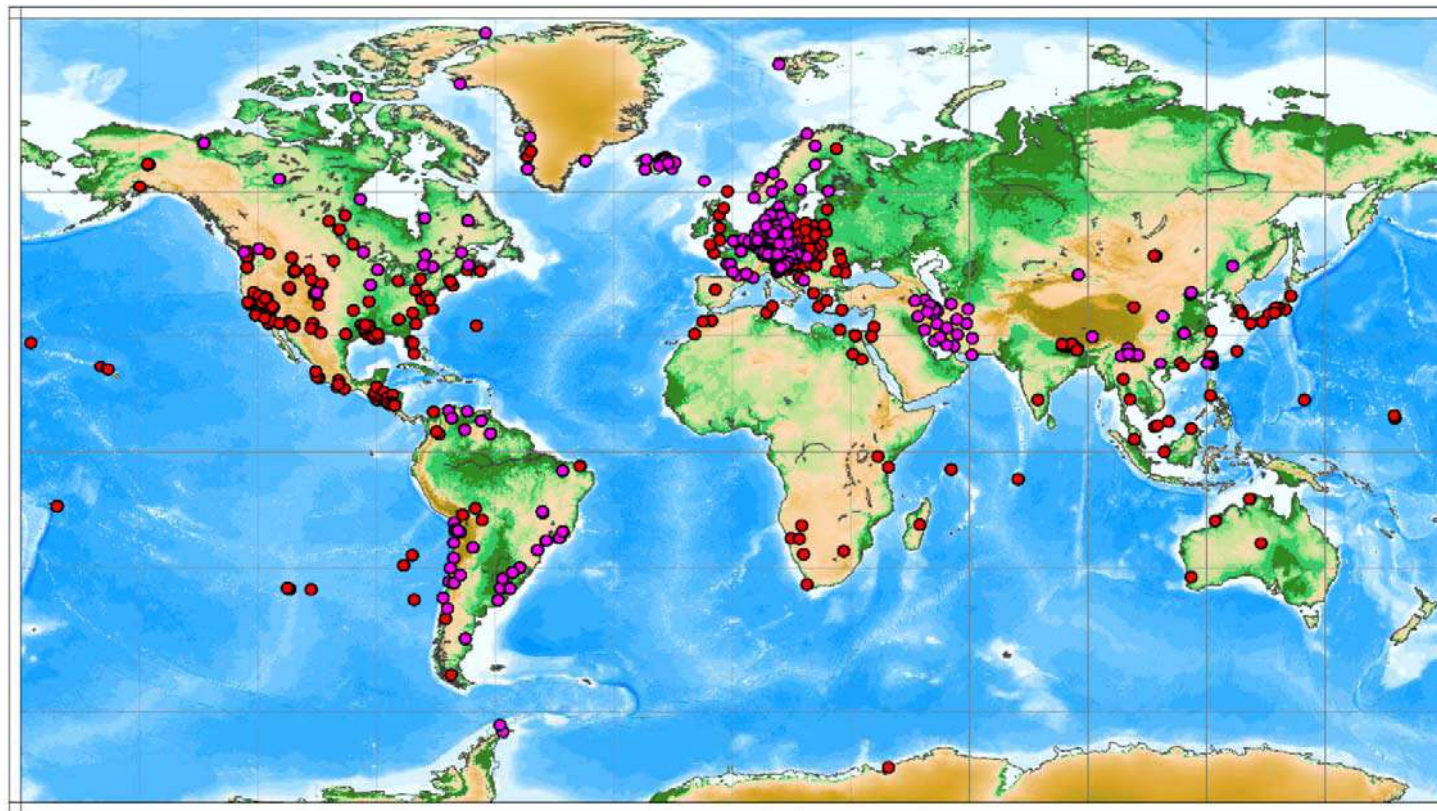
Detailed Sketch (North? Station Marker?) / Photograph



Date / Author: November 1988

□ Mesures gravimétriques absolues

Absolute gravity stations worldwide



selected data as provided by

● NGA ● AGrav BKG/BGI
(courtesy S. Kenyon)

Vers la définition d'un réseau gravimétrique global absolu (remplacement IGSN71)

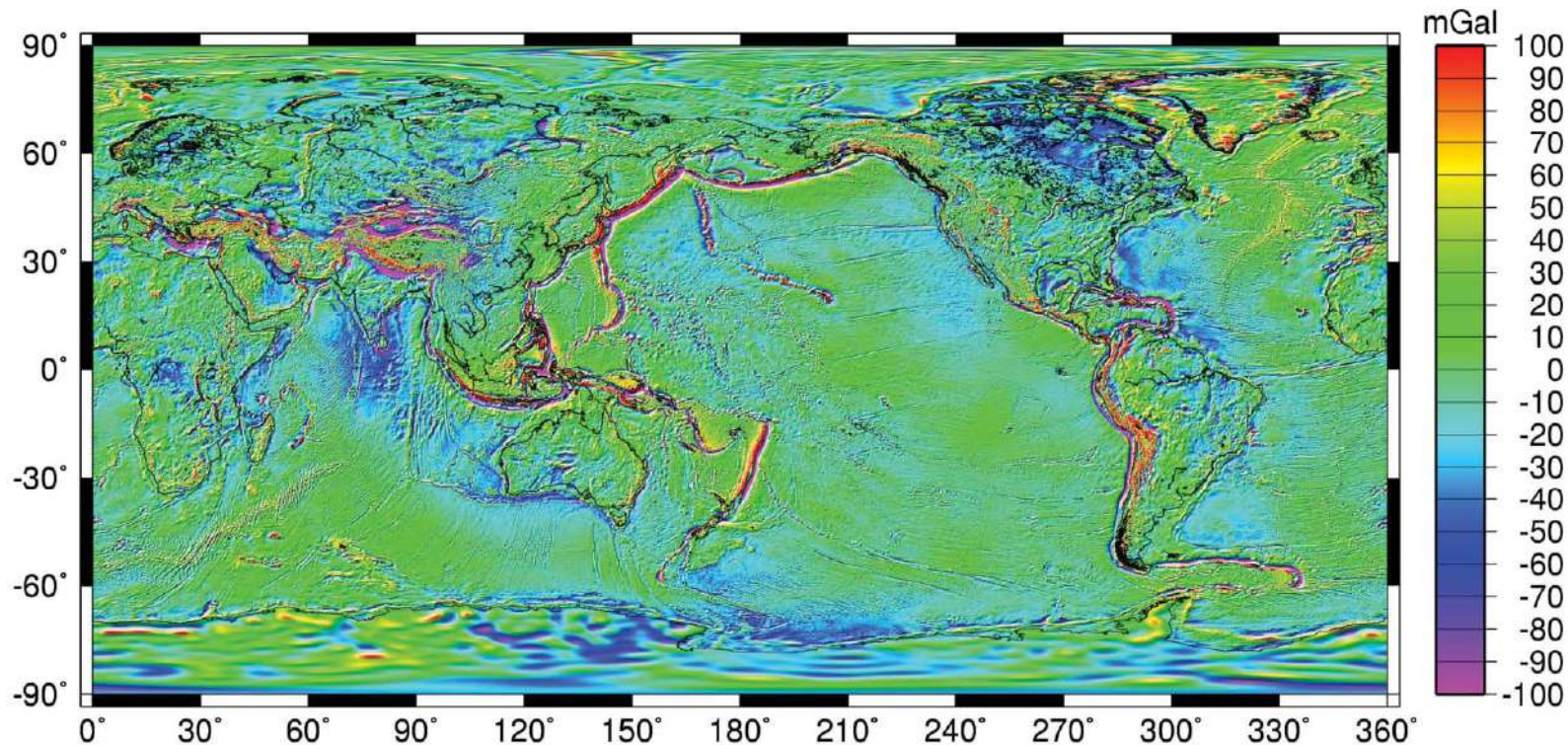
National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) → EGM2008

