



# Nouvelle carte gravimétrique de la France

RCGF09 – Réseau et Carte Gravimétrique de la France, 2009

**BRGM/RP-57908-FR**  
Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2009-GE0B01

**G. Martelet, G. Pajot, N. Debeglia**  
Avec la collaboration de  
**F. Dupont et A. Peyrefitte**

**Vérificateur :**

Nom : DEPARIS Jacques

Date : 21/12/09

Signature :

(Ou Original signé par)

Jacques DEPARIS

**Approbateur :**

Nom : Pierre NEHLIG

Date : 17/12/09

Signature :

(Ou Original signé par)

Pierre NEHLIG

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

**Mots clés :** gravimétrie, carte gravimétrique, France, RCGF09, Bouguer, stations gravimétriques, réseau gravimétrique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Martelet G., Pajot G. et Debeglia N. (2009) – Nouvelle carte gravimétrique de la France ; RCGF09 – Réseau et Carte Gravimétrique de la France, 2009. Rapport BRGM/RP-57908-FR, 77 p. 26 fig., 2 ann.

## Synthèse

Ce rapport présente une nouvelle édition de la Carte Gravimétrique de la France.

Cette nouvelle édition s'inscrit dans un historique auquel le BRGM a contribué de manière essentielle depuis plus de 50 ans, avec pour jalons principaux :

- le système de la Carte Gravimétrique de la France 1965 (CGF65), constitué d'un réseau de plus de 2000 bases et rattaché par des liaisons relatives avec des stations internationales de mesures absolues pendulaires (système international de Potsdam). Ce réseau a servi d'ossature à la plupart des campagnes de couvertures gravimétriques réalisées en France par divers opérateurs, sociétés minières, pétrolières, prestataires de service, universités, IGN, et par le BRGM lui-même,
- en 1975, la 1<sup>ère</sup> édition de la carte gravimétrique nationale à l'échelle du 1/1.000.000,
- le Réseau Gravimétrique Français (RGF83), établi de façon concomitante avec la partie française du réseau international IGSN71 ; tous deux basés sur des mesures absolues de pesanteur, dont 5 sur le territoire français,
- par rattachements entre les réseaux des différents opérateurs, l'établissement de formules de conversion entre le CGF65 et le RGF83 ou l'IGSN71,
- en 1998, une nouvelle édition, sous forme numérique, de la carte gravimétrique nationale,
- entre 1999 et 2001, sous l'égide du CNIG, et avec la participation des représentants du BRGM, de l'IGN, des Universités, du SHOM et des principaux acteurs de la gravimétrie en France, une réflexion sur la refonte du réseau et de la carte gravimétrique du territoire. Le travail de ce groupe, faute d'aboutir à un projet concerté, n'en a pas moins montré l'utilité d'une mise à jour du référentiel gravimétrique national,

La présente réédition de la Carte Gravimétrique de la France en découle et s'intègre plus largement dans l'action RCGF09 (Réseau et Carte Gravimétrique de la France 2009) qui aboutira à l'établissement conjoint d'un nouveau Réseau Gravimétrique et d'une nouvelle Carte Gravimétrique du territoire.

Dans cette action, le BRGM s'est concentré sur l'évolution de la carte gravimétrique (anomalies de Bouguer), tandis que l'IGN a travaillé à l'établissement d'un nouveau réseau.

Depuis 2000, l'IGN a ainsi réalisé annuellement des campagnes de mesures de nouvelles bases gravimétriques co-localisées avec les stations géodésiques du RBF. Ce nouveau réseau devrait comporter environ 1020 sites, dont 200 feraient l'objet

d'une détermination absolue de la pesanteur (gravimètre A10).

Les précisions attendues des bases mesurées par l'IGN sont respectivement compatibles avec le réseau de 1er ordre (pour les points absolus) et de 2nd ordre (pour les liaisons relatives).

La compensation finale du nouveau réseau établi par l'IGN devrait intervenir fin 2009 ou en 2010.

Une version temporaire de cette compensation a été transmise au BRGM. Elle permet, ci-dessous, de montrer la compatibilité de ce nouveau réseau avec la nouvelle carte d'anomalies de Bouguer qui fait l'objet de ce rapport.

Pour sa part, le BRGM a concentré son action sur 2 aspects :

- 1- le rattachement des anciens réseaux aux nouvelles bases de l'IGN,
- 2- l'amélioration de la carte gravimétrique.

Le présent rapport se focalise sur la carte gravimétrique.

Par rapport à la précédente édition de 1998, la nouvelle Carte Gravimétrique de la France intègre :

- près de 40 000 stations gravimétriques supplémentaires, ce qui porte le nombre total de stations à 414 000,
- un positionnement des stations révisé pour une quarantaine d'études (sur 173), soit près de 200 000 stations, qui assure désormais une localisation des stations compatible avec le 1/50 000<sup>e</sup> et souvent jusqu'au 1/25 000<sup>e</sup>,
- une homogénéisation des corrections de terrain (CT) de l'ensemble de la BGF, jusqu'à 167 km par un re-calcul des CT de l'ensemble des 414 000 stations qui la constituent.

En complément de l'amélioration intrinsèque de la carte gravimétrique, il était nécessaire de s'assurer de la bonne cohérence de la carte avec les réseaux gravimétriques et en particulier le futur réseau IGN (appelé ici « IGN09 »).

Il était également nécessaire, de manière préliminaire et en prévision de la publication prochaine du nouveau réseau IGN, de s'assurer de la compatibilité des anciens réseaux avec les nouvelles bases de l'IGN.

Les résultats des contrôles menés dans ces deux directions sont :

- 1- En ce qui concerne la compatibilité des réseaux gravimétriques :

Les éléments de synthèse des liaisons entre le réseau RGF83 et IGN09 présentés dans ce rapport et ceux contenus dans les rapports Martelet et al., (2005 à 2008), permettent d'établir qu'aucune distorsion sensible n'existe entre le nouveau réseau IGN et les anciens réseaux, de nature à affecter la banque de données et la carte gravimétrique du territoire publiée ici.

2- En ce qui concerne la compatibilité de la carte gravimétrique avec les réseaux :

La prédiction de l'anomalie de Bouguer, à partir des stations de la carte gravimétrique, aux bases des réseaux CGF65, RGF83 et IGN09 n'a mis en évidence aucune divergence systématique (distorsion), entre la carte et ces réseaux. Dans chaque cas, quelques stations présentent des écarts de prédiction un peu accrus ; à première vue ils seraient dus à des effets de relief mal pris en considération par la prédiction. Ceci devra être analysé en détail, station par station, en vue de la diffusion des bases au public.

Vis-à-vis du futur réseau IGN, la prédiction (optimale du fait du positionnement précis des nouvelles bases IGN) semble montrer une adéquation encore meilleure avec la nouvelle carte de Bouguer publiée ici, que pour les réseaux anciens.

De l'ensemble de ces travaux, il découle que la carte gravimétrique est compatible avec les 3 réseaux CGF65, RGF83 et IGN09, et dès lors que le nouveau réseau IGN aura été publié, il sera possible de :

- 1- finaliser la comparaison des réseaux gravimétriques anciens et du futur réseau IGN,
- 2- et ainsi, mettre à jour les bases CGF65 et RGF83 identifiées comme douteuses, intégrer et diffuser les bases IGN ; chaque base restant valide dans la limite de sa précision (qui est communiquée aux utilisateurs). Naturellement le rattachement d'une étude à une base récente ayant un meilleur niveau de précision, sera recommandé,
- 3- établir avec précision la formule de conversion entre anciens systèmes CGF65 ou RGF83 et le nouveau réseau IGN.



# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Carte gravimétrique de la France, bref historique</b> .....	<b>13</b>
2.1. CONSTITUTION DE LA CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE .....	13
2.1.1. Avant 1965 .....	13
<b>2.1.2. Le réseau et la carte gravimétrique de la France, 1965</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.3. Les réseaux IGSN71 et RGF83</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.4. Conversions entre systèmes gravimétriques existants</b> .....	<b>17</b>
2.1.5. Le nouveau réseau IGN en cours de finalisation.....	19
2.2. PUBLICATIONS ANTERIEURES DES DONNEES GRAVIMETRIQUES FRANÇAISES .....	20
2.2.1. Les publications anciennes .....	20
2.2.2. La carte gravimétrique numérique .....	21
2.3. UNE NOUVELLE CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE : POURQUOI ?	23
<b>3. Améliorations apportées à la carte depuis 1998</b> .....	<b>25</b>
3.1. ACCROISSEMENT DU NOMBRE DE STATIONS QUI COMPOSENT LA CARTE .....	25
3.2. AMELIORATION DU POSITIONNEMENT DES STATIONS GRAVIMETRIQUES .....	27
3.3. CALCUL ET HOMOGENEISATION DES CORRECTIONS D TERRAIN .....	33
3.3.1. Evolution des corrections de terrain dans la BGF .....	33
3.3.2. Test d'algorithmes de calcul de corrections de terrain de Geosoft.....	35
3.3.3. Recalcul des corrections de terrain de l'ensemble des stations de la BGF par l'algorithme de Geosoft v7.1.....	38
<b>4. La nouvelle carte gravimétrique de la France – RCGF09</b> .....	<b>41</b>
4.1. LA NOUVELLE CARTE D'ANOMALIES DE BOUGUER DE LA FRANCE .....	41
4.2. COMPLEMENTS SUR LA PRECISION DE LA NOUVELLE CARTE D'ANOMALIES DE BOUGUER .....	42
4.2.1. Identification de stations erronées.....	43
4.2.2. Carte de cohérence indicatrice de la précision intrinsèque des anomalies de Bouguer .....	45

4.3. COMPATIBILITE DE LA NOUVELLE CARTE AVEC LES RESEAUX GRAVIMETRIQUES ANCIENS ET LE NOUVEAU RESEAU ETABLI PAR L'IGN47	
4.3.1. Recherche de distorsions entre réseaux.....	48
4.3.2. Recherche de distorsions entre les réseaux et la carte gravimétrique ....	49
4.3.3. Conclusions quant à la cohérence des réseaux, de la nouvelle carte .....	55
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>57</b>
<b>Glossaire .....</b>	<b>59</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Le réseau gravimétrique CGF65 (d'après rapport CNIG, 2000) : Une première réitération d'une vingtaine de bases CGF a été réalisée en 1977 avec un gravimètre LaCoste & Romberg modèle G. Des mesures ont également été réitérées lors de la réalisation des bases du réseau RGF, à partir de 1983. ....	15
Figure 2 : Stations principales du réseau RGF83. A : stations absolues ; F : bases fondamentales ; S : satellites ; N : nœuds du second ordre ; Fr : bases frontalières ; P : bases portuaires ; I : bases IGSN71 ; BE : bases d'étalonnage .....	17
Figure 3 : Etablissement d'une formule de conversion CGF65 – RGF83.....	18
Figure 4 : Conversion CGF65 – RGF83 : comparaison des histogrammes des écarts entre mesures RGF83 et mesures CGF65 converties .....	19
Figure 5 : Localisation et état des observations de gravimétrie réalisées par l'IGN sur le réseau de bases géodésiques français (RBF) au 31/12/2006. ....	20
Figure 6 : Edition 1998 de la carte d'anomalie de Bouguer ( $10^{-5}$ m/s <sup>2</sup> ) sur la France, les pays limitrophes et le domaine maritime, calculée pour une densité de réduction 2,67. Carte établie à partir des données de la Banque Gravimétrique de la France et de diverses sources internationales (Grandjean et al., 1998). ....	22
Figure 7 : A gauche : rayon de calcul des corrections de terrain de la carte de Bouguer de la France édition 1998. A droite : précision estimée des mesures gravimétriques (d'après Grandjean et al., 1998). ....	22
Figure 8 : Carte de répartition des mesures gravimétriques de la BGF en 2009, et densité de stations gravimétriques par kilomètre carré (en niveaux de couleur). ....	26
Figure 9 : Exemple extrême d'erreur de positionnement de stations gravimétriques identifié à la frontière Franco-Allemande. Une translation de l'ordre de 850 m est nécessaire pour rétablir les stations sur les axes routiers (suivant les flèches). ....	27
Figure 10 : Principe de la déformation par « rubbersheeting » : le repositionnement (flèches rouges) de quelques stations (ronds) situées sur des noeuds remarquables du réseau routier (lignes), est répercuté de proche en proche, aux stations environnantes. ....	30
Figure 11 : Exemples de mise en œuvre (avant : en haut, après : en bas) de la méthode « rubbersheeting » pour des déformations du positionnement de type cisailante (gauche) ou tournante (droite). ....	30

Figure 12 : Déplacements moyens des études gravimétriques de la BGF obtenus (avec indication du numéro de Code Minier), en haut, par la méthode d'ajustement numérique et en bas, par la méthode « rubbersheeting ».	32
Figure 13 : Etat des corrections de terrain dans la BGF, lors de la dernière édition de la Carte Gravimétrique de la France en 1998 (d'après Grandjean et al., 1998)	34
Figure 14 : Comparaison de calculs de corrections de terrain autour du détroit de Gibraltar : a) par Cortop, b) par Geosoft 5.0.8, c) par Geosoft 7.1. On constate le très bon accord visuel entre a) et c), tandis que b) présente, à proximité des côtes une différence nette.	37
Figure 15 : Répartition des CT calculée (avec la version 7.1 de Geosoft, pour une densité de 2,6) pour les 3 couronnes 50m/3km, 3km/10km et 10km/167km, sous forme de cartes et d'histogrammes (on notera l'échelle semi-logarithmique). On remarquera la décroissance de l'effet du terrain à mesure que l'on s'éloigne de la station gravimétrique. On remarquera également que le relief a un effet particulièrement sensible sur les CT proches (50m/3km).	39
Figure 16 : A gauche, nouvelle carte des CT calculées jusqu'à la distance de 167 km (calcul réalisé avec la version 7.1 de Geosoft, pour une densité de 2,6). Pour l'ensemble de la zone, 90% des CT sont inférieures à 10 mGal. Elles croissent sur les reliefs et atteignent environ 40 à 50 mGal pour les plus fortes valeurs. En comparaison de la carte des CT utilisée lors de la précédente édition de la Carte Gravimétrique de la France, en 1998 (en encart, à droite). Une carte des différences est présentée en Annexe 1.	40
Figure 17 : Nouvelle carte d'anomalies de Bouguer RCGF09. Densité de réduction 2,6. Ombrage par le gradient vertical de l'anomalie de Bouguer.	42
Figure 18 : Exemple de résultat obtenu localement par VALIDG pour l'identification de station douteuses. Paramètres : Raymax = 10000 m; toldz = 250 ; kdata = 40; tol = 5 mGal; ksig = 3	43
Figure 19 : Carte de localisation des stations douteuses de la BGF (en rouge) où l'écart entre anomalie de Bouguer prédite et calculée excède 5 mGal. En noir, stations où la prédiction n'a pu être calculée (trop peu de stations voisines). En fond, ombrage du relief.	44
Figure 20 : Histogramme des écarts entre Bouguer prédite et mesurée aux stations de la BGF. Noter la représentation semi-logarithmique.	45
Figure 21 : a) Carte des écarts de prédiction de l'anomalie de Bouguer aux stations gravimétriques. Cette carte donne une image de la cohérence spatiale intrinsèque de l'anomalie de Bouguer pour l'ensemble de la Banque Gravimétrique de la France. b) Précédente carte des précisions de mesures de la BGF, avant correction topographiques (Grandjean et al., 1998).	46
Figure 22 : Droite de corrélation entre valeurs de g mesurées sur 77 sites du nouveau réseau IGN09 et valeurs rattachées depuis le réseau RGF83.	48
Figure 23 : Réseau CGF65 : écart entre l'anomalie de Bouguer mesurée et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes. La plupart des points pour lesquelles l'écart est fort (ronds gris) sont également des bases dont le positionnement est incertain (cercles noirs) – voir texte pour une explication détaillée.	50
Figure 24 : Réseau RGF83 : écart entre l'anomalie de Bouguer mesurée et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes. La plupart des points ont un positionnement	

incertain (cercles noirs) ce qui rend la prédiction douteuse – voir texte pour une explication détaillée. ....	51
Figure 25 : Réseau IGN09 : écart entre l’anomalie de Bouguer mesurée et l’anomalie prédite à partir des stations environnantes – voir texte pour une explication détaillée. ....	52
Figure 26 : Description de la base Valleraugue VI (d’après fiche géodésique de l’IGN) .....	54

## Liste des annexes

Annexe 1 Amélioration des corrections de terrain depuis 1998 .....	59
Annexe 2 Algorithme de prédiction de Bouguer et détection d’erreurs ponctuelles – VALIDG .....	67

# 1. Introduction

Entre 1999 et 2001, sous l'égide du CNIG, et avec la participation des représentants du BRGM, de l'IGN, des Universités, du SHOM, et des principaux acteurs de la gravimétrie en France, a été menée une réflexion sur la refonte du réseau et de la carte gravimétrique du territoire. Le travail de ce groupe, faute d'aboutir à un projet concerté, n'en a pas moins montré l'utilité d'une mise à jour du référentiel gravimétrique national.

La présente réédition de la Carte Gravimétrique de la France en découle et s'intègre plus largement dans l'action RCGF09 (Réseau et Carte Gravimétrique de la France 2009) qui aboutira à l'établissement conjoint d'un nouveau Réseau Gravimétrique et d'une nouvelle Carte Gravimétrique du territoire.

Dans cette action, le BRGM s'est concentré sur l'évolution de la carte gravimétrique (anomalies de Bouguer), tandis que l'IGN a travaillé à un nouveau réseau.

En effet, la révision du référentiel gravimétrique national nécessite, outre la mise en cohérence des réseaux de bases gravimétriques, la mise à jour de la Carte Gravimétrique de la France (CGF) qui regroupe 173 études régionales qui constituent la couverture dense du territoire, soit un peu plus de 414000 stations gravimétriques.

La CGF constitue la donnée de base utilisée dans les études régionales qui font appel à la gravimétrie ; sa qualité est donc à ce titre fondamentale. Par ailleurs, en cohérence avec le nouveau réseau gravimétrique, elle constituera un élément prépondérant dans l'établissement d'un nouveau quasi-géoïde, indispensable au calage précis en altitude des mesures GPS, dont l'IGN souhaite réaliser une révision.

Pour ces différentes raisons, le BRGM a entrepris la vérification et la mise à jour complète de la CGF.

Outre la mise à jour annuelle de la Banque Gravimétrique de la France avec les nouvelles données gravimétriques acquises, qui lui sont transmises au titre du Code Minier, le BRGM a depuis 2005 réalisé un effort particulier de mise à jour de la CGF sur 2 aspects principaux :

- 1- L'amélioration de la qualité des 414 000 stations qui constituent la CGF :
  - validation de la donnée gravimétrique,
  - contrôle et reprise du positionnement,
  - recalcul des corrections de terrain.
- 2- La recherche de distorsions éventuelles de la carte par rapport aux réseaux et notamment au nouveau réseau IGN.



## 2. Carte gravimétrique de la France, bref historique

### 2.1. CONSTITUTION DE LA CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE

#### 2.1.1. Avant 1965

C'est en 1950 que le B.R.G.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières, ex B.R.G.G.), Service Extérieur de la Direction des Mines, s'est vu confier l'établissement de la Carte Gravimétrique de la France. Les levés gravimétriques français avaient débuté en 1941 dans la Bresse, dont la couverture a été achevée en 1944 (Goguel 1948), et se sont ensuite poursuivis dans le bassin parisien, de 1947 à 1953 (Goguel, 1954). Ces premières campagnes ont été d'abord sous-traitées par le BRGG à la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) qui disposait d'un gravimètre Thyssen, puis de gravimètres North American. A partir de 1947, les équipes du BRGM, dotées également d'un gravimètre North American, se sont jointes à la CGG. En 1951, le Bureau de Recherche des Pétroles (BRP) a pris en charge une partie des levés sur le Bassin de Paris qui ont été également confiés à la CGG. Les différentes équipes mettaient en commun leurs résultats et travaillaient en étroite coordination technique.

Il n'avait cependant pas été établi de « réseau fondamental de base, auquel auraient été rattachées les bases secondaires de chaque campagne : les réseaux particuliers relatifs à chaque campagne, comportant de multiples liaisons, ont été compensés par blocs d'étendues limitées et calés les uns par rapport aux autres » (Goguel 1954). Toutes ces bases étaient reliées à l'unique base de Paris – Observatoire Point A. Les liaisons communes aux deux équipes faisaient apparaître un coefficient sensiblement constant entre les coefficients d'étalonnage des gravimètres CGG, d'une part, et du gravimètre BRGM, d'autre part. A la même époque, le BRGM participait aux liaisons Paris-Toulouse qui ont permis de définir la base de référence fondamentale française. L'étalonnage du gravimètre BRGM a donc été adopté et les valeurs de la CGG ont été corrigées avant leur intégration dans les cartes définitives.

La nécessité d'un réseau gravimétrique de référence s'est fait sentir au début des années 1960 lorsqu'on dut intégrer, dans le levé gravimétrique français, toutes les prospections effectuées par divers organismes qui utilisaient des bases locales et des gravimètres étalonnés différemment : missions BRGM qui se poursuivaient en Bretagne, en Vendée, à la périphérie du Massif Central, dans les Vosges, le Jura et le Sud-Est, prospections réalisées pour le compte des sociétés pétrolières, principalement par la CGG, et campagnes effectuées par les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA). Ce réseau devait s'appuyer sur des bases fondamentales pour lesquelles une valeur de  $g$  de référence devait être adoptée ce qui, à l'époque, n'était pas un problème simple car on ne disposait pas de mesures absolues en France.

### 2.1.2. Le réseau et la carte gravimétrique de la France, 1965

A la suite de nombreuses liaisons effectuées sur le trajet Paris – Toulouse, la base fondamentale française sur laquelle s'appuie le système de la Carte Gravimétrique de France (CGF), est définie par le BRGM, en 1963, par la valeur de  $g$  aux points :

- Paris observatoire point A :  $980\,943,00 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,
- Toulouse observatoire labo - photo :  $980\,442,80 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,

soit un  $\Delta g$  de  $500,20 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ .

Ces bases de Paris A et Toulouse labo - photo ont été ultérieurement remplacées par Sèvres, pour Paris, et le pilier de l'Observatoire pour Toulouse.

Dès 1965, on disposait d'un réseau de plus de 2000 bases CGF de premier, deuxième et troisième ordre (Figure 1). Le système de la Carte Gravimétrique de la France (CGF65) est donc un réseau national établi par des liaisons relatives, lui-même rattaché par des liaisons relatives avec des stations internationales de mesures absolues pendulaires (système international de Potsdam) – Coron, (1950).

Ce réseau a formé l'ossature de la carte gravimétrique de France que le BRGM publiait progressivement. En 1966, les 3/5 du territoire métropolitain étaient couverts à l'échelle du 1/80 000. Le rythme des levés et des publications s'est fortement ralenti par la suite. Un réseau de quatrième ordre était constitué par les bases des levés CGG ou MDPA. Ce réseau a été progressivement complété au fil des levés, tandis que certaines bases étaient détruites. La carte de localisation des bases CGF65 (Figure 1) montre la répartition hétérogène de ces bases, qui s'explique par le fait que certains des réseaux de bases non BRGM n'ont pu être réoccupés et convertis.

Les levés effectués jusqu'en 1976 avaient été réalisés avec des gravimètres Thyssen, North American et Western, puis Worden, à partir de 1955. La précision en valeur relative du réseau CGF65 a pu être estimée en 1977 grâce à la reprise d'une vingtaine de ses bases de premier ordre avec un gravimètre relatif Lacoste et Romberg modèle G (Ogier, 1977). Le plus fort écart ainsi observé sur 22 reprises est de  $0,31 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , si on excepte une valeur jugée aberrante à Strasbourg (écart de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ). L'écart type  $\sigma$  des reprises est de  $0,09 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ . De fait, l'erreur traditionnellement associée au réseau des bases CGF65 est de  $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ .

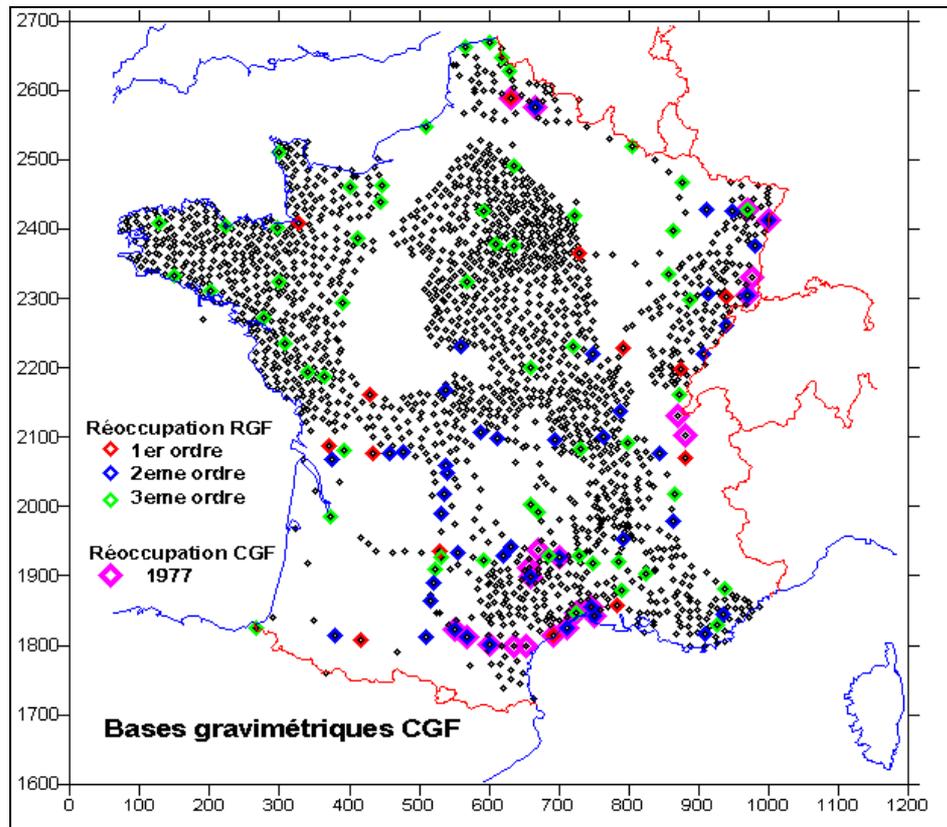


Figure 1 : Le réseau gravimétrique CGF65 (d'après rapport CNIG, 2000) : Une première réitération d'une vingtaine de bases CGF a été réalisée en 1977 avec un gravimètre LaCoste & Romberg modèle G. Des mesures ont également été réitérées lors de la réalisation des bases du réseau RGF, à partir de 1983.

### 2.1.3. Les réseaux IGSN71 et RGF83

Contrairement au CGF65, les réseaux gravimétriques IGSN71 (International Gravity Standardisation Network - 1971) et le RGF83 (Réseau Gravimétrique de la France - 1983) sont basés sur des mesures absolues de la pesanteur.

L'avènement, dans les années 1970, des premiers gravimètres absolus balistiques (méthode de chute de corps) allait modifier considérablement les valeurs de  $g$  attribuées aux bases fondamentales. De nouvelles mesures effectuées à Potsdam quantifient une différence d'environ  $-14$  mGal par rapport à celles effectuées précédemment. Puisque tout le réseau de bases CGF65 était basé sur le système de Potsdam, il devenait donc nécessaire de recalibrer l'ensemble du réseau français sur les valeurs absolues.

De façon concomitante, la création d'un réseau gravimétrique international était engagée (l'IGSN71) et 31 bases de ce réseau étaient établies en France par liaisons relatives à partir de stations absolues étrangères (Morelli et al. 1974).

En 1967, le premier gravimètre absolu du professeur A. Sakuma avait été installé à Sèvres, au BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), et la station Sèvres A devint l'une des références du système IGSN71.

Le système IGSN71 ne diffère pas du système CGF65 par une simple constante. On observe également une variation de l'écart entre les deux systèmes ( $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ) de Sèvres à Toulouse. Les nouvelles valeurs de  $g$  dans le système IGSN71 à Sèvres et Toulouse sont :

Station	$g$ CGF65 ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )	$g$ IGSN71 ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )	Différence ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ) IGSN71 – CGF65
Sèvres A	980 940.32	980 925.97	-14.35
Toulouse pilier	980 442.77	980 427.47	-15.30

Tableau 1 : Comparaison CGF65 – IGSN71

Le réseau RGF83 (Figure 2) a été établi par le BRGM à la suite d'une proposition du Bureau Gravimétrique International (BGI) et du Bureau National de Métrologie (BNM). Il comporte cinq stations absolues (Orléans, Dijon, Marseille, Nancy et Toulouse) mesurées avec le gravimètre absolu portable Jaeger GA60 du BIPM (Ogier et Sakuma, 1983). A partir de ces bases absolues le réseau de premier ordre, comprenant 53 bases ainsi que des bases d'étalonnage, est alors constitué grâce à des liaisons relatives établies à l'aide de 4 gravimètres LaCoste & Romberg G manipulés par 2 opérateurs. S'y ajoutent 280 bases de second ordre résultant de mesures relatives (Ogier, 1983). La précision de ce réseau est estimée à  $24 \mu\text{Gal}$  pour les stations absolues,  $63 \mu\text{Gal}$  pour les stations constituant le réseau de premier ordre et  $80 \mu\text{Gal}$  pour le second ordre (Ogier, 1985).

Certaines des stations absolues du RGF83 ont été réoccupées plus récemment par l'EOST à l'aide du gravimètre FG5#206 : après homogénéisation des corrections appliquées, les écarts avec la série des mesures réalisées par A. Sakuma sur le RGF83 restent inférieurs à  $16 \mu\text{Gal}$ , dans lesquels est intégrée une possible variation temporelle (Amalvict et al, 2002). Ceci confirme les estimations de précision faites par Ogier et Sakuma, (1983). Les informations concernant les nouvelles bases absolues sont disponibles auprès de l'EOST, du LDL, du [BGI \(Bureau Gravimétrique International\)](#) ou des organismes hébergeant les sites de mesure absolue.

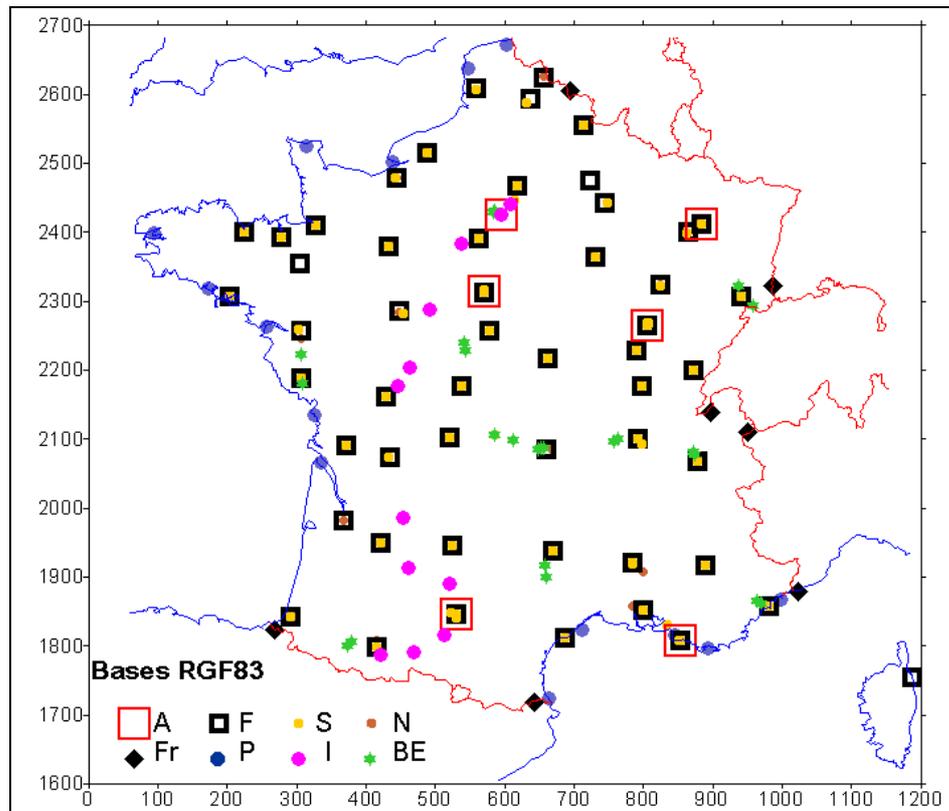


Figure 2 : Stations principales du réseau RGF83. A : stations absolues ; F : bases fondamentales ; S : satellites ; N : nœuds du second ordre ; Fr : bases frontalières ; P : bases portuaires ; I : bases IGSN71 ; BE : bases d'étalonnage

#### 2.1.4. Conversions entre systèmes gravimétriques existants

La transformation de l'ensemble des stations de mesures du système CGF65 dans le système RGF83 devait être réalisée lorsque le levé régulier du territoire français aurait été achevé (les levés de terrains s'effectuant toujours dans le système CGF65). Malheureusement, l'arrêt du levé régulier, en 1978, résultant de la diminution constante des crédits de Service Public n'a pas permis de passer l'ensemble des stations gravimétriques nationales dans le nouveau système RGF83. A défaut, des formules de passage entre le CGF65 et l'IGSN71 ou le RGF83 ont été utilisées jusqu'à présent.

En 1980, M. Ogier (BRGM) établit une formule de conversion entre les systèmes CGF65 et IGSN71. Il réoccupe certaines stations IGSN71 françaises avec un gravimètre LaCoste & Romberg G étalonné sur des stations absolues internationales (Sèvres, Bruxelles, Wiesbaden et Turin) et recalcule la valeur de  $g$  dans le système CGF65. Des valeurs CGF65 et IGSN71 ainsi établies, il déduit par régression linéaire la loi de conversion suivante :

$$g \text{ IGSN71} = g \text{ CGF65} * 1,001205688 - 1197,15 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2.$$

La réoccupation de bases CGF65 lors de la réalisation du RGF83 permet d'établir une formule de passage entre CGF65 et RGF83 et de vérifier la cohérence des systèmes IGSN71 et RGF83. Il avait ainsi été calculé l'écart entre :

- d'une part, la valeur de g mesurée dans le système CGF65 puis convertie en IGSN71,
- d'autre part, la valeur mesurée dans le système RGF83.

Ainsi, sur 117 bases réoccupées, l'écart quadratique moyen des différences entre les valeurs IGSN71 et RGF83 est de  $0,17 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ . Cet écart traduit le cumul des incertitudes sur les deux réseaux CGF65 et RGF83, sur la formule de conversion CGF65 – IGSN71 et sur les bases françaises de ce dernier réseau utilisées pour l'établir.

Une formule de passage entre les valeurs CGF65 et RGF83 avait ensuite été calculée par régression linéaire (Figure 3) à partir des 117 bases réoccupées :

$$g \text{ RGF83} = g \text{ CGF65} * 1,00107 - 1064,15 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2.$$

L'histogramme des écarts entre les mesures RGF83 et les mesures CGF65 converties, d'une part en IGSN71, et, d'autre part en RGF83, (Figure 4) illustre la similitude des références RGF83 et IGSN71.

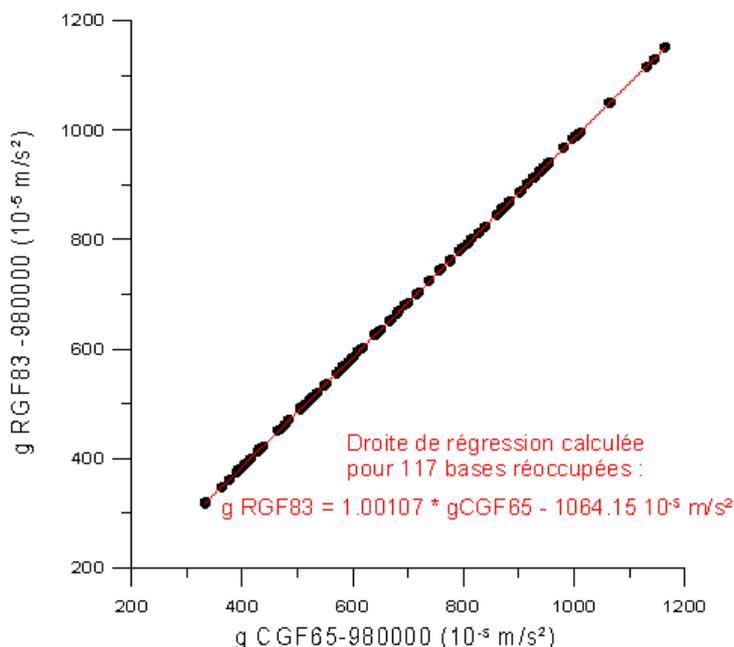


Figure 3 : Etablissement d'une formule de conversion CGF65 – RGF83.

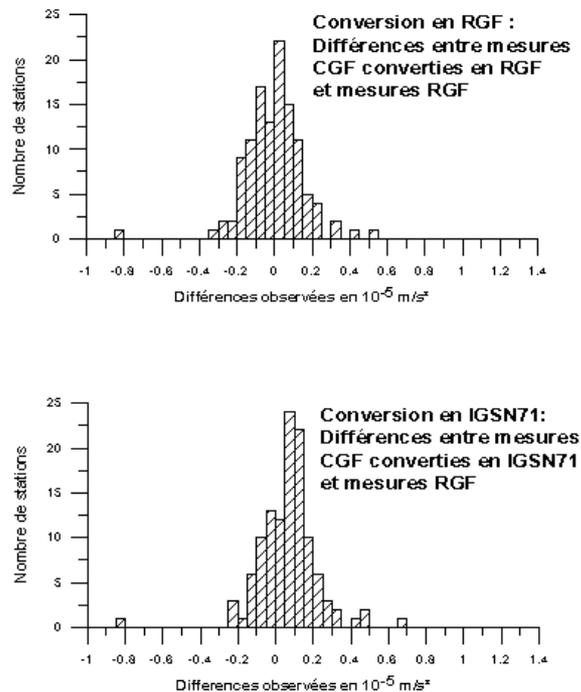


Figure 4 : Conversion CGF65 – RGF83 : comparaison des histogrammes des écarts entre mesures RGF83 et mesures CGF65 converties

### 2.1.5. Le nouveau réseau IGN en cours de finalisation

Depuis 2000, l'IGN a réalisé annuellement des campagnes de mesures de nouvelles bases gravimétriques. Ces bases sont de 2 natures : déterminations absolues (gravimètre A10) ou liaisons relatives (gravimètres Scintrex). Elles sont co-localisées avec les stations géodésiques du RBF.

A terme, ce nouveau réseau devrait comporter environ 1020 sites, dont 200 feraient l'objet d'une détermination absolue de la pesanteur (Figure 5)

Les précisions attendues des bases mesurées par l'IGN sont respectivement compatibles avec le réseau de 1er ordre (pour les points absolus) et de 2nd ordre (pour les liaisons relatives). La compensation finale du nouveau réseau établi par l'IGN devrait intervenir fin 2009 ou en 2010.

Une version temporaire de cette compensation a été transmise au BRGM. Elle a permis de montrer (au paragraphe 4.3) la compatibilité de ce nouveau réseau avec la nouvelle carte gravimétrique qui fait l'objet de ce rapport.

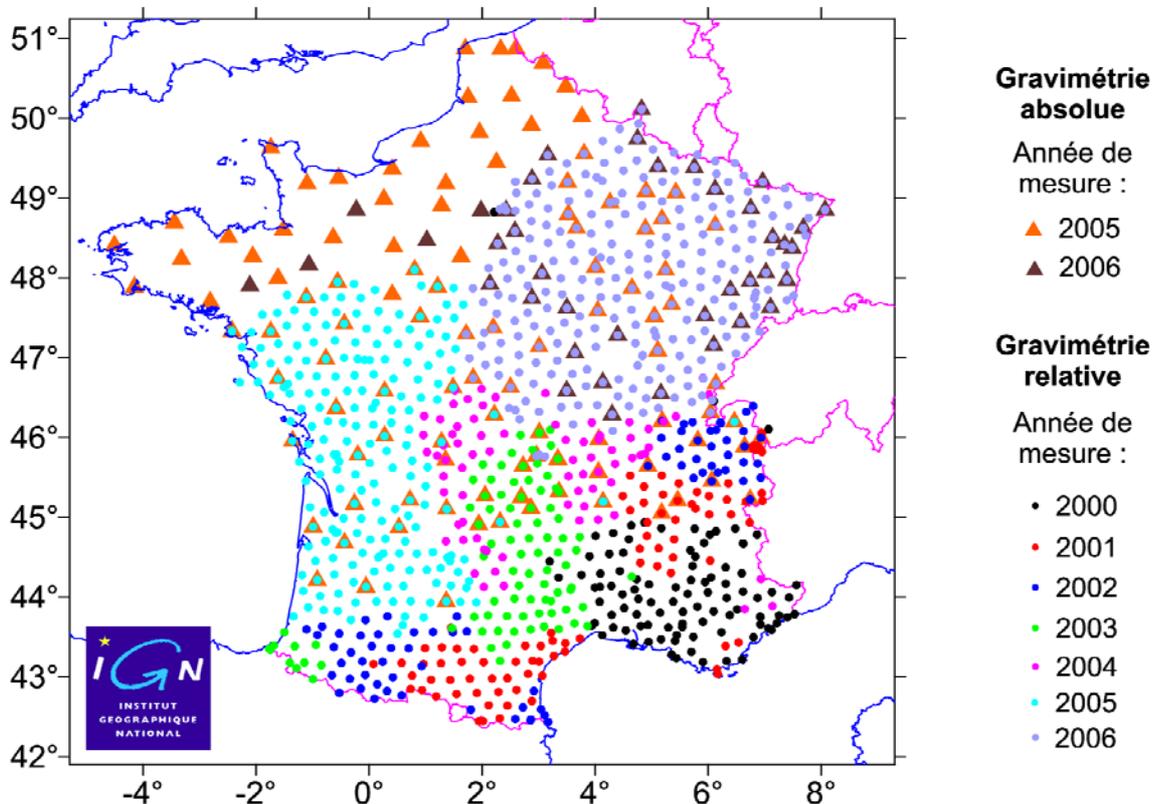


Figure 5 : Localisation et état des observations de gravimétrie réalisées par l'IGN sur le réseau de bases géodésiques français (RBF) au 31/12/2006.

## 2.2. PUBLICATIONS ANTERIEURES DES DONNEES GRAVIMETRIQUES FRANÇAISES

### 2.2.1. Les publications anciennes

La couverture gravimétrique détaillée et complète du territoire français, a fait l'objet de publications de cartes, dressées au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Initialement éditées au 1/80 000<sup>e</sup>, les levés ont également été présentés sous la forme de cartes de synthèse à 1/200 000<sup>e</sup> et à 1/320 000<sup>e</sup>. Ces cartes ne sont plus éditées, mais restent consultables à la bibliothèque du BRGM, sur son site d'Orléans.

Une carte gravimétrique à l'échelle du 1/1 000 000<sup>e</sup>, feuilles nord et sud, a été publiée en 1975 malgré une couverture incomplète. Afin de permettre l'interpolation au travers des zones non levées, une mission à très faible densité de points a été effectuée dans le Massif Central.

Le levé régulier à l'échelle du 1/80 000<sup>e</sup> de la Carte Gravimétrique a été interrompu en 1978. Postérieurement à cette date, des levés gravimétriques ont cependant continué à être réalisés, principalement dans le cadre de grands projets scientifiques (synthèse géologique des Pyrénées, Géologie Profonde de la France, GéoFrance3D), mais également par le BRGM, l'IGN, les Universités et des industriels.

En mer des données gravimétriques ont été acquises principalement par l'IFREMER, le CNEEXO et le SHOM. S'y ajoutent, en Méditerranée, les levés réalisés par C. Morelli et des mesures effectuées pour le compte de la CFP. Les couvertures marines sont archivées à l'IFREMER et au SHOM ; bon nombre d'entre elles ont été transmises au BGI ([Bureau Gravimétrique International](#)).

### **2.2.2. La carte gravimétrique numérique**

La saisie numérique des données gravimétriques terrestres françaises fut engagée en 1977. En 1990, le BRGM a établi la Banque Gravimétrique de la France (BGF), sous Oracle, pour assurer la gestion et la mise à jour des stations qui constituent la Carte Gravimétrique de la France.

Le BRGM assure annuellement la validation et l'intégration dans la BGF des jeux de données gravimétriques acquis sur le territoire et qui lui sont confiés au titre du Code Minier (Art. 133, Titre VIII, Livre 1er).

Depuis sa création, la BGF a ainsi fait l'objet de mises à jour annuelles et de modernisations périodiques. L'ensemble des points de la BGF est accessible sur le site [Infoterre](#) du BRGM. La base du BRGM est périodiquement répliquée sur le site du [Bureau Gravimétrique International \(BGI\)](#).

La dernière édition de la carte gravimétrique de la France date de 1998 (Grandjean et al. 1998 ; Truffert et Grandjean, 1998).

Elle a été établie dans le cadre du programme GéoFrance3D, projet « Million » : une carte de l'anomalie de Bouguer (Figure 6), calculée pour une densité de réduction 2,67, a été réalisée dans le système IGSN71, à partir des données de la BGF et de diverses sources internationales (Grandjean et al., 1998).

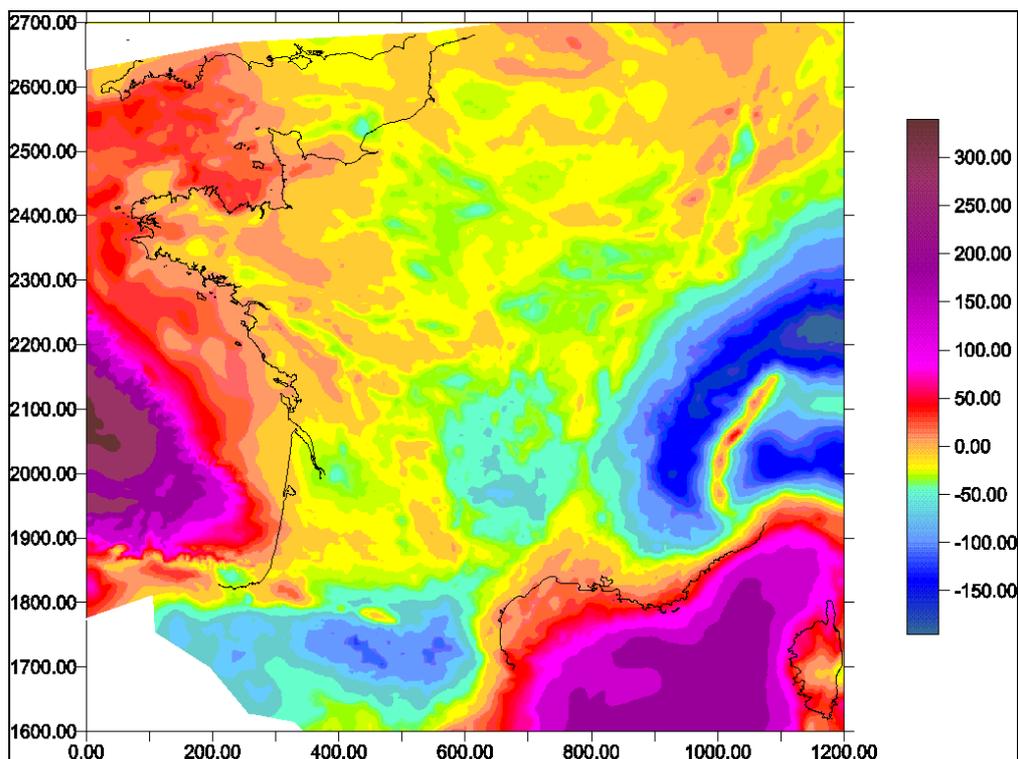


Figure 6 : Edition 1998 de la carte d'anomalie de Bouguer ( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ) sur la France, les pays limitrophes et le domaine maritime, calculée pour une densité de réduction 2,67. Carte établie à partir des données de la Banque Gravimétrique de la France et de diverses sources internationales (Grandjean et al., 1998).

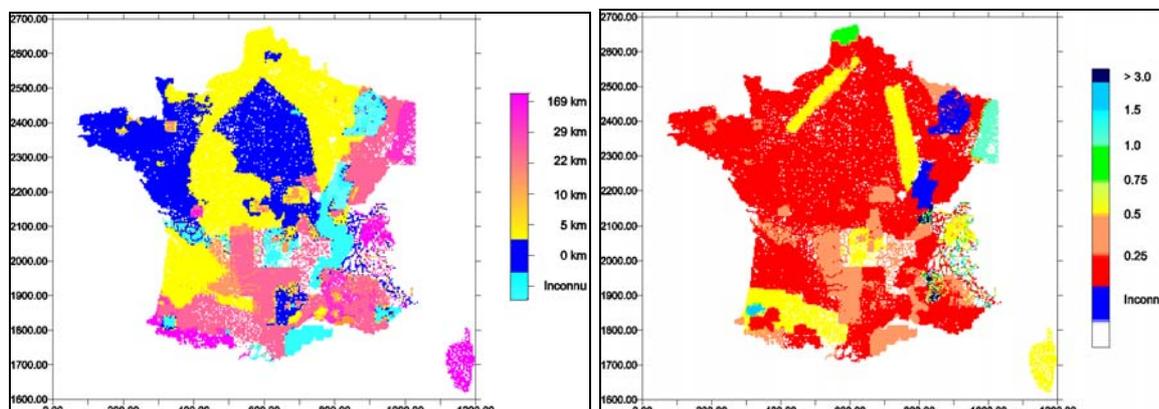


Figure 7 : A gauche : rayon de calcul des corrections de terrain de la carte de Bouguer de la France édition 1998. A droite : précision estimée des mesures gravimétriques (d'après Grandjean et al., 1998).

Les cartes de la Figure 7 restituent les principaux éléments qui permettent d'évaluer la qualité de la carte d'anomalies de Bouguer de 1998 sur le territoire national :

- à gauche, la distance maximale de correction de terrain, varie selon les études, entre une correction complète (jusqu'à 167 km) et des corrections partielles, jusqu'à une absence totale de correction ;
- à droite, la précision des anomalies de Bouguer (erreur quadratique moyenne), estimée, avant correction de terrain, en tenant principalement compte des types de gravimètre et de positionnement utilisés pour chaque étude.

### **2.3. UNE NOUVELLE CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE : POURQUOI ?**

Les deux illustrations de la Figure 7 montrent que l'édition 1998 de la carte des anomalies de Bouguer de la France peut être sensiblement améliorée, ne serait-ce qu'en homogénéisant les corrections de terrain de l'ensemble de la BGF jusqu'à 167 km.

Au-delà, l'utilisation de ces données lors d'études de détail a mis en évidence des défauts de positionnement de certaines études. Une grande partie des levés ont été réalisés entre 1945 et 1975, par plusieurs organismes. La diversité des sources et la digitalisation des données depuis ont impliqué la numérisation de supports papier et un (ou plusieurs) changement(s) de systèmes de projection. Malgré tout le soin apporté à la gestion de ces données depuis leur acquisition, diverses sources d'erreurs ont pu affecter le positionnement originel des stations.

De nouvelles études ont également eu lieu sur le territoire, qui permettent de sensiblement enrichir la carte de 1998.

Enfin et surtout, la révision de la Carte Gravimétrique de la France s'intègre plus largement dans l'action RCGF09 (Réseau et Carte Gravimétrique de la France 2009) qui aboutira à l'établissement conjoint d'un nouveau Réseau Gravimétrique et d'une nouvelle Carte Gravimétrique du territoire.

En effet, la refonte du réseau gravimétrique et de la carte gravimétrique du territoire a été discutée sous l'égide du CNIG entre 1999 et 2001, avec la participation des représentants du BRGM, de l'IGN, des Universités, du SHOM et des principaux acteurs de la gravimétrie en France. Le travail de ce groupe, faute d'aboutir à un projet concerté, n'en a pas moins montré l'utilité d'une mise à jour du référentiel gravimétrique national.

En particulier, l'IGN souhaitait impérativement une révision du réseau et de la carte gravimétriques nationaux pour affiner ses grilles de conversion altimétrique. Depuis 2000, l'IGN a ainsi réalisé annuellement des campagnes de mesures de nouvelles bases gravimétriques. Ces bases sont de 2 natures : déterminations absolues (gravimètre A10), ou liaisons relatives (gravimètres Scintrex). Elles sont co-localisées avec les stations géodésiques du RBF.

Les précisions attendues des bases mesurées par l'IGN sont respectivement compatibles avec le réseau de 1er ordre pour les points absolus) et de 2nd ordre (pour les liaisons relatives). La compensation finale du nouveau réseau établi par l'IGN

devrait intervenir fin 2009 ou en 2010.

Une version temporaire de cette compensation a été transmise au BRGM, qui nous permet, dans la suite, de vérifier l'adéquation du nouveau réseau avec la carte d'anomalies de Bouguer, qui fait l'objet du présent rapport.

### 3. Améliorations apportées à la carte depuis 1998

La dernière édition de la carte gravimétrique de la France date de 1998 (Grandjean et al. 1998 ; Truffert et Grandjean, 1998).

Elle a été établie dans le cadre du programme GéoFrance3D, projet « Million » : une carte de l'anomalie de Bouguer (Figure 6), calculée pour une densité de réduction 2,67, a été réalisée dans le système IGSN71, à partir des données de la BGF et de diverses sources internationales (Grandjean et al., 1998).

#### 3.1. ACCROISSEMENT DU NOMBRE DE STATIONS QUI COMPOSENT LA CARTE

La carte gravimétrique de la France, édition 1998 avait été établie à partir de 372 000 stations à terre.

Depuis, ont été déclarées au titre du Code Minier, transmises au BRGM et intégrées dans la base de données les points issus des missions suivantes :

• missions GéoFrance 3D (St Brieux, Cévennes, Nice, Pelvoux, Argentat, Veinazes, Ahun, St Sylvestre, Blond, La Marche)	5779 points
• missions BRGM (Argentat, Champtoceaux, Millevaches, Montmarault, Glénat-Omps, St Flour-Malzieu)	1606 points
• mission IFP	1606 points
• missions Universités (Alpes, Mont Blanc, Champtoceaux-Leeds, Margeride Est, Mayenne-Ernée, Ploemeur)	2906 points
• missions privées (compagnies minières) acquises depuis plus de 10 ans :	9296 points
• missions privées (ANDRA) acquises depuis plus de 10 ans :	5960 points
• missions privées (Pétroliers) acquises depuis plus de 10 ans :	10090 points

Ainsi, plus de 37 000 points supplémentaires ont été intégrés à la Banque Gravimétrique de la France pour la période 1998-2009.

La Banque Gravimétrique de la France contient, à ce jour, environ 414 000 points.

La localisation et la densité de répartition des stations gravimétriques sur le territoire sont présentées en Figure 8.

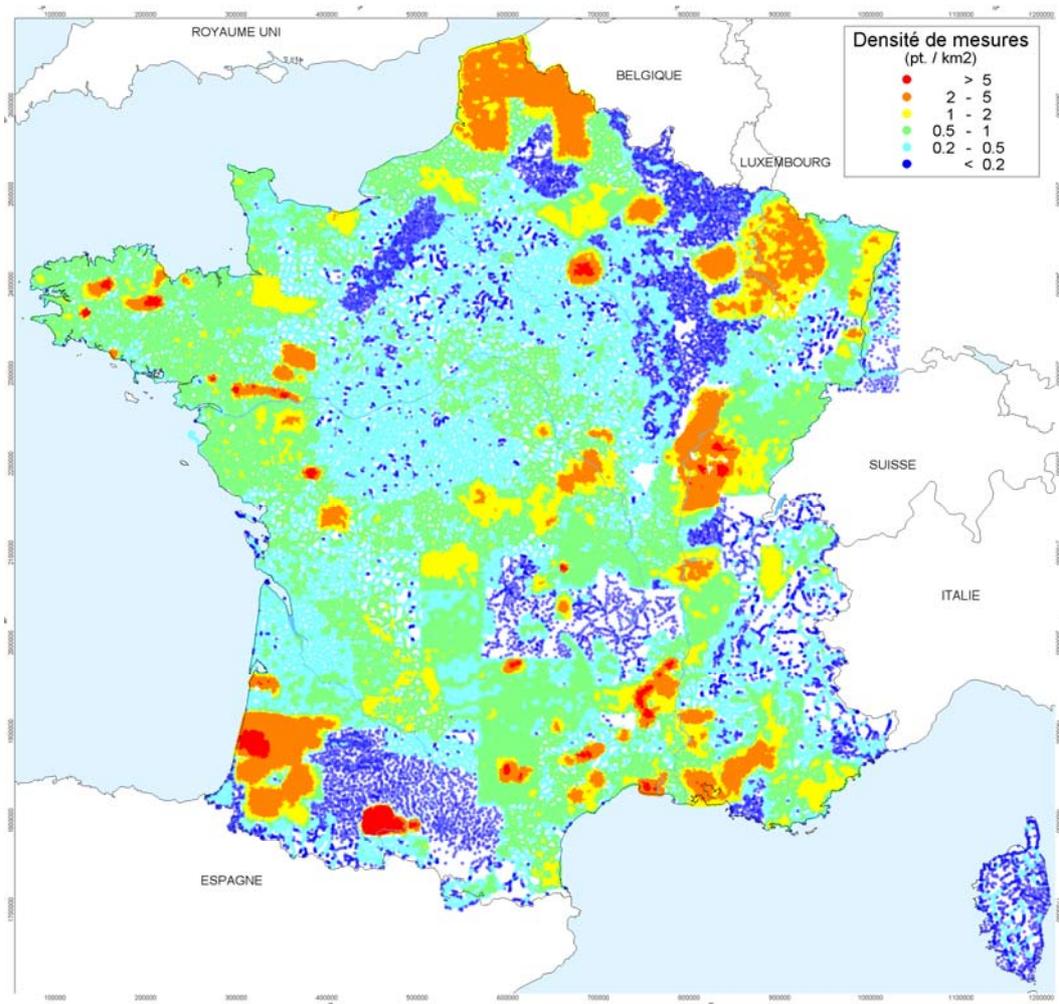


Figure 8 : Carte de répartition des mesures gravimétriques de la BGF en 2009, et densité de stations gravimétriques par kilomètre carré (en niveaux de couleur).

### 3.2. AMELIORATION DU POSITIONNEMENT DES STATIONS GRAVIMETRIQUES

On a pu constater au fil des études régionales utilisant les données de la Banque Gravimétrique de la France (BGF) que certaines études sont affectées de défauts de positionnement.

Or les défauts de positionnement se répercutent sur la précision des anomalies de Bouguer à deux niveaux :

- au travers de la correction de latitude, qui vaut environ  $0,8 \text{ mGal} / \text{km}$  dans la gamme des latitudes de la France. L'effet pour une erreur de positionnement de 200 m en N-S est donc de  $0,15 \text{ mGal}$  environ ce qui est peu sensible ;
- sur les corrections de terrain calculées numériquement : en effet, les corrections à proximité de la station seront faussées, et ce d'autant plus que le relief est accidenté, avec, en montagne des erreurs pouvant atteindre plusieurs milligals.

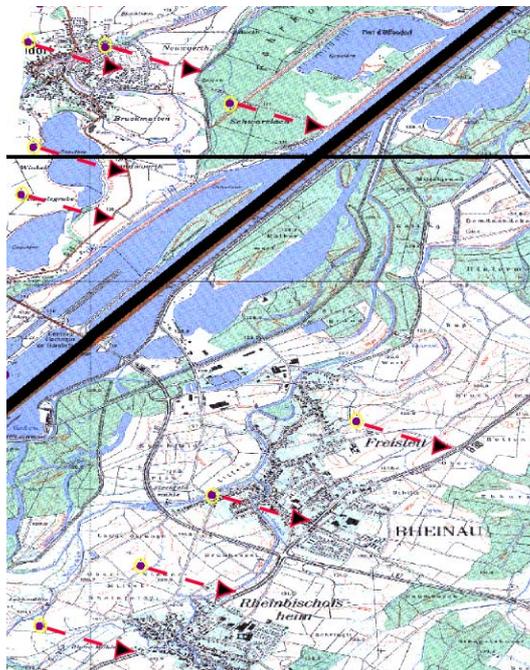


Figure 9 : Exemple extrême d'erreur de positionnement de stations gravimétriques identifié à la frontière Franco-Allemande. Une translation de l'ordre de 850 m est nécessaire pour rétablir les stations sur les axes routiers (suivant les flèches).

Une grande partie des données de la BGF ont été acquises entre 1945 et 1975, par des opérateurs variés. La diversité des sources et la digitalisation des données depuis ont impliqué la numérisation de supports papier et un (ou plusieurs) changement(s) de système(s) de projection. Malgré tout le soin apporté à la gestion de ces données depuis leur acquisition, diverses sources d'erreurs ont pu affecter le positionnement originel des stations. Un cas extrême d'imprécision du positionnement est présenté en Figure 9.

Ces imprécisions de positionnement sont apparues de manière croissante comme la source d'erreurs en cascade : notamment pour la reprise des corrections de terrain par un calcul informatisé. En 1999 la première fois, à l'occasion d'une synthèse des données gravimétriques disponibles dans les Alpes et réalisée par l'USTL avec la coopération du BRGM (Masson et al., 1999), puis en 2002 lorsque le BRGM a entrepris la première homogénéisation des corrections de terrain jusqu'à 167 km sur l'ensemble du territoire (Martelet et al., 2002). En effet, des stations mal positionnées « flottaient » par rapport au MNT utilisé pour le calcul, introduisant des erreurs de calcul.

En 2006, un contrôle complet du positionnement des stations de la BGF a donc été réalisé, étude par étude, soit pour 173 études totalisant environ 414 000 stations (Martelet et Debeglia, 2006 ; Martelet et Sarrailh, 2006). Les principaux résultats de ce travail sont récapitulés ci-dessous.

Des imprécisions de deux types avaient principalement été identifiées :

- 1- des imprécisions « point par point » : la localisation des stations lors de leur acquisition a été peu précise,
- 2- une imprécision pour l'ensemble d'une mission.

Les imprécisions de la 1<sup>ière</sup> catégorie, par nature incontrôlables, ont été laissées en l'état et font donc partie de l'erreur de mesure (4 études étaient concernées).

Seules les imprécisions relevant de la 2<sup>ième</sup> catégorie ont été étudiées, dans la mesure où elles relevaient d'un systématisme.

On espérait, étude par étude, pouvoir identifier la source de l'erreur (que l'on pensait liée à une/des erreurs de changement de systèmes de coordonnées au cours de l'histoire de la base gravimétrique). Cela n'a en fait été possible que pour une étude, très récente.

A défaut on s'est efforcé de trouver une correction du positionnement de chaque étude, la plus adéquate possible.

Deux approches ont été mises en œuvre qu'on expose ci-dessous.

- Méthodes de vérification et correction du positionnement

Une première approche a consisté à corriger des erreurs de positionnement de manière automatisée. Cette approche a été développée et mise en œuvre au BGI (Bureau Gravimétrique International).

L'algorithme consistait à déterminer, pour chaque mission, un déplacement d'ensemble des stations, dans le plan horizontal, permettant de minimiser l'écart de l'altitude de l'ensemble des stations gravimétriques, par rapport à une référence d'altitude, sous la forme d'un MNT.

Cette méthode automatisée avait l'avantage de pouvoir être mise en œuvre de manière rapide et sans intervention de l'utilisateur. Cependant, elle postule que l'erreur de positionnement d'une étude peut être corrigée par une simple translation constante pour toutes les stations d'une étude.

Or, une analyse visuelle étude par étude a clairement montré l'existence de distorsions des écarts de positionnement, plus ou moins complexes selon les études, (la translation restant cependant presque toujours la cause d'erreur prépondérante). Ces distorsions sont attribuées, soit à des problèmes de projection (déformations graduelles), soit à des problèmes de numérisation, pour les études anciennes (déformations plus locales et complexes).

Pour tenter de corriger au mieux ces distorsions, et partant du constat que l'essentiel des stations ont été mesurées sur routes, une seconde méthode dite de « Rubbersheeting » avait été mise en œuvre sous ArcGis 9.0, basée sur une déformation répartie des stations, au sein de chaque étude, par recalage sur le réseau routier (schéma de principe en Figure 10). Le réseau routier utilisé était celui de la BD Carthage de l'IGN, dont la précision est décimétrique.

Cette 2<sup>nd</sup>e méthode de correction du positionnement des missions de la BGF a été mise au point et réalisée au BRGM. Quoique extrêmement fastidieuse, la détermination visuelle du décalage, de son ampleur, de sa nature, constituent la manière la plus sûre d'identifier et analyser les défauts de positionnement effectifs des missions (Figure 11).

Le positionnement des missions a été considéré comme défectueux lorsque des décalages systématiques (ou organisés) d'une amplitude minimum de 25 m (1 mm au 1/25 000<sup>e</sup>) étaient constatés. Compte-tenu de la cause apparente la plus commune de décalage (liée à une ou plusieurs transformations erronées de systèmes de projection), les décalages observés se situent principalement dans une gamme de 100 à 200 m et dépassent donc nettement la limite de tolérance de 25 m qu'on s'est accordé.

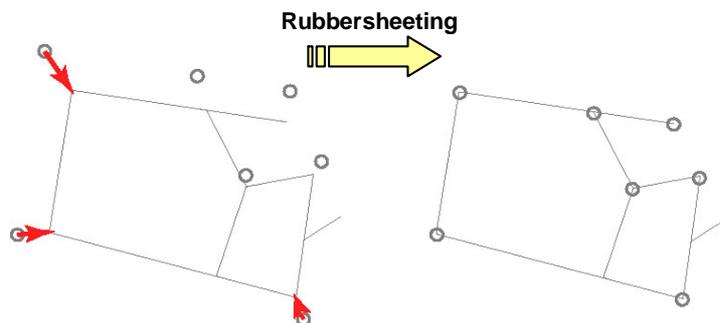


Figure 10 : Principe de la déformation par « rubbersheeting » : le repositionnement (flèches rouges) de quelques stations (ronds) situées sur des noeuds remarquables du réseau routier (lignes), est répercuté de proche en proche, aux stations environnantes.

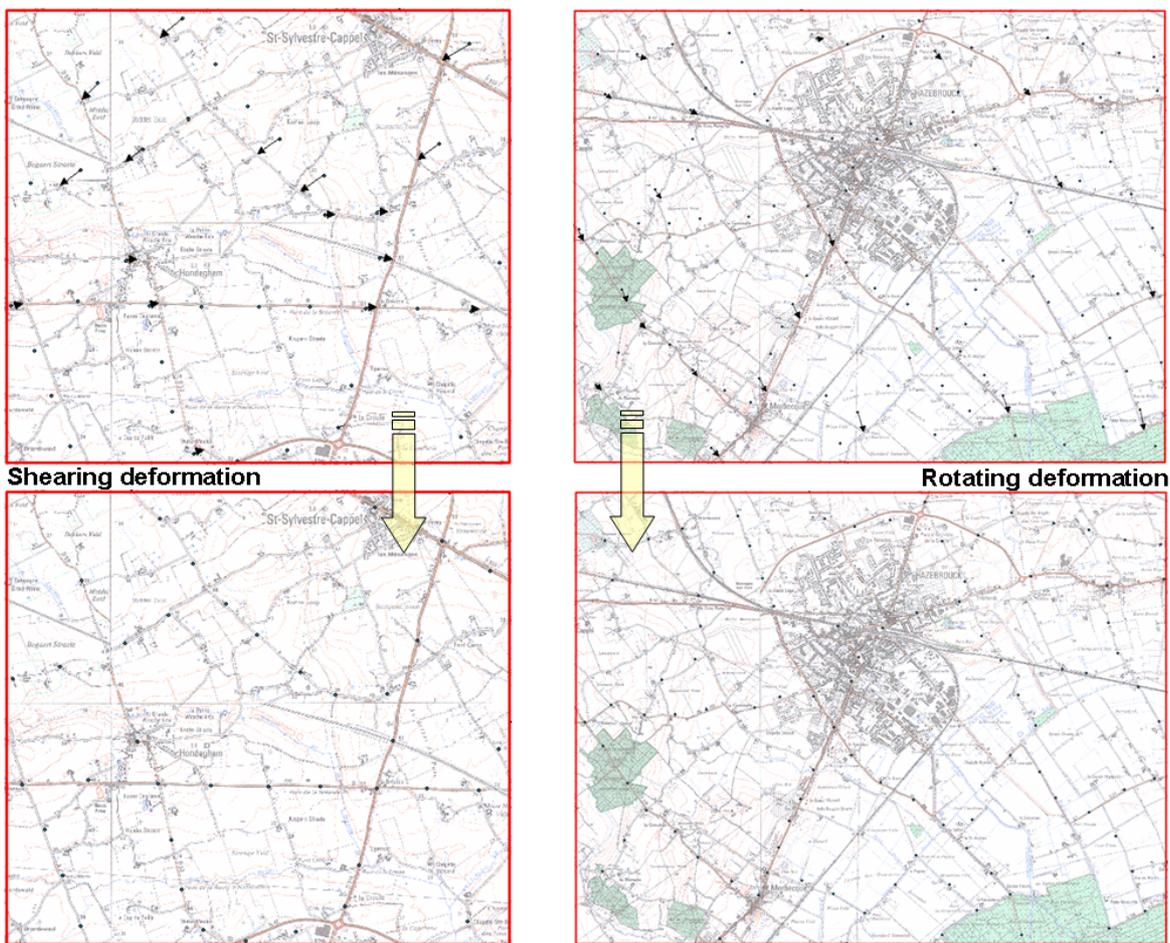


Figure 11 : Exemples de mise en œuvre (avant : en haut, après : en bas) de la méthode « rubbersheeting » pour des déformations du positionnement de type cisailante (gauche) ou tournante (droite).

- Résultats obtenus par les deux méthodes de recalage du positionnement

31 missions sur les 173 contrôlées ont été identifiées comme présentant un défaut de positionnement significatif et organisé, auxquelles on a appliqué un repositionnement de type Rubbersheeting.

La méthode de repositionnement automatique par translation a été appliquée à l'ensemble des 173 études.

On a reporté en Figure 12 les déplacements moyens des études, obtenus par les deux méthodes : pour les 31 études par la méthode rubbersheeting et pour l'ensemble des 173 études par la méthode automatisée.

On renvoie à Martelet et Debeglia (2006) pour l'évaluation détaillée de la qualité des déplacements restitués par chacune des méthodes.

En résumé, cette évaluation menée sur la base de 2 indicateurs montrait que :

- la différence d'altitude moyenne des stations avec le MNT était toujours améliorée, pour toutes les études et par les 2 méthodes,
- cette amélioration pouvait varier de quelques pourcents à 30-40 % pour de nombreuses études et même près de 80 % pour une en particulier,
- l'amélioration apportée par les 2 méthodes était souvent assez proche.

Pour décider *in fine* quel type de repositionnement serait appliqué, mission par mission, on a combiné les résultats des deux indicateurs de qualité pour chacune des deux méthodes mises en œuvre. Un contrôle visuel avait finalement été réalisé pour s'assurer que le repositionnement des stations, étude par étude s'était opéré correctement.

Au total, 41 missions (dont les décalages excédaient la trentaine de mètres) ont été repositionnées.

L'ensemble des repositionnements mis en œuvre et intégrés dans la Banque Gravimétrique de la France, dans 2 nouveaux champs « Xreposit » et Yreposit » créés à cet effet, sont détaillés dans Martelet et Debeglia (2006).

On peut donc considérer à la suite de ce travail que l'ensemble des 173 études qui constituent la BGF sont désormais positionnées avec une précision d'ensemble compatible avec le 1/50 000<sup>e</sup> et souvent jusqu'au 1/25 000<sup>e</sup>.