Modèle HS du géoïde (degré et ordre 2159) – 5'x5' geoid and free air gravity anomalies
Satellite data – Altimetry data – Gravity data (Terrestrial – Marine – Airborne)

(Pavlis et al., EGU Vienna, April 2008)



Free-air Gravity Anomalies From the
Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)

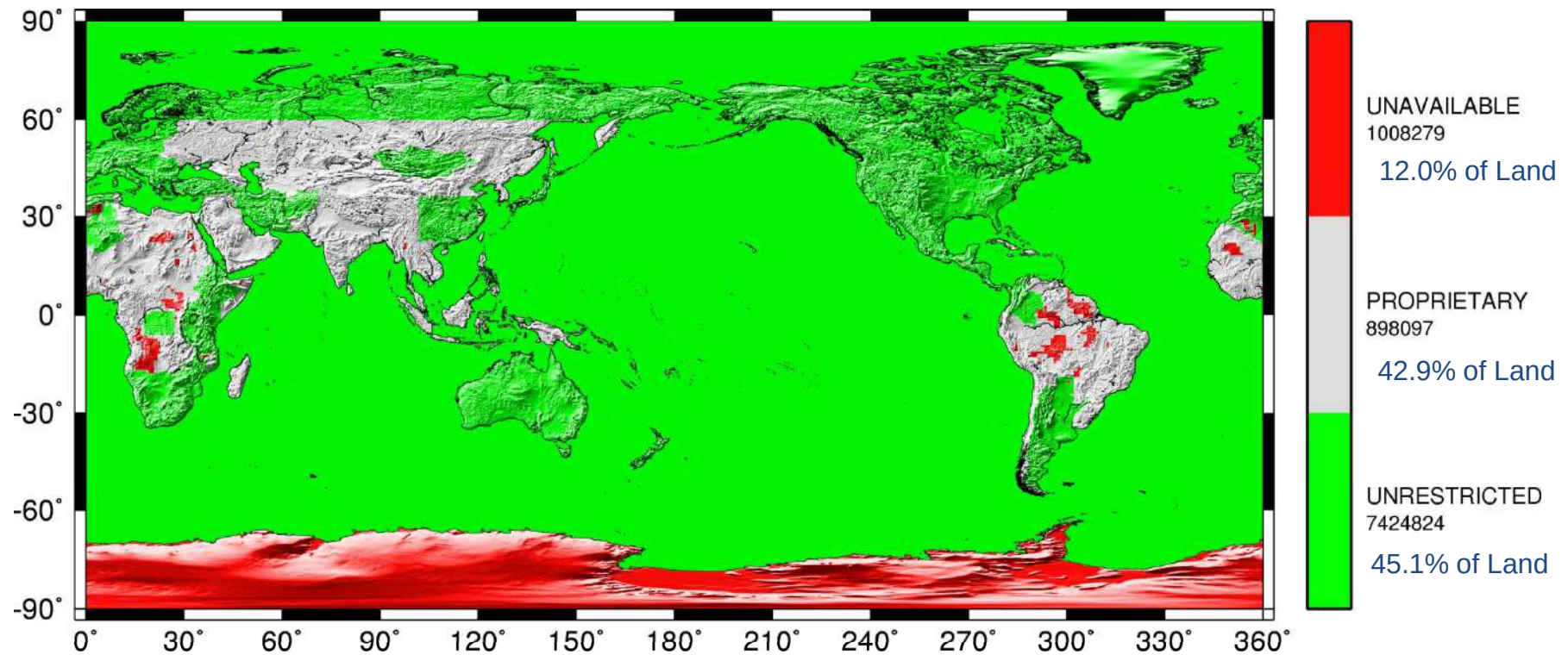


Free-air gravity anomalies computed from EGM08, averaged over 5 arc-minute by 5 arc-minute cells on the surface of the Earth. A gravity anomaly is the difference of actual (observed) gravity from a nominal (theoretical) value. The unit is "milliGal" (denoted mGal, where $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$), which corresponds approximately to 1 part per million of the gravity acceleration sensed by an observer on the Earth's surface. Notice the numerous geophysical features that are revealed, such as oceanic trenches, ridges, subduction and fracture zones, and seamount chains.

Meilleur modèle gravimétrique global haute résolution existant !