Cela n'exclut cependant pas que, pour des stations particulières, les défauts de positionnement excèdent 25 m : il est rappelé que le repositionnement réalisé visait à corriger les biais systématiques et/ou organisés de positionnement des études, et nullement des imprécisions individuelles du positionnement des stations.

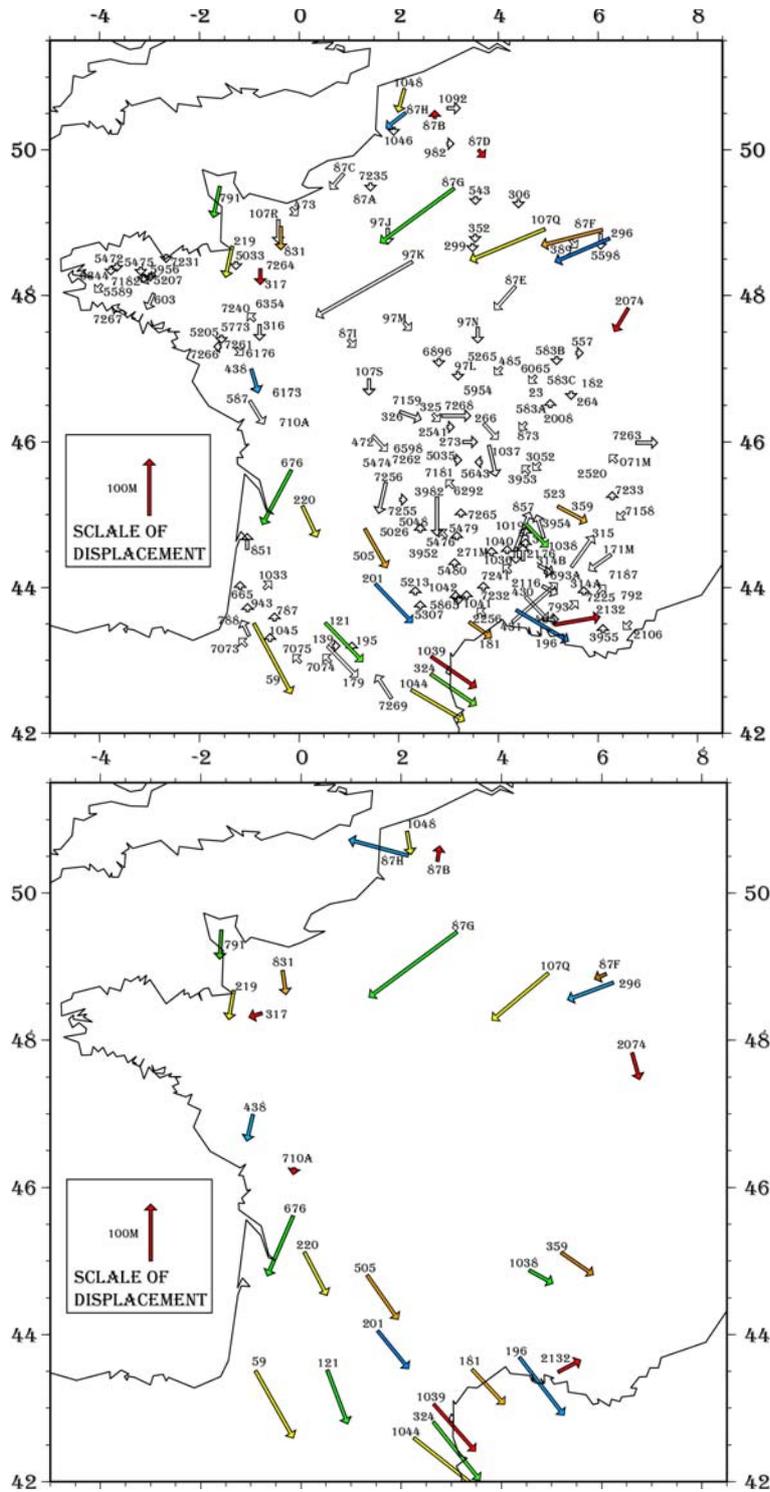


Figure 12 : Déplacements moyens des études gravimétriques de la BGF obtenus (avec indication du numéro de Code Minier), en haut, par la méthode d'ajustement numérique et en bas, par la méthode « rubbersheeting ».

Pour la quarantaine d'études dont le positionnement a été modifié, il s'est avéré nécessaire de remettre à jour le calcul des corrections de terrain (CT), puisque celles-ci dépendent très directement de la position de la station par rapport aux reliefs environnants : si la station « bouge », sa CT est modifiée.

Dans les zones assez plates, cet effet est faible, par contre, en zone de relief escarpé, la variation de la CT peut être très sensible. Et ceci est d'autant plus sensible que, lors du calcul numérique de la CT à l'aide de MNT, la différence d'altitude entre la station gravimétrique et le MNT est un des facteurs majeurs d'erreur sur la détermination de la CT (Martelet et Debeglia, 2001).

L'amélioration du positionnement se répercute donc directement sur la qualité des corrections de terrain et l'anomalie de Bouguer.

### **3.3. CALCUL ET HOMOGENEISATION DES CORRECTIONS DE TERRAIN**

#### **3.3.1. Evolution des corrections de terrain dans la BGF**

Une grande partie des données gravimétriques françaises a été acquise au cours des 60 dernières années, en particulier dans les années 1950 à 1970 lors de levés systématiques réalisés par le BRGM. Dans le même temps, les techniques de calcul des corrections de terrain (CT) ont beaucoup évolué : à l'origine réalisées manuellement à l'aide d'abaques, elles sont aujourd'hui généralement calculées à l'aide de moyens informatiques.

Le choix du rayon maximal de calcul des CT autour de chaque station gravimétrique a aussi varié au cours du temps.

Lors de la dernière édition de la Carte Gravimétrique de la France en 1998, les corrections de terrain étaient celles des données originellement transmises au BRGM, avec des rayons de correction compris entre 0 et 167 km selon les études. Parfois même, ce paramètre n'était pas connu (Figure 13). On peut toutefois noter que classiquement, dans les années 1960-1970 au BRGM, les CT étaient calculées jusqu'à une distance de 22 km. Aujourd'hui, sur la base des travaux de Bullard (1936), les membres de la communauté gravimétrique s'accordent sur des CT étendues jusqu'à 167 km.

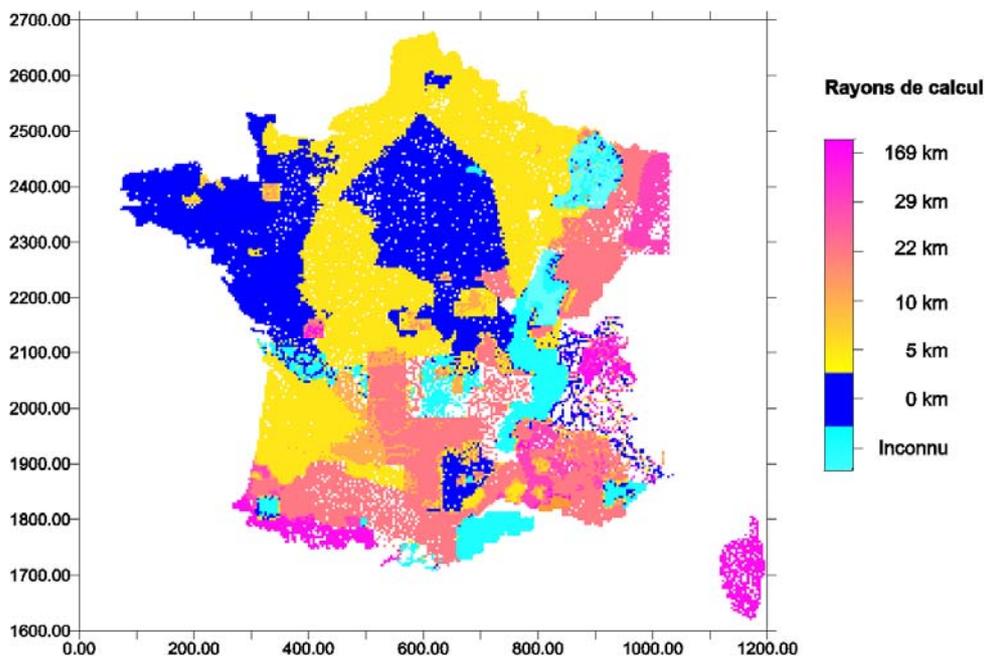


Figure 13 : Etat des corrections de terrain dans la BGF, lors de la dernière édition de la Carte Gravimétrique de la France en 1998 (d'après Grandjean et al., 1998)

Dans le bilan d'erreur de l'anomalie de Bouguer, la part d'erreur associée à l'imprécision sur la détermination de la correction de terrain peut être prépondérante, notamment dans les zones de relief accidenté. En effet, les CT peuvent atteindre plusieurs dizaines de milligals en zone montagneuse, soit une contribution de plusieurs dizaines de pourcents à l'anomalie de Bouguer.

Historiquement, pour une partie de la BGF, on a réalisé la reprise des corrections de terrain par un calcul informatisé jusqu'à 167 km pour la première fois en 1999, à l'occasion d'une synthèse des données gravimétriques des Alpes réalisée par l'USTL avec la coopération du BRGM (Masson et al., 1999).

En 2001, hormis la zone des Alpes précédemment recalculée, les corrections de terrain de la BGF avaient été homogénéisées une première fois jusqu'à la distance de 167 km (Martelet et Debeglia, 2001 ; Martelet et al., 2002). Faute d'une bathymétrie côtière suffisamment précise, les CT des stations gravimétriques d'une bande côtière de 10 km n'avaient pas été calculées.

En 2006, suite au repositionnement d'une partie des stations gravimétriques de la BGF (voir chapitre précédent), un second recalcul des corrections de terrain jusqu'à 167 km avait été réalisé (Martelet et Debeglia, 2006). Lors des calculs de 2001, on avait mis en évidence une forte sensibilité de l'algorithme CORTOP utilisé, à l'existence de différences d'altitude entre la station gravimétrique et le MNT.

Pour cette raison notamment, en 2006 on a mis en œuvre un nouvel algorithme de calcul de corrections de terrain. L'algorithme utilisé était celui de Geosoft (version

5.0.8) ; l'ensemble des tests réalisés et résultats obtenus par cet algorithme sont discutés dans Martelet et Debeglia (2006).

En 2009, de nouvelles comparaisons d'algorithmes de corrections de terrain ont mis en évidence une erreur du calcul de CT réalisé en 2006, lié à un défaut de l'algorithme utilisé alors.

Les tests de 2009 (voir paragraphe suivant) ont révélé que la version 5.0.8 de Geosoft utilisée en 2006, ne prenait pas correctement en considération l'effet à terre des masses marines situées dans le rayon de calcul.

Ces éléments sont discutés ci-dessous et une nouvelle carte de corrections de terrain calculée pour l'ensemble de la BGF jusqu'à la distance de 167 km est présentée.

### 3.3.2. Test d'algorithmes de calcul de corrections de terrain

En 2009, dans le cadre d'un travail conjoint entre le BRGM, le BGI, l'IPGP et le CNES, en support au projet WGM (World Gravity Map) du BGI, des tests d'algorithmes de corrections de terrain ont été menés avec pour objectif d'identifier un outil capable de calculer des corrections de terrain à terre et en mer, de manière rapide et juste, pour les besoins d'une carte gravimétrique mondiale.

Ne sont présentés ci-dessous que les résultats en relation avec l'établissement de la carte gravimétrique de la France. Les algorithmes concernés sont :

- Cortop, algorithme BRGM utilisé en 2001 lors de la 1<sup>ière</sup> homogénéisation des CT sur la France (hors Alpes),
- Geosoft 5.0.8, utilisé en 2006, lors du recalcul des CT de l'ensemble de la Banque Gravimétrique de la France, suite au repositionnement des stations,
- Geosoft 7.1, utilisé en 2009, pour recalculer les CT de la nouvelle carte de Bouguer, objet du présent rapport.

On a testé ces 3 algorithmes sur un jeu de données gravimétriques globales, échantillonnées sur une grille au pas de 5 minutes d'arc.

Le calcul réalisé a été décomposé en 2 couronnes :

- CT intermédiaire, entre 2 et 20 km, avec le MNT DTM2006, au pas de 1 mn d'arc,
- CT lointaine, entre 20 et 167 km, avec le MNT Etopo2 au pas de 2 mn d'arc.

L'ensemble des calculs ont été réalisés sur des jeux de données projetés, sur une zone de 12° de côté, incluant le nord du Maroc et le sud de l'Espagne, en domaine terrestre et marin (Figure 14).

Les résultats des tests ne sont présentés que pour la partie terrestre, qui seule intéresse le calcul des corrections de terrain de la BGF. A noter que les tests n'ont pas encore permis, pour la partie marine de dégager avec certitude un algorithme qui calcule juste. Des travaux complémentaires se poursuivent.

Pour la partie terrestre, les CT obtenues par Cortop et Geosoft, versions 5.0.8 et 7.1 sont présentées en Figure 14 a, b et c respectivement.

Les 3 algorithmes fournissent dans l'ensemble des résultats comparables ; plus en détail, on constate que la CT de la version 5.0.8 de Geosoft (Figure 14b) fournit, aux abords des côtes, une estimation de la CT moins élevée.

Les 2 résultats de Cortop et Geosoft 7.1, très comparables et également très comparables à ceux (non-présentés ici), obtenus par l'algorithme Fa2Boug (Fullea et al., 2008) nous laissent penser que ces 3 algorithmes sont corrects à terre. L'algorithme de Geosoft 5.0.8 apparaît erroné ; à en juger par la différence qui se concentre le long des côtes, l'algorithme ne doit pas prendre correctement en compte l'effet des masses marines situées dans le rayon de calcul de points situés à terre. Cette erreur n'avait pas été détectée en 2006 car les tests réalisés avaient concerné une zone éloignée de l'océan (voir Martelet et Debeglia, 2006 pour le détail).

Pour cette raison une nouvelle carte de corrections de terrain a été recalculée en 2009 pour l'ensemble de la BGF jusqu'à la distance de 167 km. Pour ce calcul, la version de Geosoft 7.1 a été adoptée, pour les mêmes raisons qui en 2006 avaient fait préférer Geosoft à Cortop (Martelet et Debeglia, 2006).

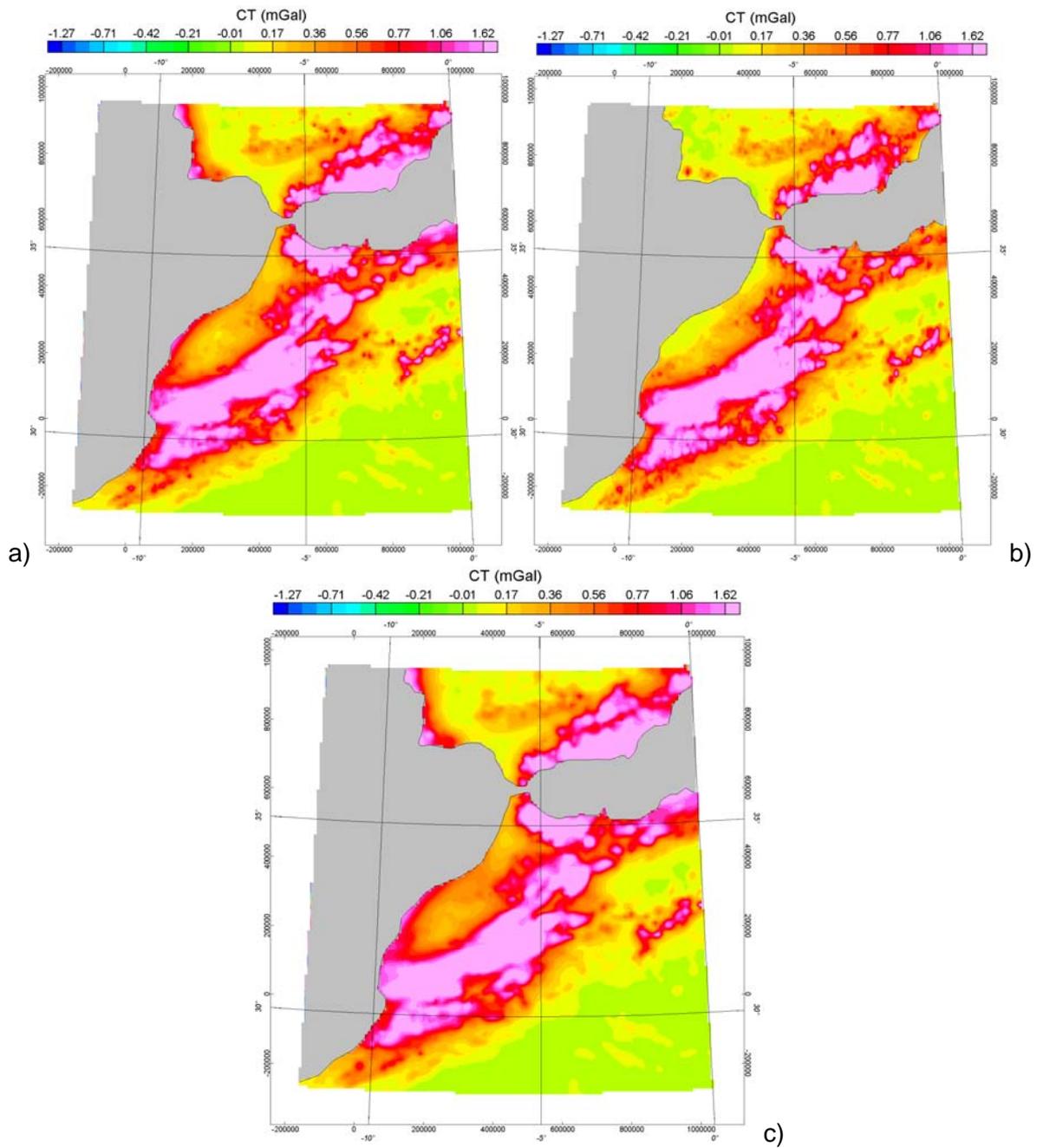


Figure 14 : Comparaison de calculs de corrections de terrain autour du détroit de Gibraltar : a) par Cortop, b) par Geosoft 5.0.8, c) par Geosoft 7.1. On constate le très bon accord visuel entre a) et c), tandis que b) présente, à proximité des côtes une différence nette.

### 3.3.3. Recalcul des corrections de terrain de l'ensemble des stations de la BGF par l'algorithme de Geosoft v7.1

Suite au repositionnement des stations de la BGF (voir paragraphe 3.2), et compte-tenu des résultats des tests d'algorithmes de corrections de terrain réalisés en 2009 (paragraphe précédent), on a recalculé les CT de l'ensemble des 414 000 stations de la BGF.

Comme précédemment (Martelet et Debeglia, 2001 ; Martelet et Debeglia, 2006), les calculs ont été réalisés en considérant les couronnes suivantes :

- **CT proche**, jusqu'à 3km, avec un MNT au pas de 50 m,
- **CT intermédiaire**, entre 3 et 10 km, avec un MNT au pas de 250 m,
- **CT lointaine**, entre 10 et 167 km, avec un MNT au pas de 1 km.

Les calculs ont été réalisés avec la version 7.1 de Geosoft, pour une densité de 2,6.

Les cartes de correction de terrain pour les 3 couronnes ci-dessus sont présentées en Figure 15a, Figure 15b et Figure 15c respectivement (présentation sous forme de grilles interpolées par minimum de courbure au pas de 1 km).

L'effet prépondérant du relief proche des stations gravimétriques apparaît nettement, en particulier dans les zones montagneuses. A l'inverse, sur la carte des effets topographiques lointains, de grandes longueurs d'onde apparaissent nettement, associées aux influences de terrains plus lointains et donc plus lissées.

La nouvelle carte de corrections de terrain calculée jusqu'à 167 km pour l'ensemble de la BGF est présentée en Figure 16 (présentation sous forme d'une grille interpolée au pas de 1 km).

Au premier ordre, la CT apparaît corrélée à la rugosité et à l'altitude des reliefs. Comparée à la carte des CT qui existait au départ de cette étude (encart sur la Figure 16), la nouvelle carte 1/ ne comporte plus de zones où la CT est nulle, 2/ présente une CT légèrement accrue, en particulier sur et au pourtour des reliefs (Massif Central, Pyrénées), 3/ intègre une variation des CT de grande longueur d'onde, cohérente à l'échelle de la France.

L'évolution des cartes de correction de terrain au fur et à mesure de leurs améliorations depuis 1998 est présentée et commentée en Annexe 1.

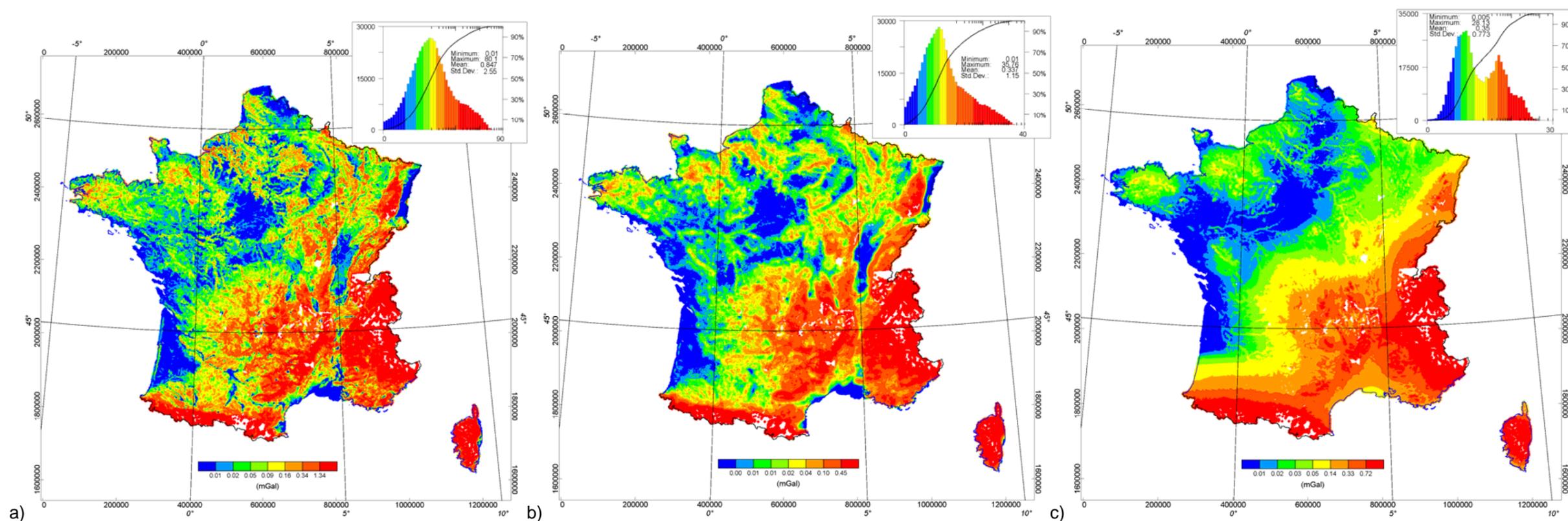


Figure 15 : Répartition des CT calculée (avec la version 7.1 de Geosoft, pour une densité de 2,6) pour les 3 couronnes 50m/3km, 3km/10km et 10km/167km, sous forme de cartes et d'histogrammes (on notera l'échelle semi-logarithmique). On remarquera la décroissance de l'effet du terrain à mesure que l'on s'éloigne de la station gravimétrique. On remarquera également que le relief a un effet particulièrement sensible sur les CT proches (50m/3km).