National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) → EGM2008

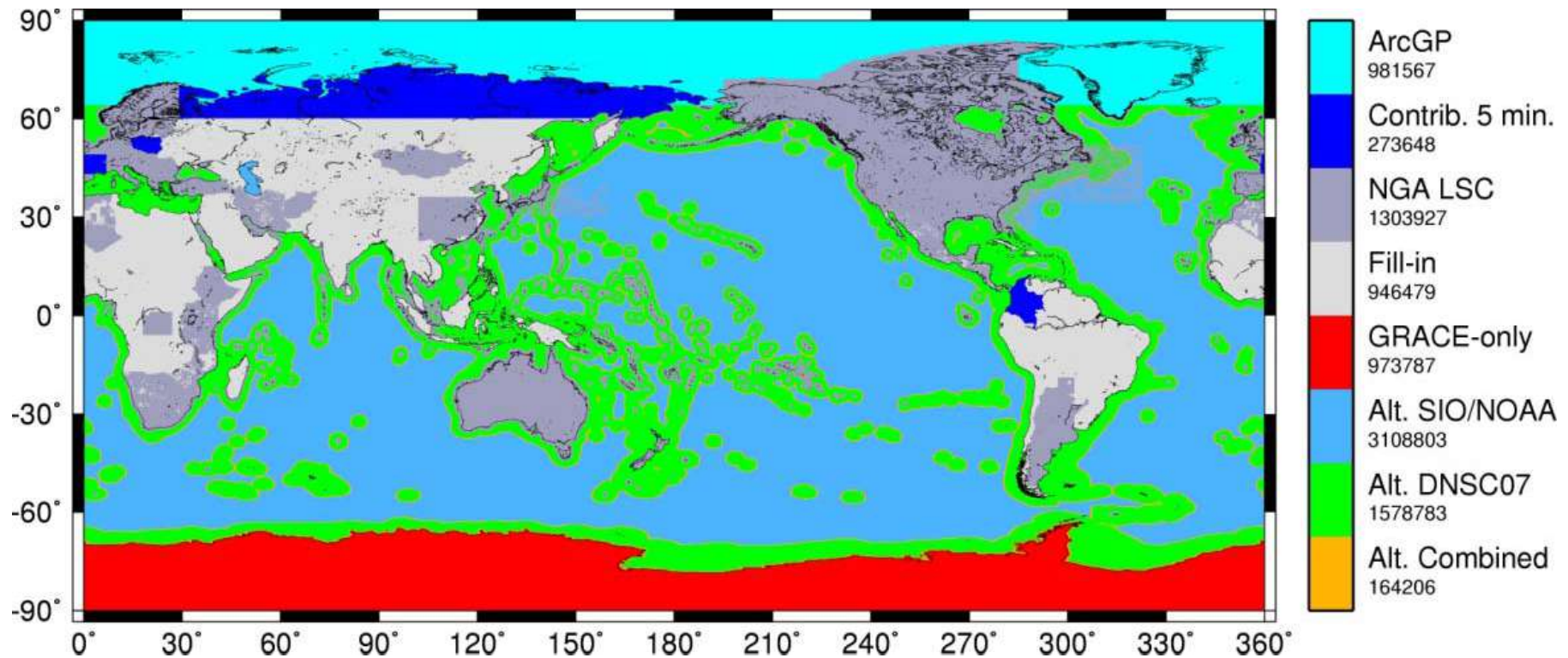
EGM2008 : 5'×5' Δg Data Sources



Source : Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008

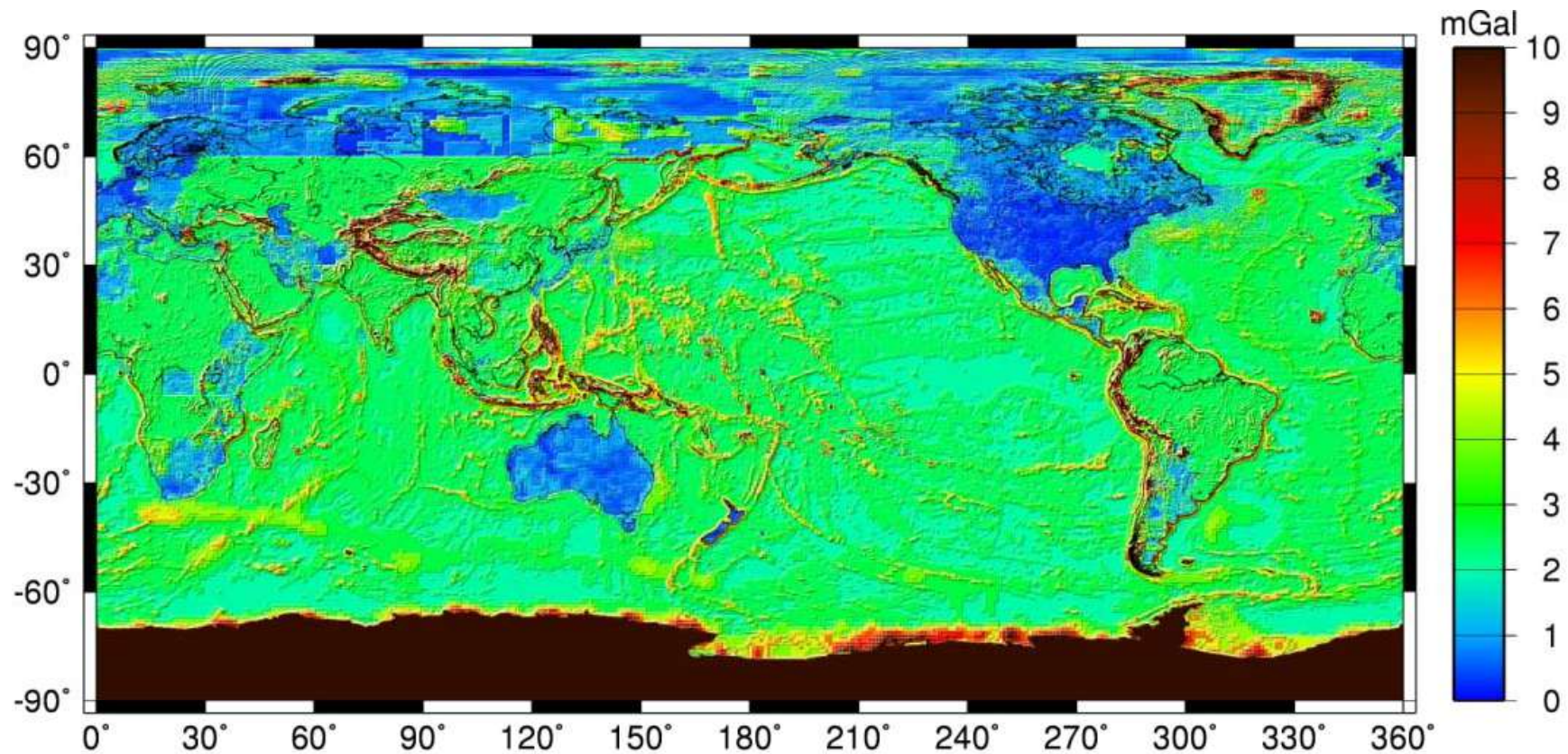
National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) → EGM2008

EGM2008 : Coverage distribution for the EGM2008 5'x5' grid



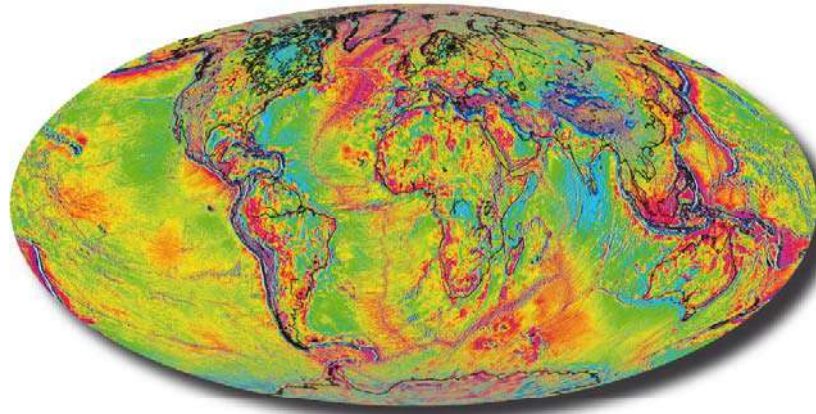
Source : Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*

EGM2008 : Standard deviation



Source : Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008

World Gravity Map (WGM) project



❑ Project initiated in 2008 – Carried out in collaboration between :

- International Gravimetric Bureau (BGI)
- Commission for the Geological Map of the World (CGMW)
- IAG International Gravity Field Service (IGFS)
- National Geospatial Intelligence Agency (NGA)



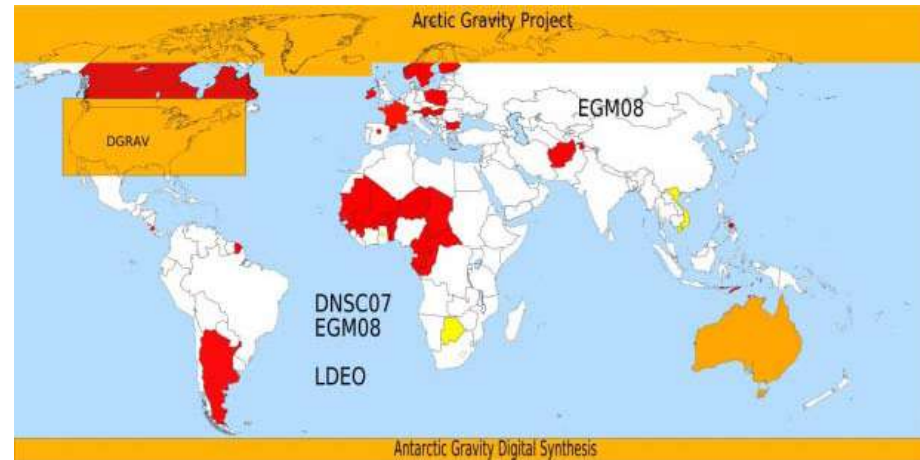
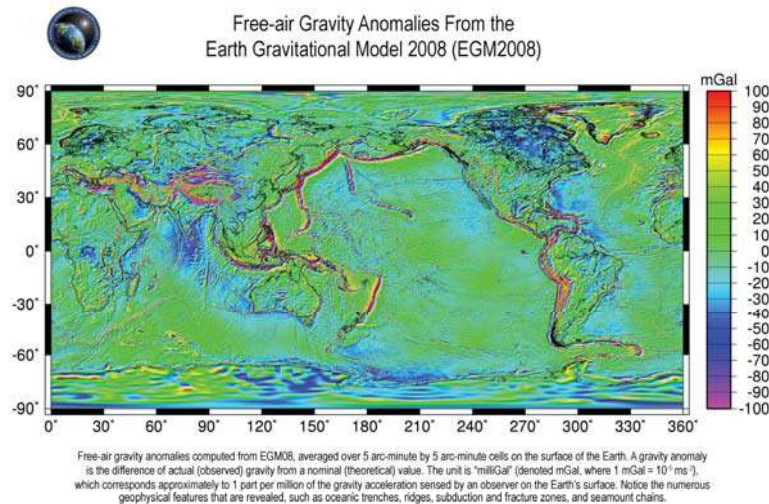
❑ Objectives

Contribute to the effort of CGMW and UNESCO in providing homogeneous and up-to-date global data grids and maps for educational and research purposes (non commercial)

Global high resolution maps and digital grids of gravity anomalies (Free Air, Bouguer)
Expected resolution 3'x3'