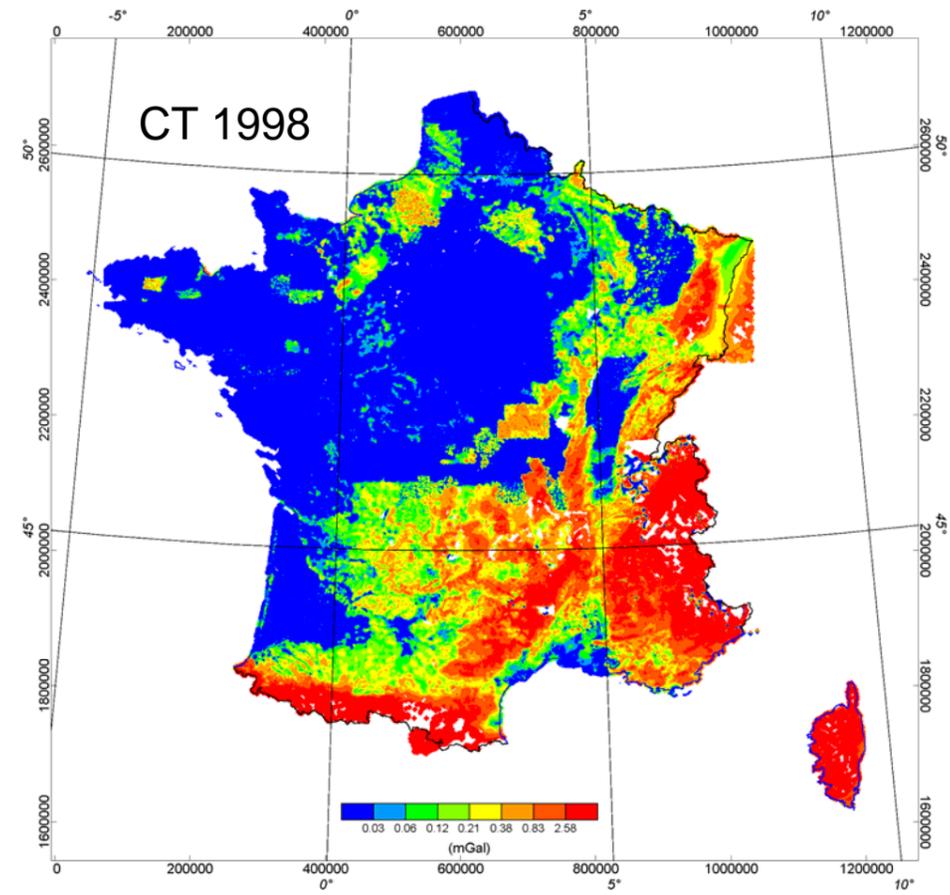
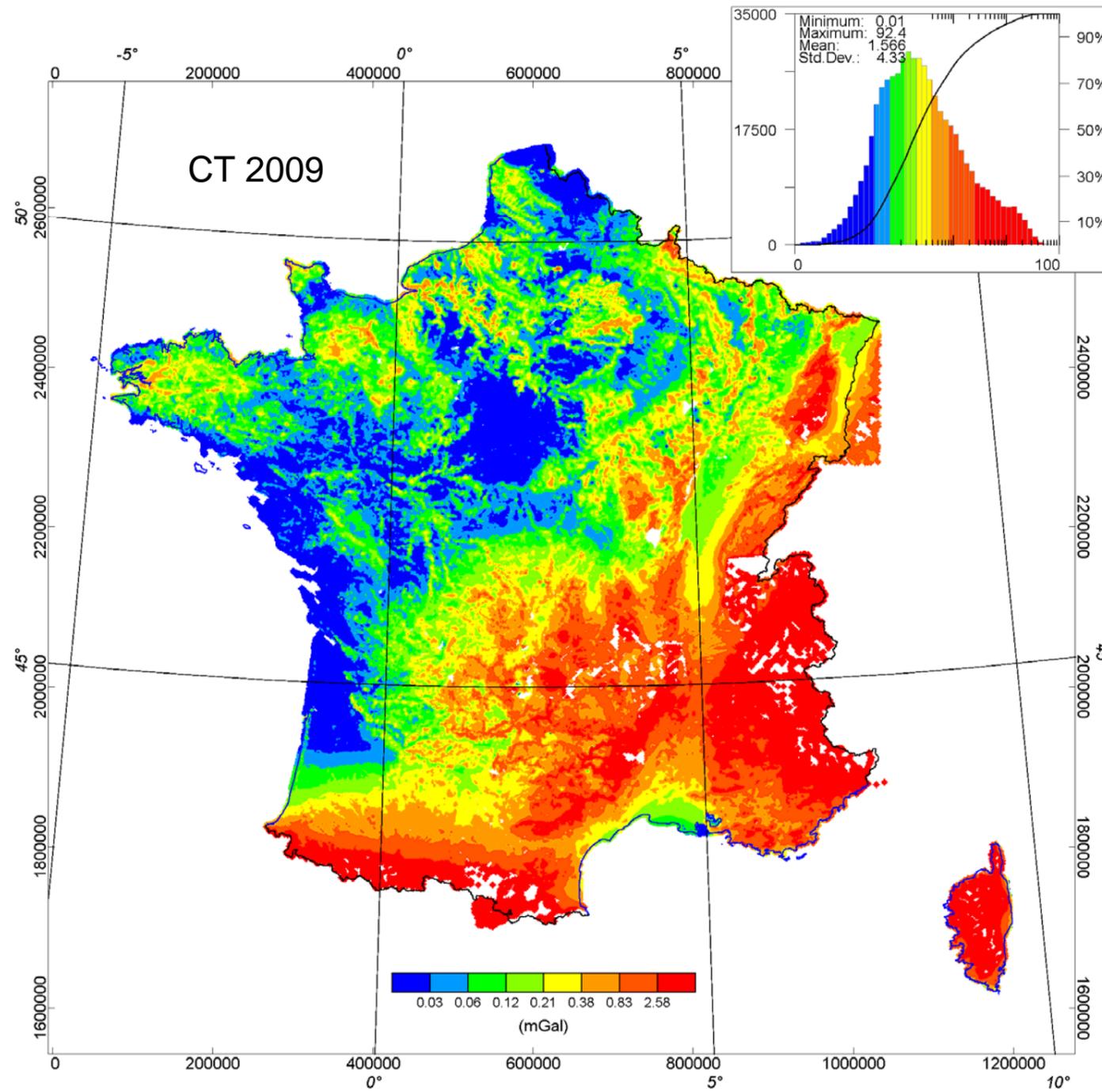


Figure 16 : A gauche, nouvelle carte des CT calculées jusqu'à la distance de 167 km (calcul réalisé avec la version 7.1 de Geosoft, pour une densité de 2,6). Pour l'ensemble de la zone, 90% des CT sont inférieures à 10 mGal. Elles croissent sur les reliefs et atteignent environ 40 à 50 mGal pour les plus fortes valeurs. En comparaison de la carte des CT utilisée lors de la précédente édition de la Carte Gravimétrique de la France, en 1998 (en encart, à droite). Une carte des différences est présentée en Annexe 1.

## 4. La nouvelle carte gravimétrique de la France – RCGF09

### 4.1. LA NOUVELLE CARTE D'ANOMALIES DE BOUGUER DE LA FRANCE

Sur la base des améliorations présentées aux paragraphes qui précèdent, une nouvelle carte d'anomalies de Bouguer de la métropole et de la Corse a été produite.

En synthèse, par rapport à la précédente édition de 1998, elle intègre :

- près de 40 000 stations gravimétriques supplémentaires, ce qui porte le nombre total de stations à 414 000 environ,
- un positionnement des stations révisé pour une quarantaine d'études (sur 173), soit près de 200 000 stations, qui assure désormais une localisation des stations compatible avec le 1/50 000<sup>e</sup> et souvent jusqu'au 1/25 000<sup>e</sup>,
- une homogénéisation des corrections de terrain de l'ensemble de la BGF, jusqu'à 167 km par un re-calcul des CT de l'ensemble des 414 000 stations qui la constituent.

La nouvelle carte d'anomalies de Bouguer a été calculée pour une densité de réduction de 2,6.

Pour les zones marines et les zones hors du territoire français, les données utilisées sont identiques à celles utilisées dans la version antérieure de la carte, (Grandjean et al., 1998). On se reportera à cette publication pour le détail des sources.

La nouvelle carte d'anomalies de Bouguer est présentée (Figure 17 et Planche 1) en référence au système gravimétrique CGF65 ; elle existe également dans les systèmes IGSN71 et RGF83 (disponible en téléchargement libre sur <http://infoterre.brgm.fr>). Elle sera convertie en référence au nouveau réseau IGN dès que celui-ci sera publié.

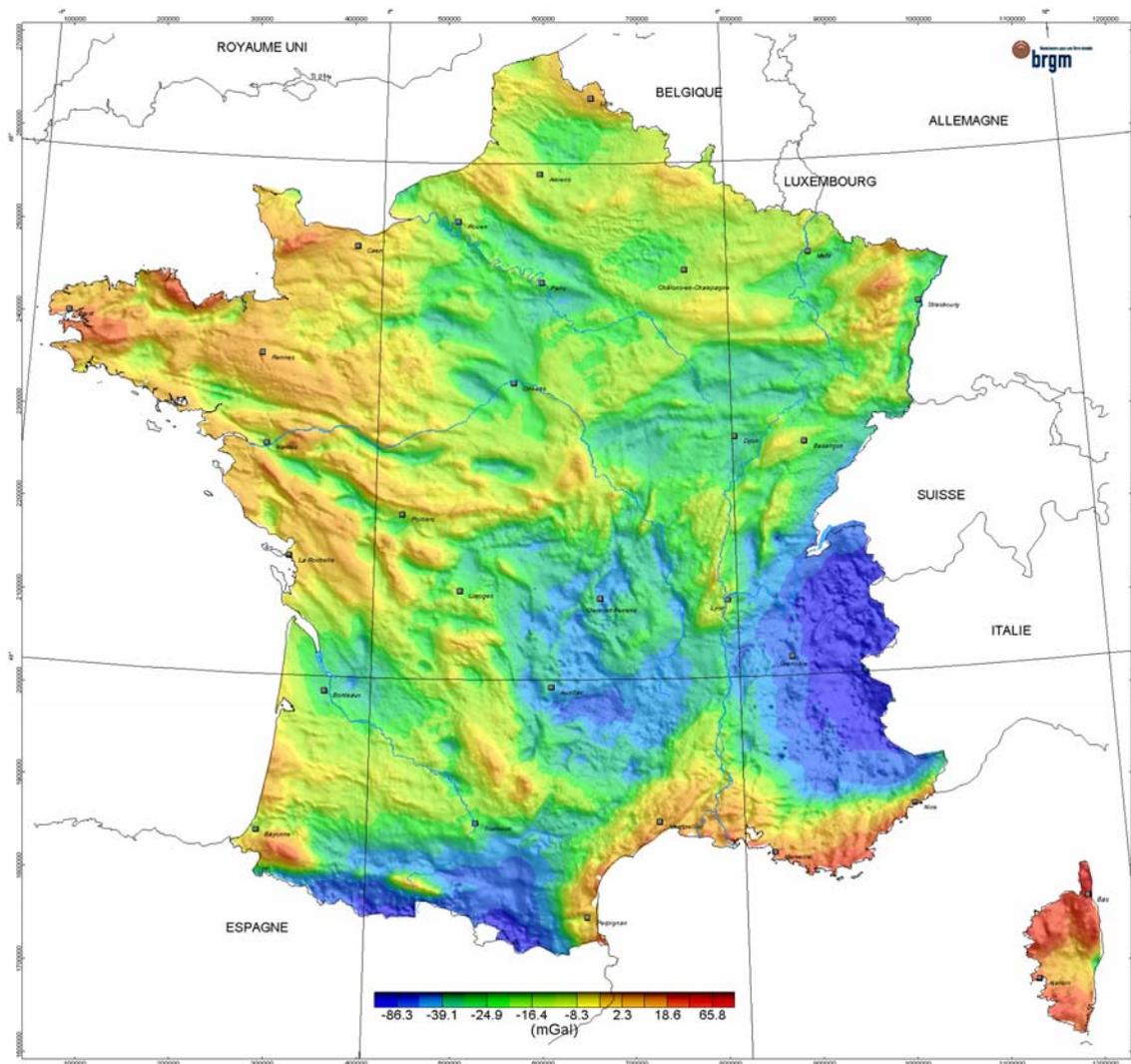


Figure 17 : Nouvelle carte d'anomalies de Bouguer RCGF09. Densité de réduction 2,6. Ombrage par le gradient vertical de l'anomalie de Bouguer.

#### 4.2. COMPLEMENTS SUR LA PRECISION DE LA NOUVELLE CARTE D'ANOMALIES DE BOUGUER

Un algorithme VALIDG de prédiction de Bouguer pour une station et validation par rapport à ses stations environnantes avait été élaboré et testé (Martelet et Debeglia, 2004, 2005) ; voir Annexe 2.

Cet algorithme a pour objectif de mettre en évidence des stations présentant, par rapport à leur voisines, une valeur anormalement forte ou basse, et réalise pour cela un calcul de prédiction par méthode Akima (Martelet et Debeglia, 2005).

Le fonctionnement et un test de l'algorithme sont présentés en Annexe 2. Sur le jeu de données utilisé, ce test montre que l'algorithme permet effectivement d'extraire les stations anormales ; lorsque la station est nettement anormale, mais aussi à des niveaux d'écart plus faibles selon le degré de précision recherché par l'utilisateur.

Dans ce qui suit, VALIDG a été utilisé sur l'ensemble de la BGF (métropole et Corse) pour :

- 1- identifier des stations erronées,
- 2- présenter une nouvelle carte indicatrice de la qualité de la cohérence spatiale des anomalies de Bouguer de la BGF.

#### 4.2.1. Identification de stations erronées.

L'objectif poursuivi étant d'identifier les stations les plus clairement erronées, les paramètres adoptés pour la validation sont les suivants (voir Annexe 2 pour une description détaillée de ces paramètres et leur influence) :

Raymax = 10 000 m ; toldz = 250 m ; kdata = 40 ; tol = 5 mGal ; ksig = 3.

Une illustration du résultat obtenu sur une zone test de 100x100 km, située dans le sud ouest de la France, totalisant 6065 stations gravimétriques, est donnée en Figure 18.

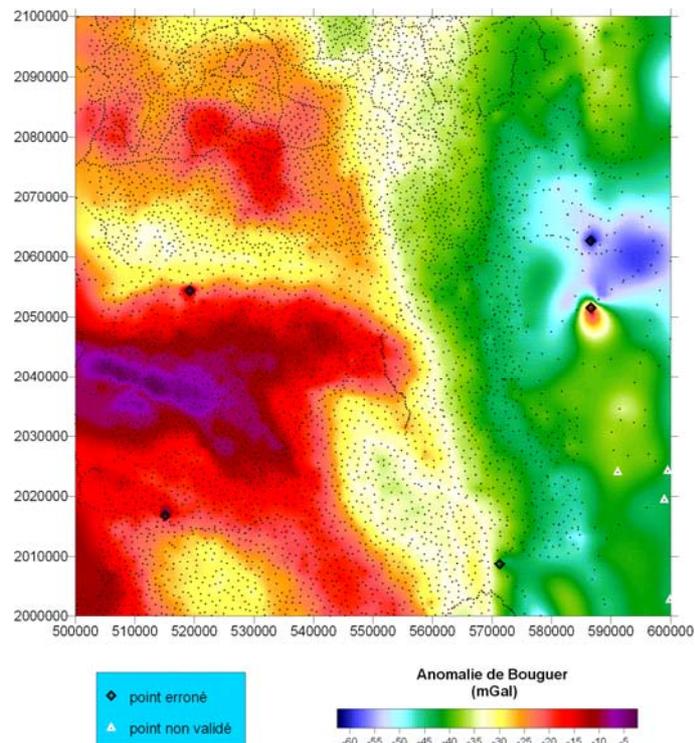


Figure 18 : Exemple de résultat obtenu localement par VALIDG pour l'identification de station douteuses. Paramètres : Raymax = 10000 m ; toldz = 250 ; kdata = 40 ; tol = 5 mGal ; ksig = 3

VALIDG a été mis en œuvre pour l'ensemble de la BGF :

- 1- En 2006, avant repositionnement et recalcul des CT (Martelet et Debeglia, 2006)
- 2- En 2006, après correction du positionnement et recalcul des CT jusqu'à 167 km (Martelet et Debeglia, 2006).
- 3- En 2009, sur la dernière version de la carte d'anomalies de Bouguer présentée dans ce rapport.

En 2006, avant repositionnement et recalcul des CT, le nombre de stations identifiées comme douteuses est de 634 ; après repositionnement et recalcul des CT, ce nombre décroît à 351 stations (Martelet et Debeglia, 2006).

A noter que ces stations n'avaient pas été retirées de la base de données.

En 2009, sur la base de données intégrant l'ensemble des améliorations présentées plus haut dans ce rapport, le nombre de stations douteuses identifiées par VALIDG décroît à 194 (Figure 19). Les stations où la prédiction n'est pas possible compte-tenu du trop faible nombre de stations au voisinage sont au nombre de 154.

Après contrôle de détail, et si aucune correction ne peut y être apportée, les stations douteuses seront retirées de la BGF.

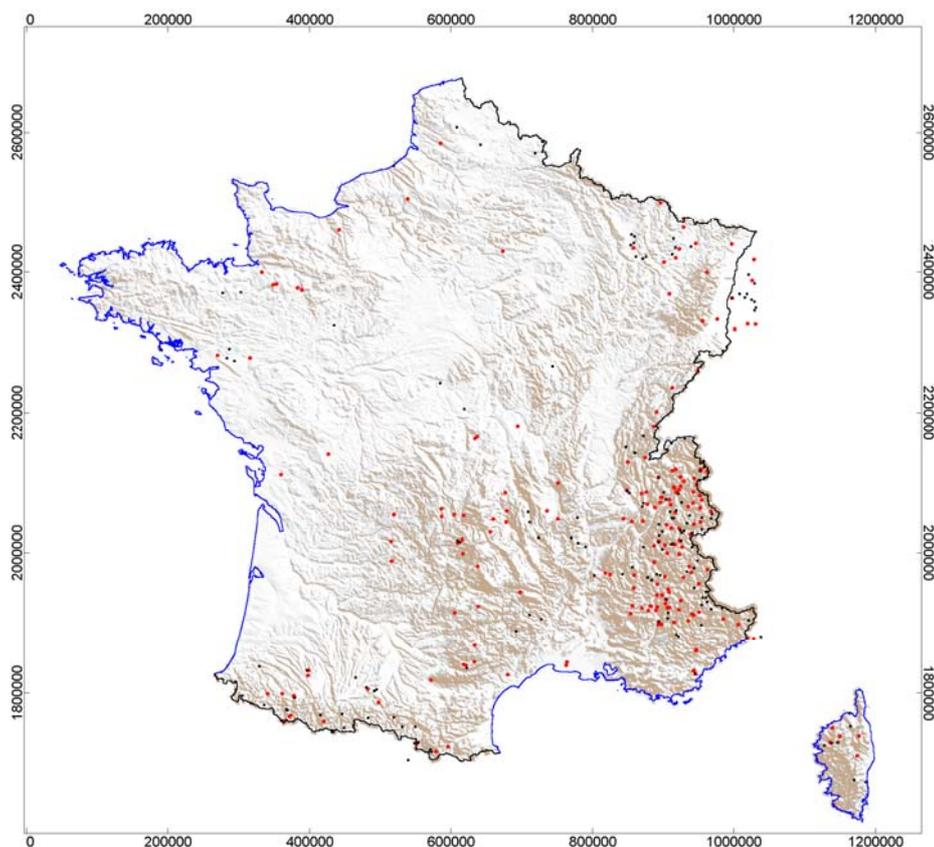


Figure 19 : Carte de localisation des stations douteuses de la BGF (en rouge) où l'écart entre anomalie de Bouguer prédite et calculée excède 5 mGal. En noir, stations où la prédiction n'a pu être calculée (trop peu de stations voisines). En fond, ombrage du relief.

#### 4.2.2. Carte de cohérence indicatrice de la précision intrinsèque des anomalies de Bouguer

Pour toutes les stations autres que celles identifiées comme douteuses ou celles où la prédiction VALIDG n'a pu être réalisée, 99.83 % des stations ont un écart entre la Bouguer prédite et la Bouguer mesurée inférieur à 5 mGal, avec un écart en moyenne de  $0.54 \pm 0.87$  mGal (cf. histogramme, Figure 20).

Les stations présentant un écart plus important sont situées dans des zones où l'anomalie de Bouguer varie rapidement et présentent un écart [prédiction – mesure] qui quoiqu'élevé, reste inférieur à trois fois l'écart-type de la Bouguer des stations proches.

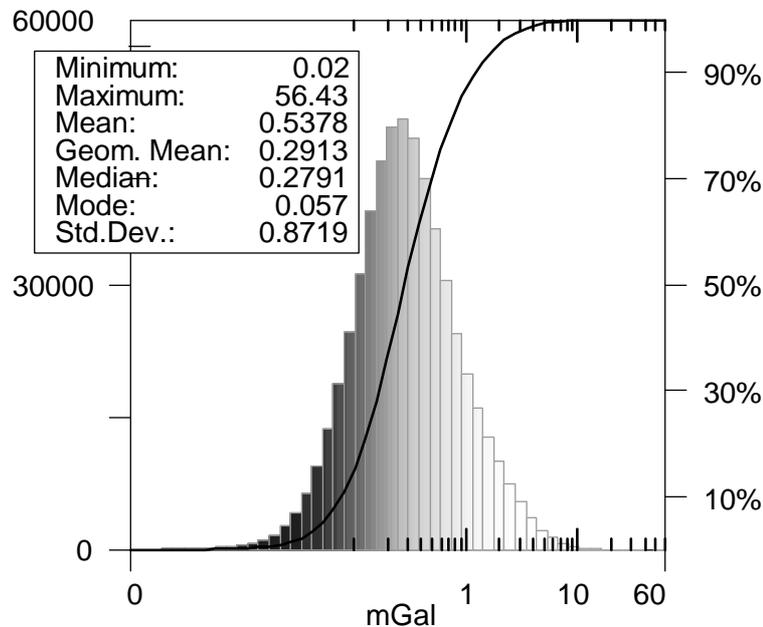


Figure 20 : Histogramme des écarts entre Bouguer prédite et mesurée aux stations de la BGF. Noter la représentation semi-logarithmique.

Une carte de répartition des écarts de prédiction de l'anomalie de Bouguer a été réalisée pour l'ensemble de la BGF (Figure 21a). Elle donne une vision de la cohérence de l'anomalie de Bouguer entre stations, et constitue, dans une certaine mesure, un indicateur de la précision intrinsèque des anomalies de Bouguer de la Banque Gravimétrique de la France. Il ne s'agit cependant pas d'une véritable carte de précision.

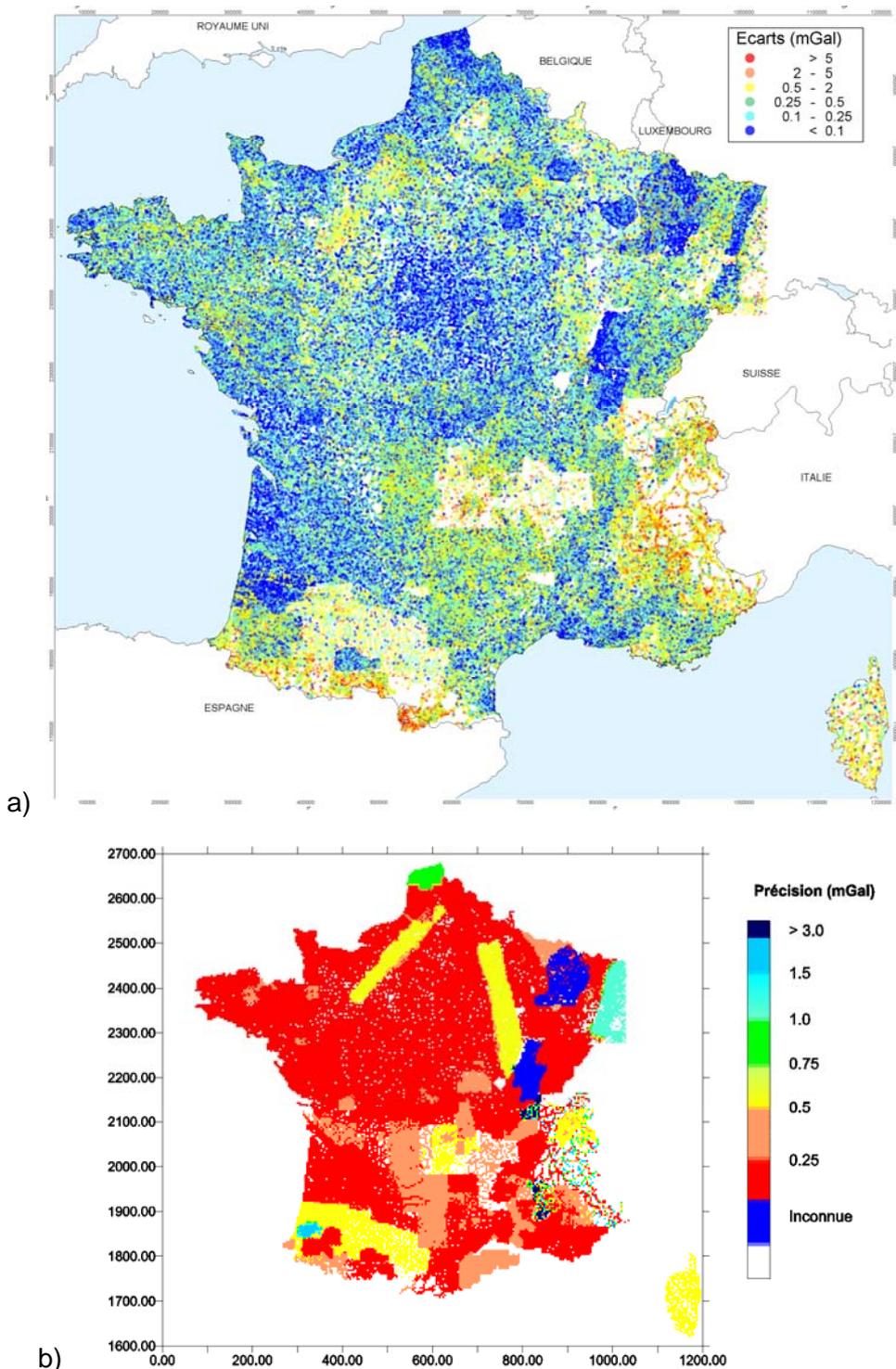


Figure 21 : a) Carte des écarts de prédiction de l'anomalie de Bouguer aux stations gravimétriques. Cette carte donne une image de la cohérence spatiale intrinsèque de l'anomalie de Bouguer pour l'ensemble de la Banque Gravimétrique de la France. b) Précédente carte des précisions de mesures de la BGF, avant correction topographiques (Grandjean et al., 1998).

En particulier, certaines stations gravimétriques peuvent présenter des particularités topographiques ou géologiques locales (hétérogénéités de densité) qui induisent une mesure gravimétrique qui, quoique juste, pourra apparaître incohérente vis-à-vis des stations environnantes : par exemple, des stations implantées sur un sommet escarpé, comme le sont de nombreux points géodésiques, ou sur une anomalie lithologique, comme un relief volcanique dans un contexte sédimentaire, etc. Il sera évidemment impossible de distinguer ce type d'effet de réelles erreurs de mesures ou de corrections, sans un examen détaillé au cas par cas, voire même une densification de la couverture gravimétrique au voisinage de la station incriminée.

Par rapport à la carte de la précision des levés gravimétriques qui pré-existait (Figure 21b) (Grandjean *et al.*, 1998), cette nouvelle carte (Figure 21a) constitue une vision beaucoup plus réaliste de la qualité des données de la Banque Gravimétrique de la France. En effet, par rapport à la carte de 1998 qui ne tenait compte que des caractéristiques du matériel utilisé pour le levé gravimétrique (gravimètre et type de positionnement), on intègre ici à la fois ces éléments, mais aussi l'ensemble des facteurs d'erreur qui interviennent lors du traitement des données (souvent prépondérants par rapport aux erreurs d'acquisition), et en particulier l'imprécision sur le calcul des CT.

#### **4.3. COMPATIBILITE DE LA NOUVELLE CARTE AVEC LES RESEAUX GRAVIMETRIQUES ANCIENS ET LE NOUVEAU RESEAU ETABLI PAR L'IGN**

Les stations de la carte gravimétrique ont pour référence originelle le premier réseau gravimétrique national, le CGF65 (cf. § 2.1.2). Le réseau CGF65 a été rattaché au RGF 83 et une loi linéaire de conversion entre les deux systèmes a pu être établie (cf. § 2.1.4).

De cette façon, toutes les stations de la carte gravimétrique de la France sont maintenant converties dans le système RGF83.

De la même manière, une formule de conversion depuis le système CGF65 vers le réseau de référence international IGSN71, a été établie (cf. § 2.1.4) ; l'ensemble des stations de la carte gravimétrique de la France sont également converties dans le système IGSN71.

Avec la mesure par l'IGN de nouvelles stations gravimétriques de référence qui ont à terme vocation à constituer un nouveau réseau gravimétrique national, il est indispensable d'évaluer la compatibilité entre ce nouveau réseau et les cartes et réseaux préexistants. Cette évaluation revêt un double objectif :

- 1- rechercher d'éventuelles distorsions entre réseaux anciens et le nouveau réseau IGN,
- 2- rechercher d'éventuelles distorsions entre la carte gravimétrique et le nouveau réseau IGN.

### 4.3.1. Recherche de distorsions entre réseaux

Afin de rechercher d'éventuelles distorsions entre le réseau RGF83 et le nouveau réseau IGN, le BRGM a réalisé annuellement, depuis fin 2005, des rattachements systématiques entre les 53 bases RGF83 de 1<sup>er</sup> ordre préservées (ou leurs bases satellites, ou le nœud de second ordre le plus proche), et les nouvelles stations IGN et/ou des bases absolues.

L'analyse de ces liaisons est présentée dans les rapports Martelet et Debeglia (2005 ; 2006 ; 2007) et Martelet et Pajot, (2008).

77 bases IGN ont ainsi été occupées par le BRGM depuis 2005. Les valeurs de g établies par l'IGN à ces bases nous ont été transmises, arrondies à 0,1 mGal, en attendant la parution officielle du réseau.

Sans disposer de toute la précision sur les données IGN, il a d'ores et déjà pu être mis en évidence une excellente corrélation d'ensemble entre les valeurs IGN09 et RGF83. Cette corrélation est illustrée en Figure 22.

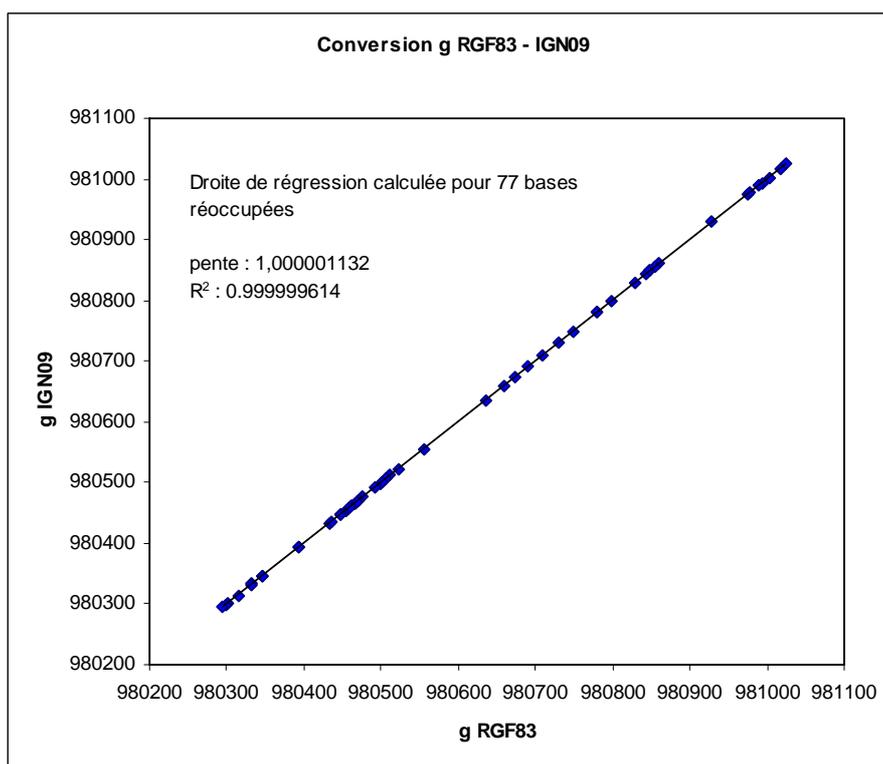


Figure 22 : Droite de corrélation entre valeurs de g mesurées sur 77 sites du nouveau réseau IGN09 et valeurs rattachées depuis le réseau RGF83.

En revanche la formule de conversion entre les anciens systèmes CGF65, RGF83 et le nouveau réseau IGN ne sera établie avec précision que lorsque le nouveau réseau IGN aura été publié.

De même, la comparaison des réseaux gravimétriques RGF83 et du réseau IGN ne peut pas être finalisée avec la précision nécessaire pour l'instant.

Mais les éléments dont on dispose, ci-dessus et dans les rapports 2005 à 2008, permettent d'ores et déjà d'établir qu'aucune distorsion sensible n'existe entre le nouveau réseau IGN et les anciens réseaux, de nature à affecter la banque de données et la carte gravimétrique du territoire publiée ici.

#### **4.3.2. Recherche de distorsions entre les réseaux et la carte gravimétrique**

Les nouvelles stations établies par l'IGN, qui ont pour vocation de devenir le futur réseau gravimétrique de la France ont été établies de manière totalement indépendante de la carte gravimétrique qui leur est antérieure puisque constituée de stations acquises depuis plus d'un demi-siècle. Cette carte est historiquement rattachée au réseau de bases CGF65. Il est donc indispensable de s'assurer que le futur réseau et la carte gravimétrique existante sont cohérents et ne présentent pas de distorsion l'un par rapport à l'autre.

Pour cela, une évaluation des écarts entre le nouveau réseau IGN et les stations de la carte gravimétrique a été réalisée, en comparant la pesanteur mesurée par l'IGN à ses stations à la pesanteur prédite par interpolation des stations de la banque gravimétrique les plus proches.

Pour cela, l'algorithme VALIDG (cf. § 4.2) a une nouvelle fois été mis en œuvre. La comparaison a été effectuée sur l'anomalie de Bouguer complète, afin de prendre en compte toutes les sources de variations lors de la prédiction (variations d'altitude et de latitude ainsi que l'effet du terrain). Les paramètres adoptés pour la validation sont les suivants (voir Annexe 2 pour une description détaillée de l'algorithme, de ses paramètres de contrôle et de leur influence) :

$Ray_{max} = 10\ 000\ m$  ;  $tol_{dz} = 250\ m$  ;  $k_{data} = 40$  ;  $tol = 5\ mGal$  ;  $k_{sig} = 3$ .

Afin de disposer d'éléments de comparaison, on a appliqué cette prédiction :

- Aux bases du réseau CGF65 (Figure 23),
- Aux bases du réseau RGF83 (Figure 24),
- Aux bases du futur réseau IGN (Figure 25).

On obtient donc pour chaque réseau une carte d'écart entre l'anomalie de Bouguer « mesurée » (en fait, calculée à partir de la valeur de  $g$  référencée en chaque base) et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes de la nouvelle carte gravimétrique de la France.

- Pour le réseau CGF65 la plupart des points pour lesquelles l'écart est fort (148 ronds gris) sont également des bases dont le positionnement est incertain (122 cercles noirs), notamment l'altitude, qui a été prise au niveau du MNT pour la prédiction. La prédiction pour ces stations cerclées de noir n'est pas fiable. Pour les autres stations, l'écart est très majoritairement faible (en moyenne :  $0,6 \pm 0,85$  mGal). Aucune distorsion systématique n'apparaît, ce qui semble logique compte-tenu du fait que la carte gravimétrique sur la base de laquelle est réalisée le calcul de prédiction, est pour l'essentiel établie par rattachements d'études aux bases du réseau CGF65. Les points où les écarts paraissent les plus élevés (en rouge et gris non cerclé), se localisent pour l'essentiel dans des zones de relief mouvementé, ce qui rend naturellement la prédiction difficile.

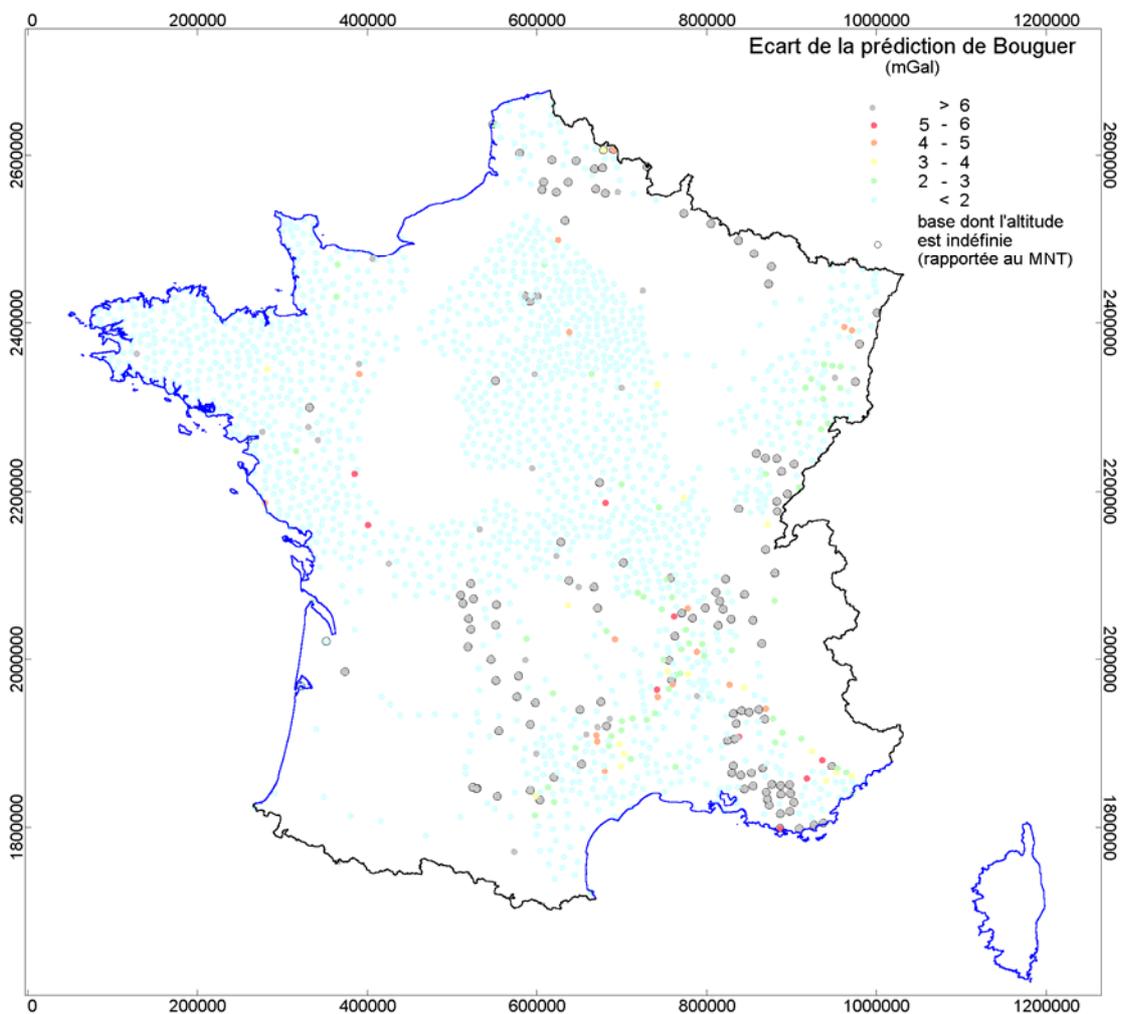


Figure 23 : Réseau CGF65 : écart entre l'anomalie de Bouguer mesurée et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes. La plupart des points pour lesquelles l'écart est fort (ronds gris) sont également des bases dont le positionnement est incertain (cercles noirs) – voir texte pour une explication détaillée.

- Pour le réseau RGF83, la plupart des bases ont un positionnement incertain (510 cercles noirs sur un total de 752 bases gravimétriques). Pour ces points l'altitude a été prise au niveau du MNT et la prédiction n'est donc pas fiable. Cependant, l'écart pour ces stations est très majoritairement inférieur à 2 mGal, ce qui laisse penser que le positionnement devait être correct malgré tout.

Pour les autres stations, l'écart de prédiction est en moyenne de  $1,27 \pm 1,4$  mGal).

Quoique le test réalisé soit peu fiable, compte-tenu du grand nombre de stations cercleées et donc non-indicatives, aucune distorsion systématique ne semble apparaître. Comme pour le CGF65, les points où les écarts paraissent les plus élevés (en rouge et gris non cerclé), se localisent pour l'essentiel dans des zones de relief mouvementé, ce qui rend naturellement la prédiction difficile.

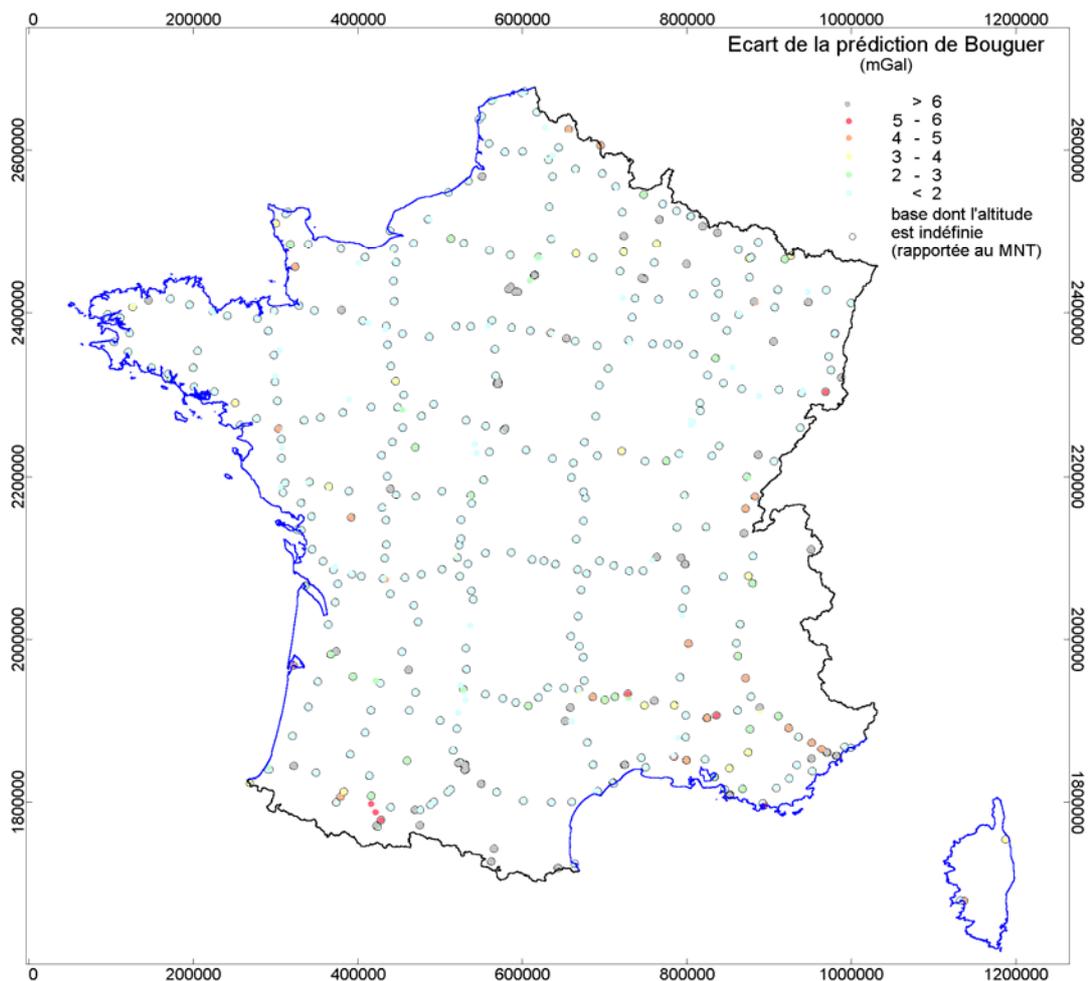


Figure 24 : Réseau RGF83 : écart entre l'anomalie de Bouguer mesurée et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes. La plupart des points ont un positionnement incertain (cercles noirs) ce qui rend la prédiction douteuse – voir texte pour une explication détaillée.

- Pour le futur réseau IGN, les bases sont co-localisées avec le réseau géodésique RBF, et sont donc parfaitement positionnées. La prédiction est donc dans ce cas optimale. De fait, la très grande majorité des bases du futur réseau ont un écart de prédiction faible (inférieur à 2 mGal) : il est en moyenne de  $0,7 \pm 1,08$  mGal.

La carte de la Figure 25 montre sans ambiguïté qu'aucun systématisme géographique ne se dessine qui permettrait d'expliquer les écarts de prédiction de Bouguer calculés. Comme pour le CGF65 et le RGF83, les points où les écarts paraissent les plus élevés (en rouge et gris) semblent se localiser pour l'essentiel dans des zones de relief mouvementé, ce qui rend naturellement la prédiction difficile.

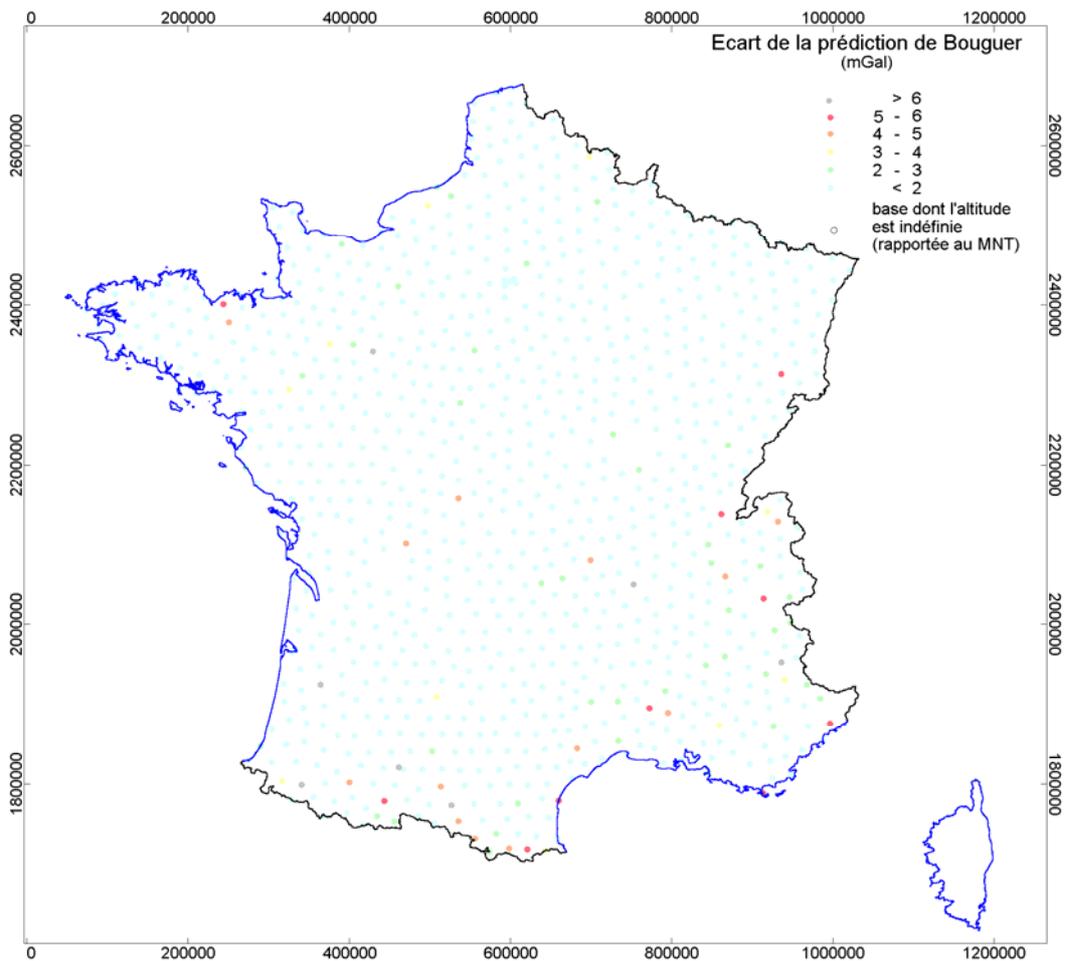


Figure 25 : Réseau IGN09 : écart entre l'anomalie de Bouguer mesurée et l'anomalie prédite à partir des stations environnantes – voir texte pour une explication détaillée.