World Gravity Map (WGM) project

❑ Initial model : EGM08 / Possible improvements of data coverage in specific



❑ Bouguer computations / Terrain corrections

Objectives : Global Approach / Spherical computations / Precise corrections

Tests and comparisons of different approaches

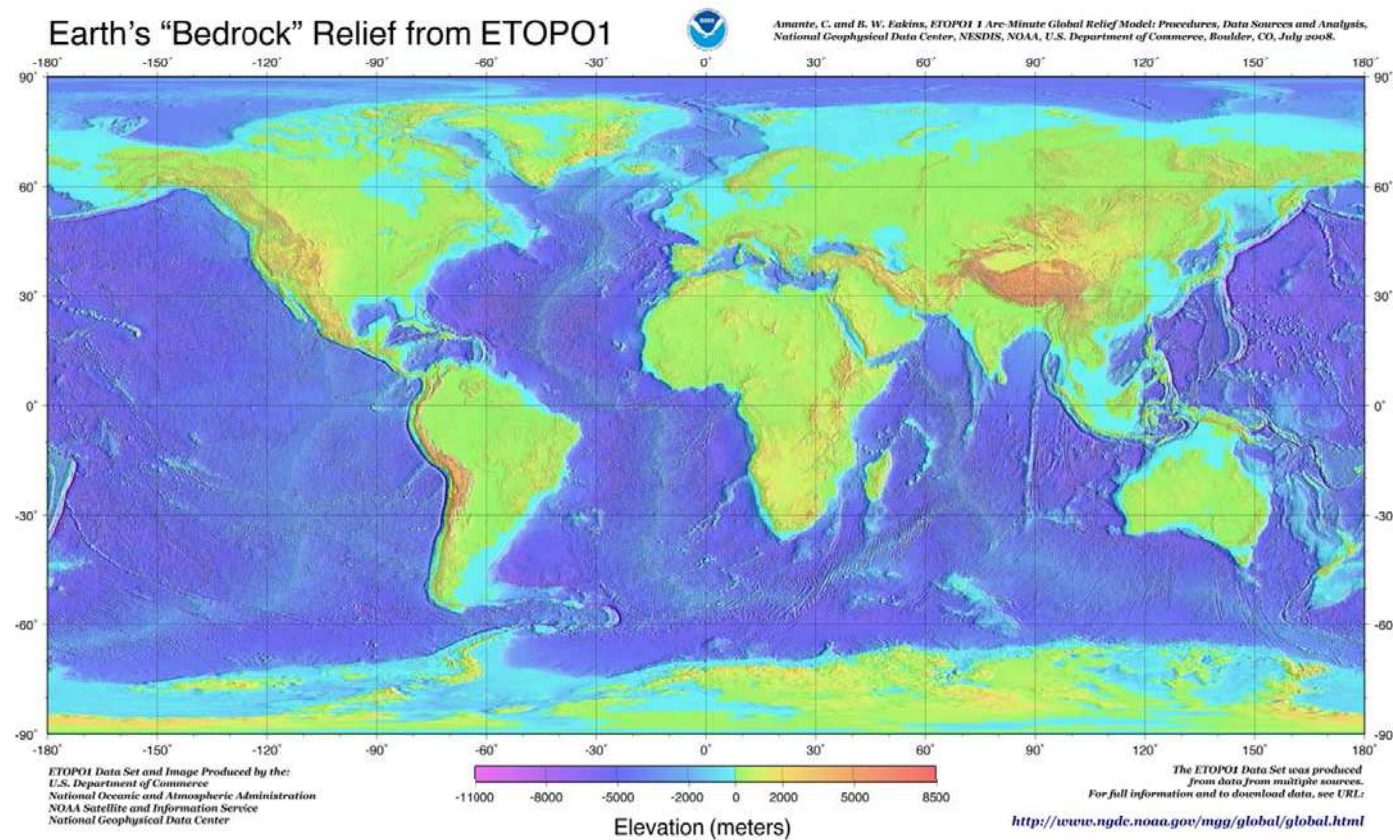
- Planar / Spherical computations
- Direct approach / Spherical Harmonic approach (G. Balmino)

World Gravity Map (WGM) project

□ Bouguer computations / Terrain corrections

Gravity effects of main mass contributions

- Surface topography, oceanic areas, ice cap, great lakes...
- ETOPO1 (surface topography, bed rock), SRTM / Altimetry data (lake surface)



World Gravity Map (WGM) project

Comparison of software for terrain corrections (Test case : Gibraltar Strait)

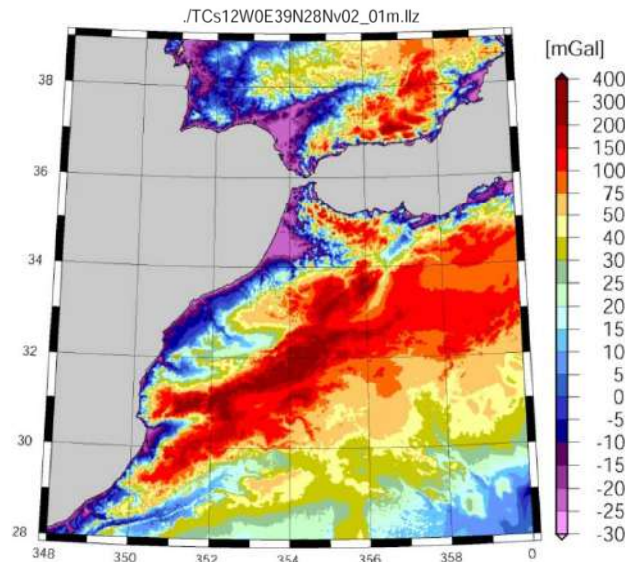


Fig. 3: Spherical terrain corrections. Min: -26.026 mGal, Max: 405.412 mGal, Mean: 26.688 mGal, Stdv: 58.463 mGal CPU-time: 15h 25m 16s (2GHz unix machine with 16 GB ram)