Plus en détail, il s'agira d'analyser la source des écarts de prédiction les plus importants avant d'intégrer et de diffuser les nouvelles bases IGN (lorsque le réseau aura été officiellement publié). Une analyse rapide de quelques stations qui présentent des écarts importants a par exemple permis de mettre en évidence des bases particulières telles que :

- plusieurs stations de base dans le tunnel du Mont Blanc : dans ce cas, le calcul de prédiction est totalement faussé puisque l'anomalie de Bouguer classique ne prend pas en considération la masse des terrains situés au dessus du tunnel,
- la base 3033906 de Valleraugue VI qui est localisée au sommet d'une tour de l'observatoire du Mt Aigoual (Figure 26). Dans ce cas naturellement, la prédiction de Bouguer ne prend pas correctement en considération l'effet de la tour ni la dénivelée du point par rapport au sol, ce qui explique l'écart de prédiction élevé à ce point.

Cette base bien que constituant un point géodésique de choix, n'est pas appropriée comme base gravimétrique, de par sa configuration particulière. Ce type de stations particulières devra être signalé à l'utilisateur lorsque ces bases seront diffusées.

Au-delà, la conclusion de ces tests (Figure 25) est que le futur réseau IGN ne présente visiblement pas de distorsion par rapport à la carte gravimétrique que nous publions ici. Le fait que les valeurs du réseau IGN qui ont servi à réaliser ce test soient arrondies à 0,1 mGal n'affecte en rien cette conclusion puisque la comparaison a été réalisée sur l'anomalie de Bouguer, dont le niveau de précision est au mieux de quelques dixièmes de milligals.



**IGN**  
INSTITUT  
GEOGRAPHIQUE  
NATIONAL

Réseau Géodésique Français

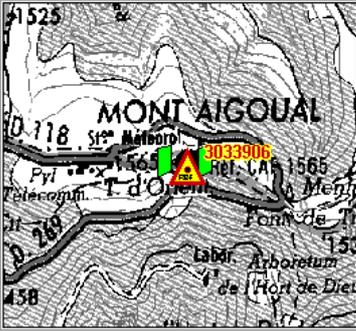
*Service Géodésie Nivellement*  
*Site géodésique*

## VALLERAUGUE VI

<i>Département</i>	GARD (30)	N° Site: <b>3033906</b>
<i>Commune</i>	VALLERAUGUE	
<i>Lieu-dit</i>	MONT-AIGOUAL	site NTF d'ordre 1 - site RBF



Azimut de la prise de vue : 190 gr



Extrait de la carte n° 2640  
MEYRUEIS

*Points du site* : ( Cliquez sur la désignation des points ci-dessous pour obtenir les coordonnées)

( A )	Tour de l'observatoire : Machicoulis : Repere Ouest 1956 en bronze GM
( B )	Tour de l'observatoire : Machicoulis : Repere Sud 1956 en bronze GM
( C )	Tour de l'observatoire : Machicoulis : Repere Nord 1956 en bronze GM
( D )	Tour de l'observatoire : Machicoulis : Repere Est 1956 en bronze GM



Azimut de la prise de vue : 315 gr

Figure 26 : Description de la base Valleraugue VI (d'après fiche géodésique de l'IGN)

### 4.3.3. Conclusions quant à la cohérence des réseaux et de la nouvelle carte

#### En ce qui concerne la compatibilité des réseaux gravimétriques :

Les éléments, présentés ci-dessus, de synthèse des liaisons entre le réseau RGF83 et IGN09 et ceux contenus dans les rapports 2005 à 2008, permettent d'établir qu'aucune distorsion sensible n'existe entre le nouveau réseau IGN et les anciens réseaux, de nature à affecter la banque de données et la carte gravimétrique du territoire publiée ici.

Cependant, la formule de conversion entre les anciens systèmes CGF65, RGF83 et le nouveau réseau IGN ne sera établie avec précision que lorsque le nouveau réseau IGN aura été publié.

De même, la comparaison des réseaux gravimétriques RGF83 et du réseau IGN ne peut pas être finalisée tant que les valeurs de  $g$  du réseau IGN n'auront pas été publiées.

#### En ce qui concerne la compatibilité de la carte gravimétrique avec les réseaux :

La prédiction de l'anomalie de Bouguer, à partir des stations de la carte gravimétrique, aux bases des réseaux CGF65, RGF83 et IGN09 n'a mis en évidence aucune divergence systématique (distorsion), entre la carte et ces réseaux. Dans chaque cas, quelques stations présentent des écarts de prédiction un peu accrus ; à 1<sup>ière</sup> vue ils seraient dus à des effets de relief mal pris en compte par la prédiction. Ceci devra être analysé en détail, point par point, en vue de la diffusion des bases au public.

Vis-à-vis du futur réseau IGN, la prédiction (fiable du fait du positionnement exact des nouvelles bases IGN) semble montrer une adéquation encore meilleure avec la nouvelle carte de Bouguer publiée ici, que pour les réseaux anciens.

En résumé :

- 1- les liaisons de bases entre anciens réseaux et les nouvelles bases de l'IGN n'ont pas montré de distorsion des réseaux les uns par rapport aux autres,
- 2- la prédiction de Bouguer aux bases n'a pas montré de distorsion entre la carte de Bouguer et les réseaux CGF65, RGF83 ou le futur réseau IGN.

Il en découle que les 3 réseaux CGF65, RGF83 et IGN09 sont compatibles avec la carte gravimétrique, et dès lors que le nouveau réseau IGN aura été publié, on pourra :

- 1- établir avec précision la formule de conversion entre anciens systèmes CGF65 / RGF83 et le nouveau réseau IGN,
- 2- mettre à jour les bases CGF65 / RGF83 identifiées comme douteuses, intégrer et diffuser les bases IGN ; chaque base restant valide dans la limite de sa précision (qui sera communiquée).  
De manière corollaire, toute nouvelle étude rattachée à une base, qu'elle soit CGF65/RGF83 non-modifiée ou a une nouvelle base IGN pourra être intégrée

dans la carte gravimétrique nationale. Naturellement le rattachement d'une étude à une base récente et dont le niveau de précision est le meilleur possible est recommandé.

## 5. Bibliographie

- Amalvict M., Debeglia N. et Hinderer J. – (2002) The absolute gravity measurements performed by Sakuma in France, revisited 20 years later., in International Association of Geodesy - 3rd meeting of the International Gravity and Geoid Commission - Gravity and Geoid 2002, ed. I.N. Tziavos.
- Bullard E.C. – (1936) Gravity measurements in East Africa, Philos. Trans. of the Roy. Soc., London, 235, 445-534.
- Coron S. – (1950) Valeur de la pesanteur à Paris déterminée à l'aide des liaisons internationales européennes. Bulletin Géodésique, nouvelle série, n°16, p. 118-139.
- Fullea, J., Fernández, M., et Zeyen, H. – (2008) FA2BOUG - A FORTRAN 90 code to compute Bouguer gravity anomalies from gridded free-air anomalies: Application to the Atlantic-Mediterranean transition zone. Comput. Geosci. 34, p.1665-1681.
- Goguel J. – (1948) Essai d'interprétation de la prospection géophysique de la Bresse et du Bas-Dauphiné. Publication BRGG n°6.
- Goguel J. – (1954) Levé gravimétrique détaillé du Bassin Parisien. Publication BRGGM n° 15.
- Grandjean G., Mennechet C. Debeglia N. et Bonijoly D. – (1998) Insuring the quality of gravity data. Eos, Transactions, American Geophysical Union, vol 79, n°18, May 5, p. 217-221.
- Martelet G. et Debeglia N. – (2001) Homogénéisation et validation des corrections de terrain gravimétriques jusqu'à la distance de 167km, en vue de réactualiser la Banque Gravimétrique Française, rapport BRGM/RP-51287-FR, 41p.
- Martelet G., Debeglia N. et Truffert C. – (2002) Homogénéisation et validation des corrections de terrain gravimétriques jusqu'à la distance de 167km sur l'ensemble de la France, C. R. Geoscience, 334, p. 449-454.
- Martelet G. et Debeglia N. – (2004) Banque gravimétrique de France : travaux réalisés en 2004, tâches à réaliser en 2005. BRGM/RP-53588-FR, 42p., 17 fig., 2 tabl., 3 ann.
- Martelet G. et Debeglia N. – (2005) Banque gravimétrique de France : travaux réalisés en 2005, tâches à réaliser en 2006. BRGM/RP-54331-FR, 61 p., 25 fig., 9 tabl., 8 ann.
- Martelet G. et Debeglia N. – (2006) Banque gravimétrique de France : travaux réalisés en 2006, tâches à réaliser en 2007. BRGM/RP-55009-FR, 107 p., 56 fig., 11 tabl., 11 ann.

Martelet G. et Sarrailh M. – (2006) Gravity data control for the determination of an accurate regional geoid, Ext. Abstr., in 1st symposium of IGFS, 28/08-1/09/2006, Istanbul, Turkey.

Martelet G., Debeglia N. et Dupont F. – (2007) Banque gravimétrique de France : travaux réalisés en 2007, tâches à réaliser en 2008. BRGM/RP-55998-FR, 132 p., 8 fig., 4 tabl., 7 ann.

Martelet G., Pajot G. et Dupont F. - (2008) Banque gravimétrique de France : travaux réalisés en 2008, tâches à réaliser en 2009. BRGM/RP-56958-FR, 99 p., 12 fig., 13 tabl., 6 ann.

Masson F., Verdun J., Bayer R. et Debeglia N. – (1999) Une nouvelle carte gravimétrique des Alpes occidentales et ses conséquences structurales et tectoniques. C.R.A.S. Paris, Sciences de la terre et des Planètes, 329, p. 865-871.

Morelli C. et al. - (1974) IGSN71 the international gravity standardisation Net 1971. Publication spéciale n° 4 de l'AIG.

Ogier M. - (1977) Base gravimétrique fondamentale française Paris- Toulouse – Pic du Midi de Bigorre, liaison 1977. Rapport BRGM n° 77 SGN 431 GPH.

Ogier M. – (1983) Le nouveau réseau gravimétrique français. Bulletin d'information du BGI n° 53.

Ogier M. – (1985) Le réseau gravimétrique français RGF83. Fascicule 15 . Précision Rapports internes du BRGM, 1985 GPH 107.

Ogier M. et Sakuma A. – (1983) Mesures absolues de pesanteur en France. Bulletin d'information du BGI n° 53.

Rapport CNIG « Réseau gravimétrique et géoïde de référence » - (2000) Rapport technique du sous-groupe Gravimétrie, Ed. BRGM.

Truffert C. et Grandjean G. – (1998) CD-ROM Cartes Gravimétriques et Magnétiques de la France, BRGM, 1998.

## Glossaire

### Sigles utilisés dans le rapport :

- ANDRA – Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs
- BGF – Banque Gravimétrique de la France
- BGI – Bureau Gravimétrique International
- BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CFP - Compagnie Française du Pétrole
- CGF65 – Carte Gravimétrique de la France, 1965
- CNEXO - Centre National pour l'Exploitation des Océans
- CNIG – Conseil National de l'Information Géographique
- CT – Corrections de Terrain gravimétriques
- EOST – Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg
- GPS – Global Positioning System
- IFP - Institut Français du Pétrole
- IFREMER – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
- IGN – Institut Géographique National
- IGSN71 – International Gravity Standardization Network, 1971
- LDL - Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère, UMR CNRS 5573, ISTEEM – USTL
- RBF – Réseau de Bases Français (géodésie IGN)
- RGF83 – Réseau Gravimétrique Français, 1983
- SHOM – Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
- USTL – Université des Sciences et Techniques du Languedoc



## **Annexe 1**

# **Amélioration des corrections de terrain depuis 1998**



On rappelle ci-dessous brièvement l'historique des corrections de terrain (CT) de la Banque Gravimétrique de la France (BGF) et on illustre et commente les différences entre les versions successives, avec pour référence la dernière version des CT présentée dans ce rapport (voir § 3.3.3).

On a réalisé pour la première fois en 1999 la reprise des corrections de terrain par un calcul informatisé jusqu'à 167 km, à l'occasion d'une synthèse des données gravimétriques des Alpes réalisée par l'USTL avec la coopération du BRGM (Masson et al., 1999). Avant cela, les corrections de terrain de la Banque Gravimétrique de la France étaient celles des données originellement transmises au BRGM, avec des rayons de correction compris entre 0 et 167 km selon les études. Parfois même, ce paramètre n'était pas connu (Figure 13).

La carte des différences entre les « CT 2009 » et les « CT originelles » (qui étaient celles prises en considération dans la précédente édition de la carte de Bouguer de la France de Grandjean et al. (2008)) est présentée en Figure A-1.1a.

On observe très clairement des écarts très sensibles, notamment dans les zones montagneuses (où les CT sont les plus fortes). L'effet des distances de corrections de terrain variables d'une étude à l'autre dans les CT originelles est également bien visible, délimitant des zones où l'écart de CT se discrimine.

En 2001, hormis la zone des Alpes précédemment recalculée, l'ensemble des corrections de terrain de la BGF avaient été homogénéisées une première fois jusqu'à la distance de 167 km (Martelet et Debeglia, 2001 ; Martelet et al., 2002). Les calculs avaient été réalisés à l'aide de l'algorithme Cortop développé au BRGM. Faute d'une bathymétrie côtière suffisamment précise, les CT des stations gravimétriques d'une bande côtière de 10 km n'avaient pas été calculées.

La carte de différence entre les « CT 2009 » et les « CT 2001 » est présentée en Figure A-1.1b.

Les écarts par rapport aux CT 2009 sont globalement très faibles, sauf pour quelques études et également dans la zone Alpine. Les études où une différence apparaît sont celles pour lesquelles le repositionnement joue de manière sensible sur le recalcul des CT. Pour la zone des Alpes, on rappelle que le recalcul de 2001 n'avait justement pas concerné la zone comprise dans le rectangle tireté (Figure A-1.1b) ; les CT de cette zone avaient directement été réintégrées de l'étude Masson et al., 1999.

Les différences accrues dans cette zone laissent penser qu'un biais existait dans le calcul des CT des Alpes de 1999. Ce biais semble être accentué près de la côte, ce qui pourrait indiquer que l'effet des masses marines situées dans le rayon de calcul de points situés à terre n'avait à l'époque pas été correctement pris en compte.

En 2006, suite au repositionnement d'une partie des stations gravimétriques de la BGF, un second recalcul des corrections de terrain jusqu'à 167 km avait été réalisé Martelet et Debeglia (2006). L'algorithme qui avait été utilisé était celui de Geosoft (version 5.0.8).

La carte de différence entre les « CT 2009 » et les « CT 2006 » est présentée en Figure A-1.1c.

Les écarts par rapport aux CT 2009 sont très faibles, légèrement plus hauts dans les zones de montagne où l'effet du relief influe le plus fortement sur le calcul des CT. Une petite bande N-S s'individualise au centre de la France, due à un artefact lié au découpage de la France en blocs dans les CT 2006.

Dans leur globalité, ces 3 cartes montrent les incréments d'amélioration des corrections de terrain opérés depuis la dernière édition de la carte gravimétrique de la France, en 1998.

Depuis des CT originellement hétérogènes la carte a évolué vers des CT actuellement homogénéisées jusqu'à 167 km pour l'ensemble du jeu de données. Et, au fil des calculs, des différences qui s'amenuisent, traduisant la fiabilité croissante des calculs réalisés.

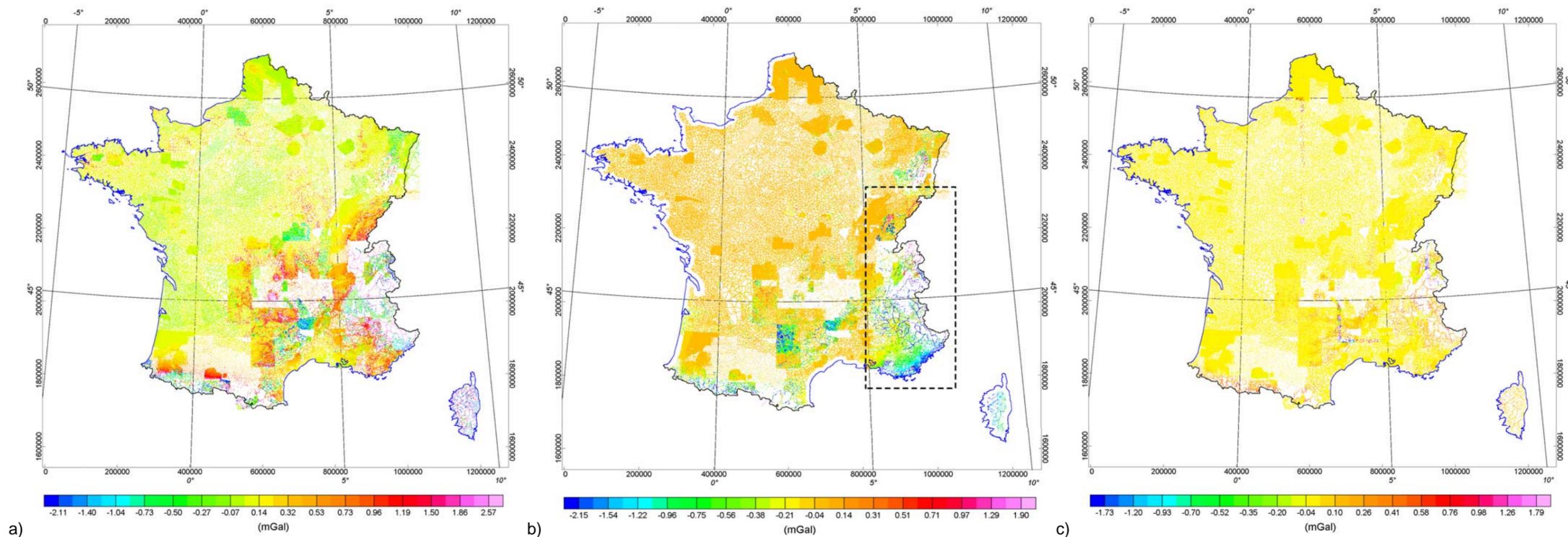


Figure A-1.1. – Cartes de différences de corrections de terrain, en référence à la carte de CT recalculée en 2009 (voir Figure 16). a) Différence avec les « CT originelles », b) différence avec les « CT 2001 », c) différence avec les « CT 2006 ».



## Annexe 2

### Algorithme de prédiction de Bouguer et détection d'erreurs ponctuelles – VALIDG

Un logiciel, VALIDG, a été développé en 2004 afin de permettre l'estimation de  $g$  pour une série de sites de coordonnées et altitude connues. Le principe de cette estimation est le suivant :

- ✓ Extraction à partir de la banque gravimétrique française de toutes les stations de mesure gravimétrique situées à moins de 5 km du site. Si le nombre de stations trouvées est supérieur à 5, on poursuit l'estimation, sinon le rayon de recherche est augmenté à 10 km. Si dans ce nouveau rayon on a trouvé au moins 10 stations, on poursuit l'estimation, sinon, l'estimation est jugée impossible.
- ✓ Corrections de latitude et d'altitude : Les mesures des  $n$  stations trouvées sont ramenées à la latitude et à l'altitude du site.
- ✓ La correction de latitude est donnée par :  $CL = (Y_0 - Y) / 1200$  mGal,  $Y$  et  $Y_0$  étant exprimés en m.
- ✓ et la correction d'altitude par :  $CZ = -(Z_0 - Z) * 0.2$  mGal,  $Z$  et  $Z_0$  étant exprimé en m.
- ✓ Calcul de  $g = g_{RGF83} + CL + CZ$  mGal, pour les  $n$  stations trouvées.
- ✓ Calcul de la moyenne de ces estimations pondérée par la distance au site,  $g_m$ , de l'écart-type  $\sigma$  des  $n$  déterminations de  $g$ , de l'erreur standard  $ers = \sigma / \sqrt{n}$  et de l'intervalle de confiance,  $err = 3 * ers$ .

En 2005, deux modifications principales y ont été apportées :

- Réaliser une prédiction non-plus de  $g$  mais d'une anomalie de Bouguer complète.
- Un test de validation des stations utilisées pour la prédiction a également été ajouté, en éliminant les stations manifestement erronées (présentant un écart à la moyenne supérieur à 2 fois l'écart-type).

La procédure VALIDG de prédiction de Bouguer et détection de données erronées a été testée sur une zone de  $100 \times 100$  km<sup>2</sup>, située dans le sud-ouest de la France, totalisant 6065 stations gravimétriques (Figure A-2.1).

Les données ont été extraites dans le rectangle (en Lambert2 cartographique) :

$X=500000$  à  $600000$

$Y=2000000$  à  $2100000$

Une interpolation de l'anomalie de Bouguer des stations gravimétriques a été réalisée par krigeage à la maille de  $200 \times 200$  m (Figure A-2.2).

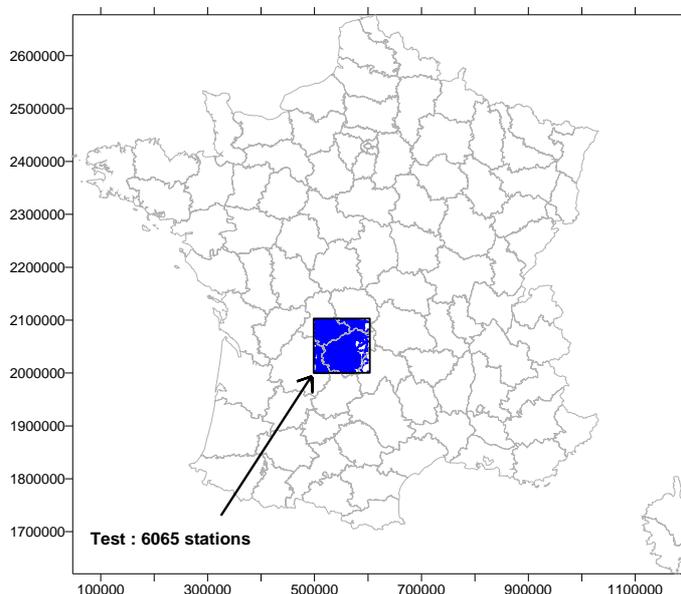


Figure A-2.1. – Localisation de la zone de test de la procédure VALIDG

### A-2.1. Procédure de validation

Le principe de la procédure de validation repose sur la prédiction des valeurs de l'anomalie de Bouguer en chaque point de la banque à partir des valeurs des points proches. Si la valeur du point s'écarte trop de cette prédiction, le point est rejeté.

La liste des points ainsi rejetés est éditée en sortie de la procédure.

Une liste des points pour lesquels une prédiction n'a pu être réalisée (faute d'une couverture de stations proches suffisante) et qui ne sont donc pas validés est également produite.

La procédure de validation (VALIDG, en Fortran 90) comporte les étapes suivantes :

- Lecture des données à valider et des données de validation (données de la BGF). Ces deux fichiers peuvent être identiques. Du fait de l'allocation dynamique de mémoire, il n'y a pas de limite théorique au nombre de stations en entrée. En pratique et en fonction des paramètres de traitement, la mémoire disponible et le temps de calcul admissible limiteront cependant le nombre de points que l'on pourra raisonnablement traiter.