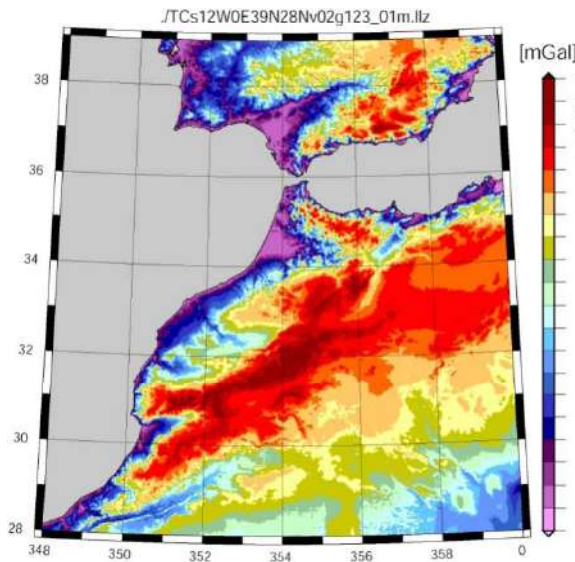


Fig. 5a: Contribution of the far-zone to the spherical terrain correction. Min: -25.853 mGal, Max: 383.723 mGal, Mean: 26.167 mGal, Stdv.: 57.476 mGal

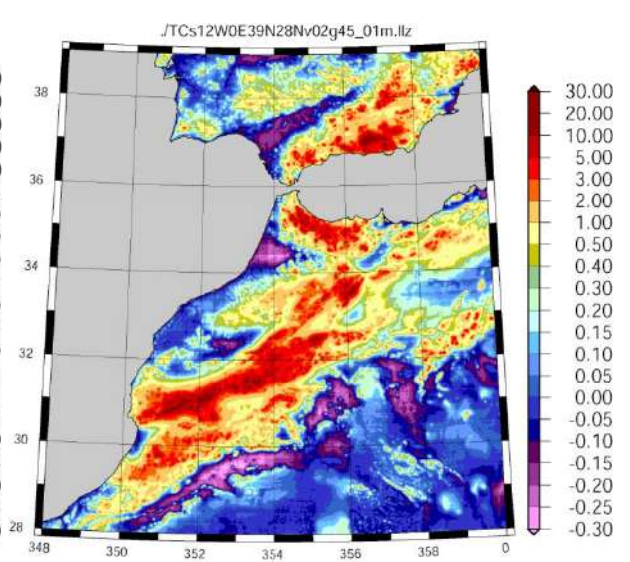


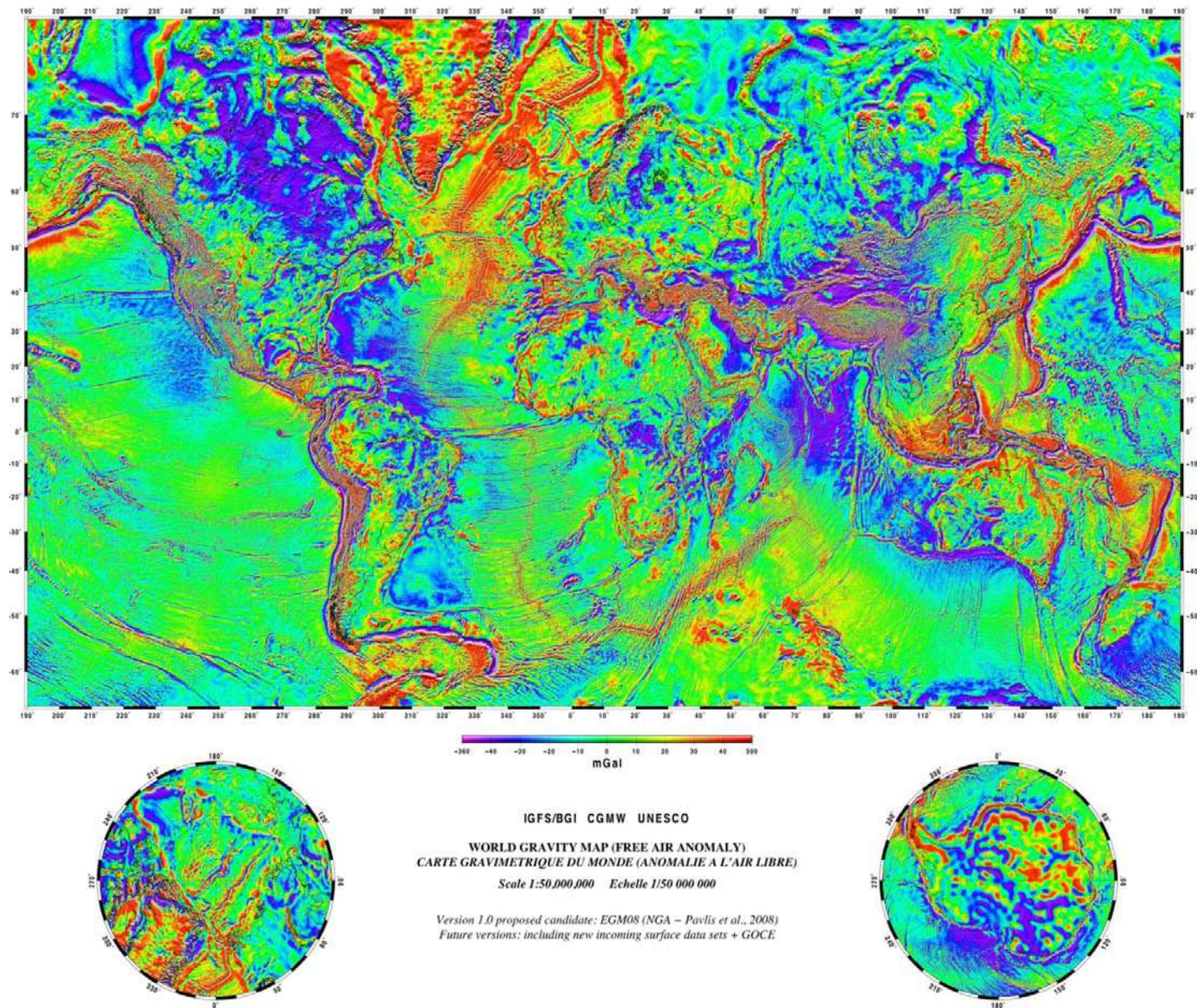
Fig. 5b: Contribution of the near-zone to the spherical terrain corrections. Min: -0.334 mGal, Max: 30.245 mGal, Mean: 0.521 mGal, Stdv.: 1.460 mGal

Source : M. Kuhn, Curtin University, Australia

**Terrain correction, complete Bouguer anomaly
(spherical geometry)**

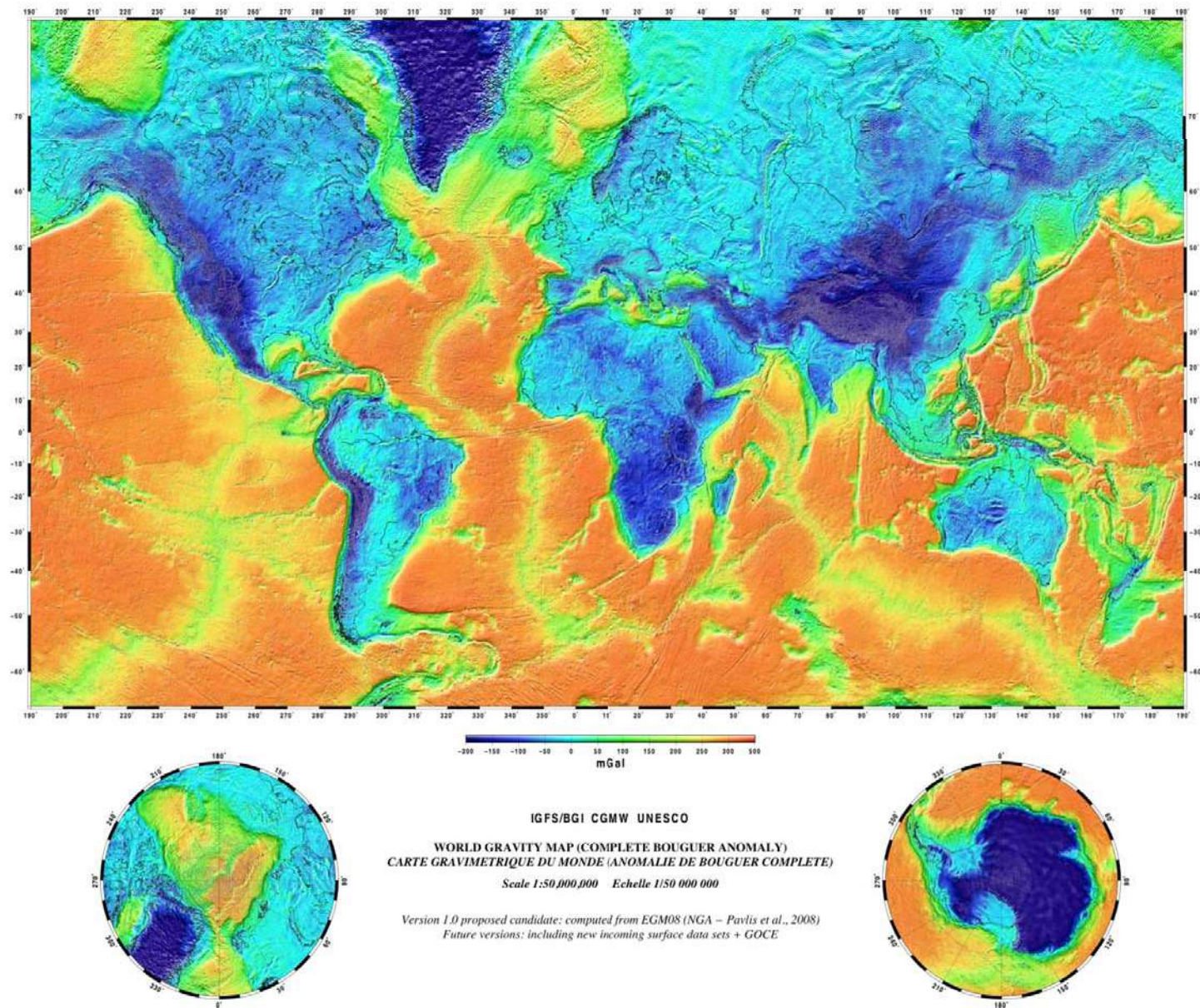
World Gravity Map

□ Resulting Free air gravity anomaly



World Gravity Map

□ Resulting complete Bouguer gravity anomaly



Liens utiles sur la gravimétrie

Gravity Software

Free software

[Computers & Geosciences \(Elsevier\)](#)

http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/398/description#description

[Potential-Field Geophysical Software for the PC \(source USGS\)](#)

<http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0076-95/FS076-95.html>

[Pblock : gravity/magnetic effect of a rectangular prism \(source GSS\)](#)

<http://www.geoss.com.au/downloads.html#freeware>

[Pdyke: gravity/magnetic effect of a dipping 2-D prism \(source GSS\)](#)

<http://www.geoss.com.au/downloads.html#freeware>

[Tsoft: analysis of Time Series and Earth Tides \(Royal Observatory of Belgium\)](#)

<http://seismologie.oma.be/TSOFT/tsoft.html>

Commercial software

[Micro-g LaCoste](#) <http://www.microglacoste.com/>

[GEOSOFT](#) <http://www.geosoft.com>

[ENCOM](#) <http://www.encom.com.au/>

[INTREPID](#) <http://www.intrepid-geophysics.com>

[GSS](#) <http://www.geoss.com.au/software.html>

Gravity meter manufacturers

[GWR instruments](#) <http://www.gwrinstruments.com/>

[Micro-g LaCoste](#) <http://www.microglacoste.com/>

[Scintrex](#) <http://www.scintrexltd.com/>

[ZLS corporation](#) <http://www.zlscorp.com/>

<http://bgi.omp.obs-mip.fr>

Global geoid & gravity models

[International Geoid Service \(IGeS\)](#) <http://www.iges.polimi.it>

[International Center for Global Earth Models \(ICGEM\)](#) <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>

[EGM08 geoid & gravity models \(NGA\)](#) <http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>

[DNSC08 Marine gravity from satellite altimetry \(DNSC\)](#) <ftp://ftp.spacecenter.dk/pub/DNSC08>

[Sandwell & Smith : Marine gravity from satellite altimetry \(SCRIPPS\)](#) http://topex.ucsd.edu/marine_grav/mar_grav.html

[ACE-2 Global topography model \(ESA\)](#)

Global Gravity Data Compilation Centers

[National Geophysical Data Center \(NGDC/NOAA\)](#) <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/>

[National Geospatial Intelligence Agency \(NGA\)](#) <http://earth-info.nima.mil/GandG/>

[Superconducting gravity data Global Geodynamic Project \(GGP\)](#) <http://www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html>

Global Geological & Geophysical Maps

[Commission for the Geological Map of the World \(CGMW\)](#) <http://ccgm.free.fr/index.html>

IAG Organizations & Services

[International Association of Geodesy \(IAG\)](#) <http://www.iag-aig.org/>

[International Gravity Field Service \(IGFS\)](#) <http://www.igfs.net/>

[Global Geodetic Observing System \(GGOS\)](#) <http://www.ggos.org/>

[Global Earth Observation System of Systems \(GEOSS\)](#) <http://earthobservations.org/>

IGFS Services

[International Gravimetric Bureau \(BGI\)](#) <http://www.geodesie.ird.fr/bgi>

[International Geoid Service \(IGES\)](#) <http://www.iges.polimi.it/>

[International Center for Earth Tides \(ICET\)](#) [International Center for Earth Tides \(ICET\)](#)

[International Centre for Global Earth Models \(ICGEM\)](#) <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>

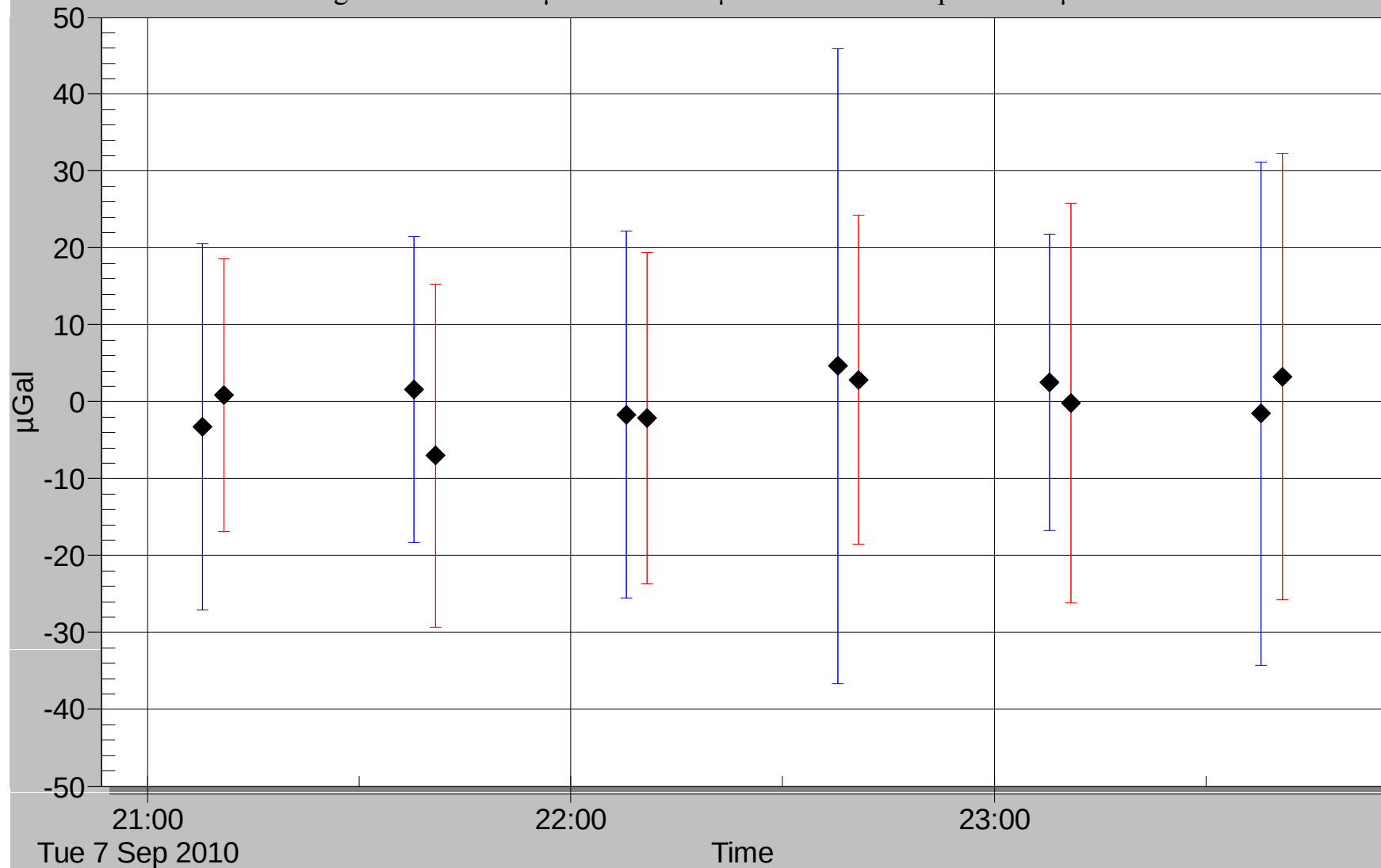
[International DEM Service \(IDEMS\)](#) [International DEM Service \(IDEMS\)](#)

[National Geospatial-Intelligence Agency \(NGA\)](#) <http://earth-info.nima.mil/GandG/>

Annexe : Mesures de pesanteur à Carcans Maubuisson (33)

Mesure absolue de la pesanteur à Carcans Maubuisson (A10 #014)

$g = 980605048.6 \mu\text{Gal} \pm 2.84 \mu\text{Gal}$ Red/Blue Sep: $0.90 \mu\text{Gal}$



Annexe : Mesures de pesanteur à Carcans Maubuisson (33)

Signaux de marée terrestre et de surcharge océanique prédits à Carcans Maubuisson (Gironde) pour la période du 6 au 10 Sept. 2010 (en μGal)