- Choix des paramètres de traitement. Ces paramètres sont décrits ci-après avec les algorithmes correspondants et sont les suivants :

a) pour l'algorithme de prédiction :

*Raymax* : rayon de recherche (m),

*Toldz* : tolérance écart altitude (m),

*Kdata* : nombre maximum de points proches à prendre en compte.

b) pour l'identification des points à rejeter :

*Tol* : tolérance (mGal),

*Ksig* : facteur multiplicatif de l'écart-type

Les étapes suivantes sont ensuite réalisées pour tous les points à valider :

- Première sélection des points proches pour la prédiction et calcul de la moyenne et de l'écart-type des anomalies de Bouguer. Les points doivent être à l'intérieur du rayon de recherche *raymax* et leur altitude ne doit pas différer de plus de *toldz* de l'altitude du point à valider. Les anomalies de Bouguer des points proches qui ne sont pas dans la même densité que le point à valider sont recalculées. La moyenne est pondérée par l'inverse de la distance.
- Elimination de la sélection des points erronés éventuels. Un point est considéré comme erroné s'il s'écarte de la moyenne de plus de la tolérance *tol* définie précédemment **ou** s'il s'écarte de cette moyenne de plus de *ksig* fois l'écart-type. Elimination des points non distincts ou trop proches (doublons qui ne sont pas admis par la procédure de prédiction).
- Tri des points de la sélection par distance au point à valider et sélection des *kadata* points les plus proches utilisés par la procédure de prédiction.
- Réestimation de la moyenne et de l'écart-type sur la sélection finale de points proches.
- Prédiction de l'anomalie de Bouguer au point à valider par une méthode d'estimation de surface par triangulation (module DSURF de la librairie IMSL, méthode « surface fitting »). Si le nombre de points proches est inférieur à 4 cette méthode ne peut être utilisée et le point n'est pas validé.
- Si la valeur de l'anomalie au point à valider s'écarte de la prédiction de plus de la tolérance *tol* est de plus de *ksig* fois l'écart-type le point est édité dans la liste des erreurs. Cependant, si le point est situé en bordure de zone ou si la

répartition des stations autour du point est inadaptée, la prédiction peut être inexacte. Le résultat n'est donc pas pris en considération, le point est considéré comme non validé. Si la prédiction n'a pu être calculée, le point est édité dans la liste des points non validés. Ces points peuvent être ensuite retraités en utilisant des critères de recherche moins restrictifs.

### A-2.2. Application à la zone de test

La procédure de validation appliquée avec  $\text{raymax} = 5000 \text{ m}$ ,  $\text{toldz} = 250 \text{ m}$ ,  $\text{kdata} = 20$ ,  $\text{tol} = 3 \text{ mGal}$ ,  $\text{ksig} = 3$ , détecte 10 points erronés, tandis que 25 points situés en bordure de carte ou dans des secteurs de faible densité ne sont pas validés (**Figure A-2.2**).

Lors de cette première application, la bonne répartition des stations proches et la fiabilité de la prédiction n'était pas testée. C'est seulement à l'issue de cet essai que la nécessité de ce test est apparue et qu'il a été mis au point.

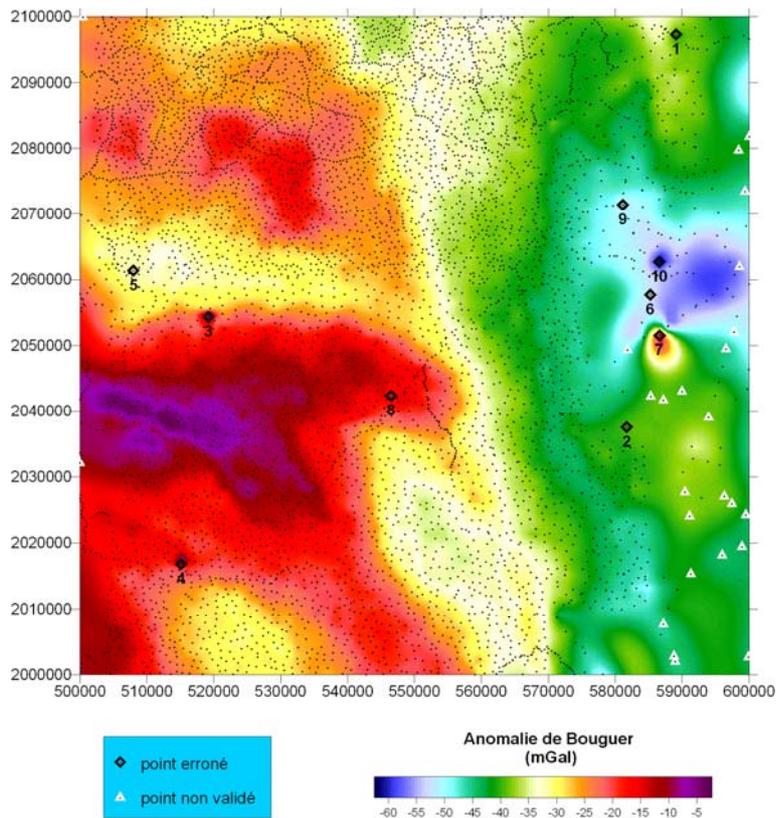


Figure A-2.2. – Résultat de la validation sur la zone test – Paramètres :  $\text{Raymax} = 5000 \text{ m}$ ;  $\text{toldz} = 250 \text{ m}$ ;  $\text{kdata} = 20$ ;  $\text{tol} = 3 \text{ mGal}$ ;  $\text{ksig} = 3$ . Fond coloré : anomalie de Bouguer, interpolée à la maille  $200 \times 200 \text{ m}$ .

Les points erronés 1, 3, 4, 7, 8, 9 et 10 apparaissent de manière plus ou moins évidente sur le contourage en isovaleurs (Figure A-2.2). Ce diagnostic peut être

confirmé par une cartographie plus détaillée (par exemple, pour le point 8, (Figure A-2.3).

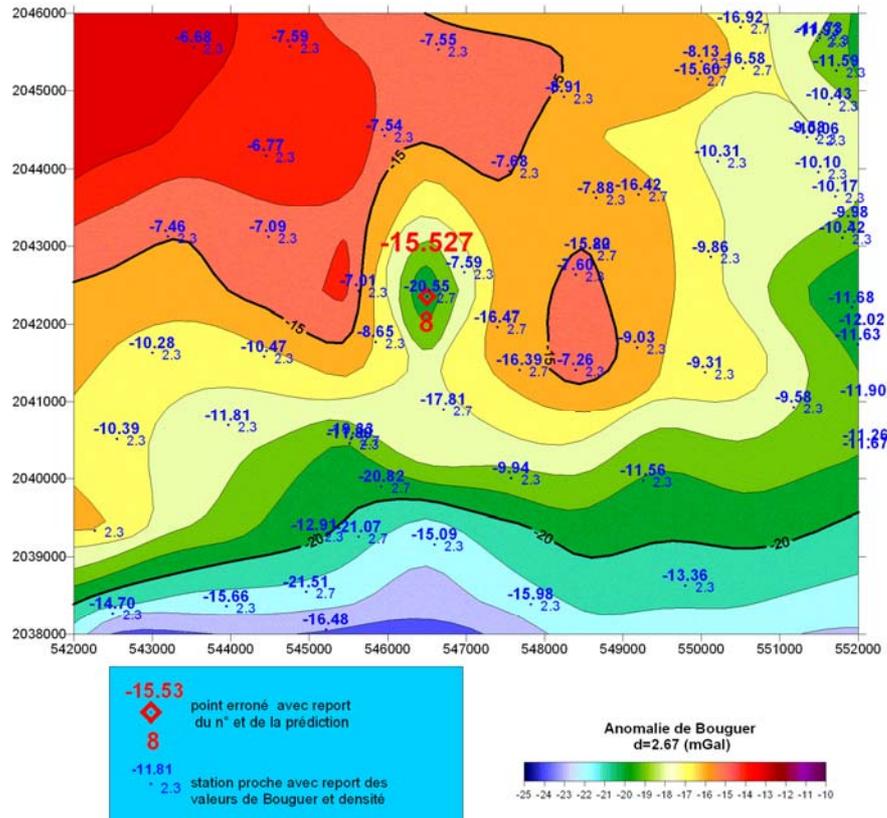


Figure A-2.3. – Cartographie détaillée : point douteux n° 8

Le diagnostic d'erreur est moins clair pour les points 2, 5 et 6. Une cartographie plus fine a donc été également réalisée dans le voisinage de ces points afin de contrôler la procédure de validation.

Au point 5 le diagnostic d'erreur est confirmé par le contourage (Figure A-2.4). En effet, la valeur d'anomalie à -23,47 mGal s'insère mal dans le contexte des stations proches dont les valeurs sont aux alentours de -27 mGal. En revanche la prédiction à -27,101 mGal est satisfaisante et permet de détecter l'erreur.



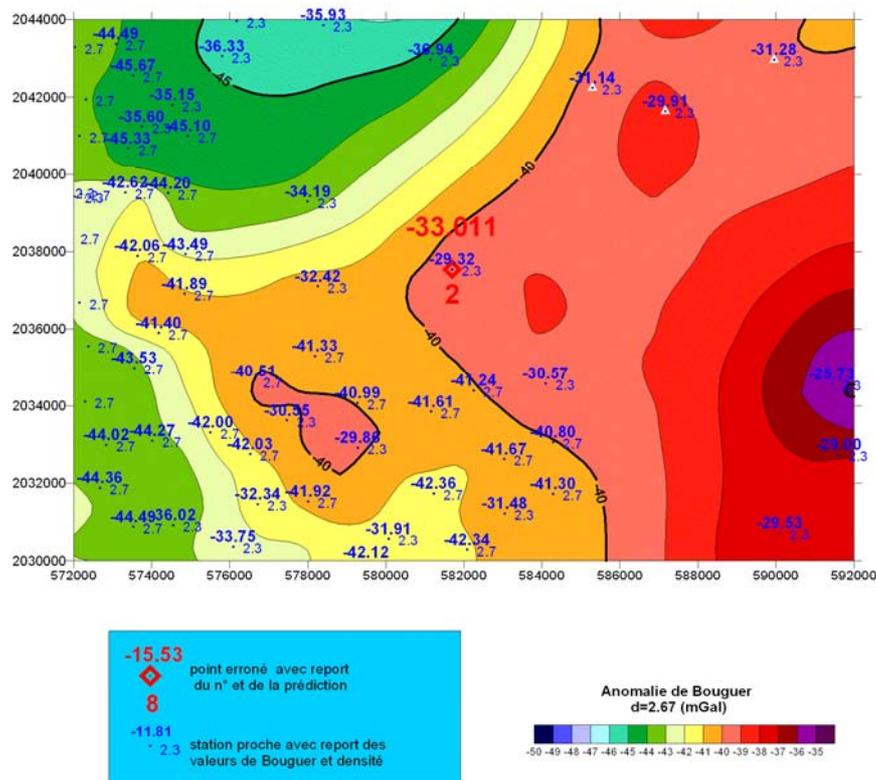


Figure A-2.5 - Cartographie détaillée : point douteux n° 2

Au point 6 (Figure A-2.6) la prédiction est très imprécise du fait de la mauvaise répartition des stations à proximité du point. Le diagnostic d'erreur est donc très incertain.

Cette première application montre qu'il est nécessaire d'effectuer un test qui repère automatiquement les prédictions incertaines afin que le point correspondant puisse être considéré non comme erroné mais comme non validé. On a opté pour une méthode consistant à comparer la prédiction à la moyenne pondérée : si la prédiction s'écarte de la moyenne de plus de 3 fois l'écart-type, on la considère comme douteuse et elle n'est pas retenue. Le point est ensuite considéré comme non validé.

On a ensuite vérifié, en refaisant le traitement précédent, que cette méthode permet bien d'éliminer la station 6 de la liste des points erronés tandis que pour les autres points douteux le diagnostic est inchangé.

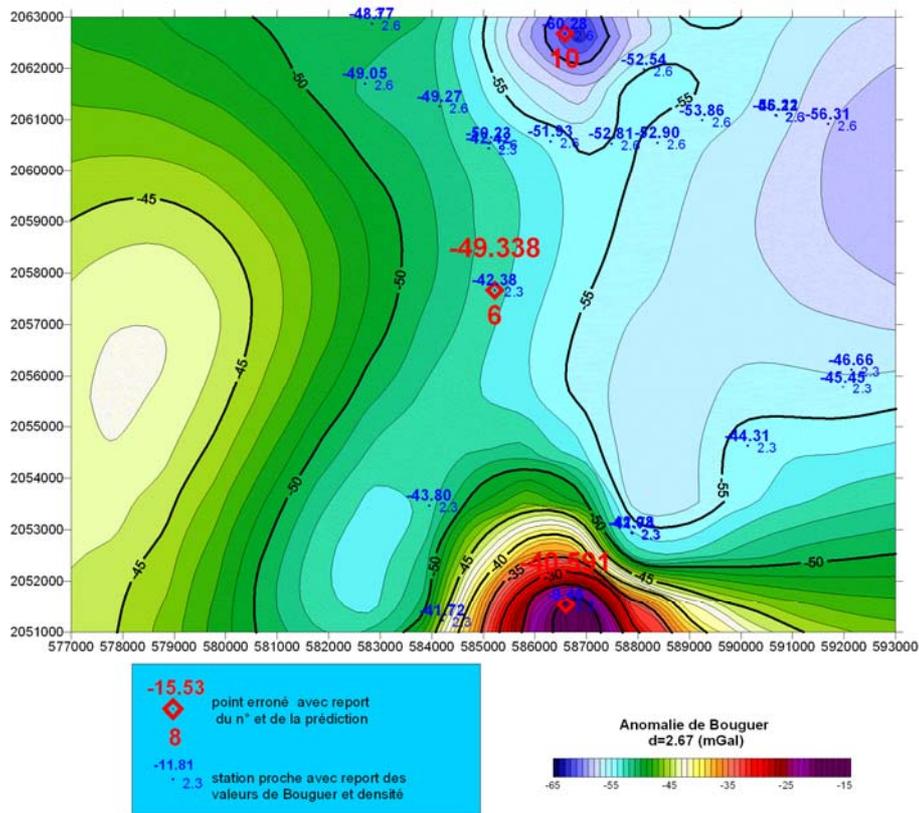


Figure A-2.6 - Cartographie détaillée : point douteux n° 6

La sensibilité de la validation est fonction des paramètres de traitement. Avec des paramètres moins restrictifs, seuls les points faux les plus évidents sont détectés. En augmentant le rayon de recherche et le nombre maximal de points proches à considérer, on minimise le nombre de points non validés. Ainsi avec  $raymax = 10000$  m,  $toldz = 250$  m,  $kdata = 40$ ,  $tol=5$  mGal et  $ksig=3$ , on détecte seulement les points 3, 4, 7 et 10 précédents et un autre point non repéré précédemment (Figure A-2.7). Par ailleurs, le nombre de points non validés n'est que de 4 au lieu de 26.

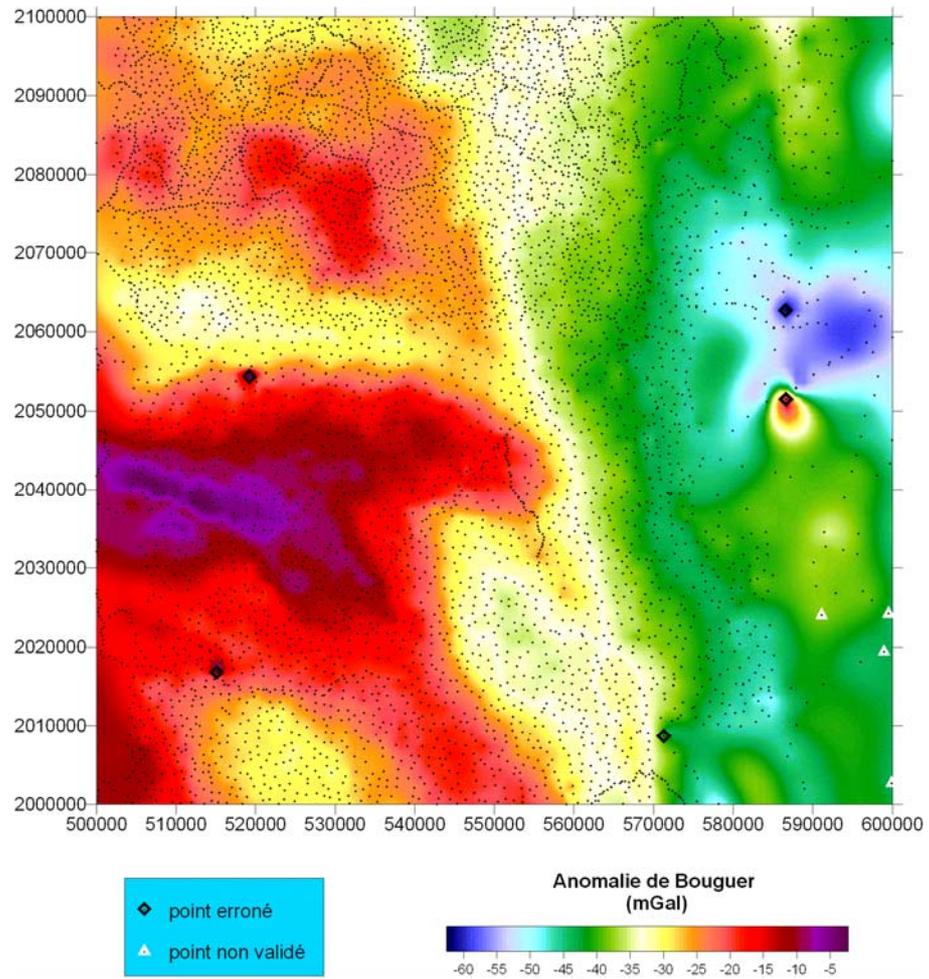


Figure A-2.7 – Nouvelle validation sur la zone test. Paramètres :  $Raymax = 10000\text{ m}$ ;  $toldz = 250$  ;  $kdata = 40$ ;  $tol = 5\text{ mGal}$ ;  $ksig = 3$

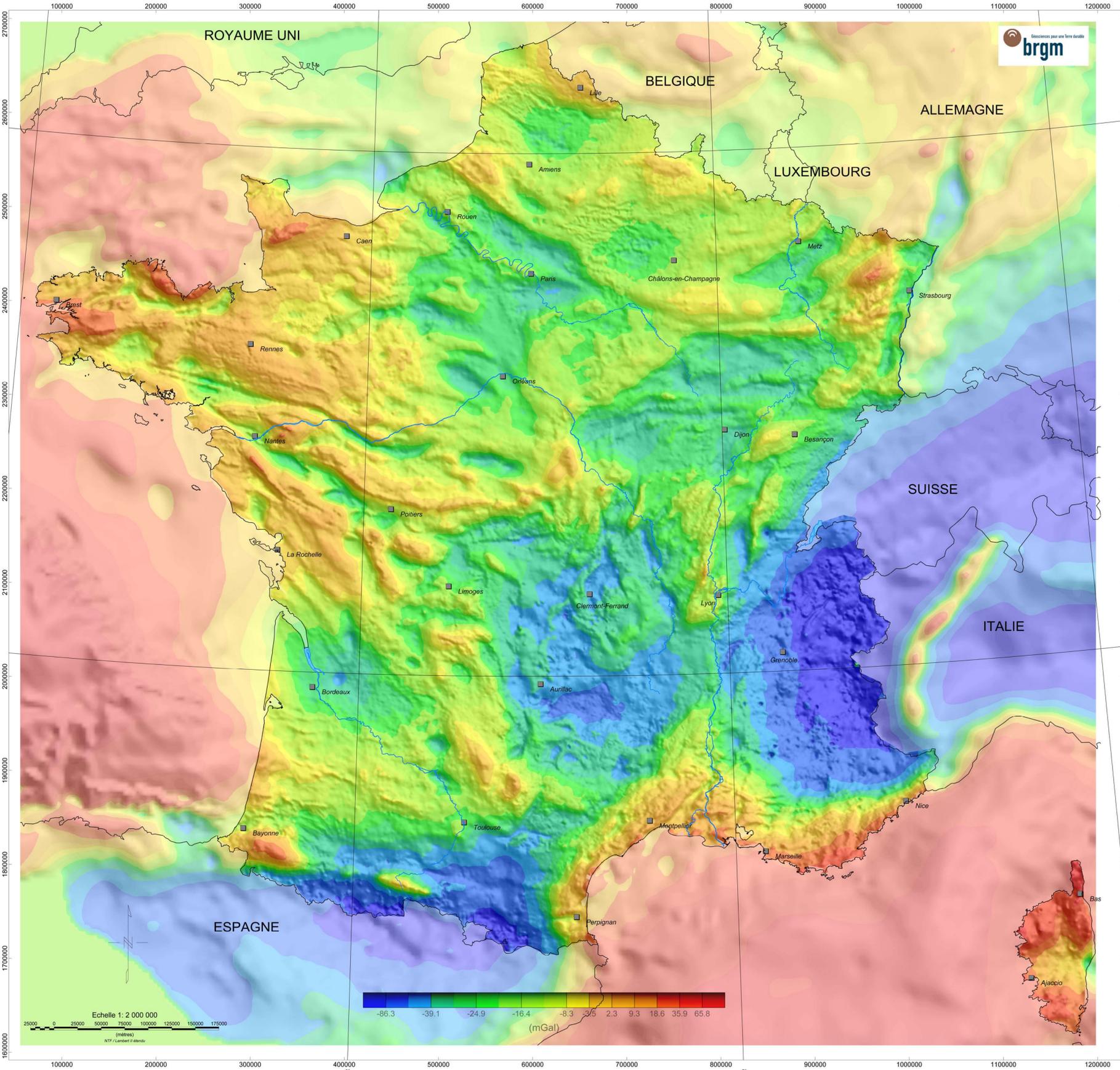






**Centre scientifique et technique  
Service GEO**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34



**brgm**  
Géosciences pour une Terre durable

RESEAU ET CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE 2009  
RCGF09

## ANOMALIE DE BOUGUER

**Réalisation :** BRGM, Service Géologie  
(BRGM, BP 36099, 45060 ORLEANS Cedex 2, France)

**CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CARTE**

**Gravimétrie**  
 Gradient de pesanteur à l'air libre ..... 0,3086 mGal/m  
 Densité de réduction ..... 2,6  
 Correction de courbure terrestre (Bullard B) ..... non  
 Corrections de terrain ..... jusqu'à 167 km  
 0-3 km ..... MNT IGN 50m  
 3-10 km ..... MNT IGN 250m  
 10-167 km ..... MNT IGN 1000m  
 Algorithme ..... Geosoft v-7.1  
 Système gravimétrique de référence ..... CGF65

**Ombrage** ..... Gradient vertical de l'anomalie de Bouguer  
 Inclinaison ..... 45°  
 Azimuth ..... 45°

Source des données marines et hors France identique à la précédente édition (cf. Grandjean et al., 1998)

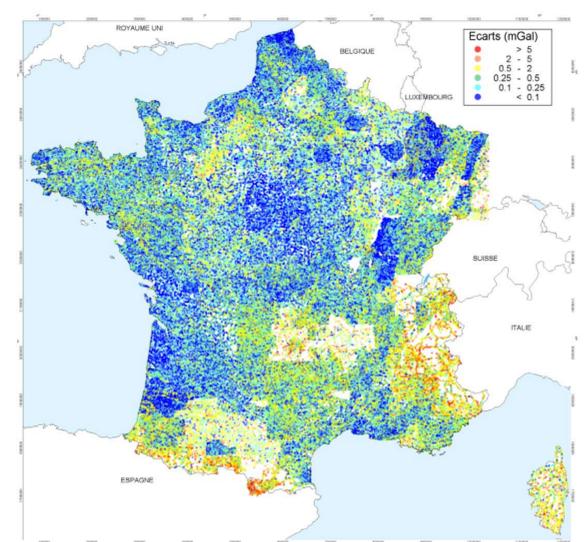
**Géodésie**  
 Système de coordonnées ..... NTF  
 Projection ..... Lambert II étendu  
 Méridien origine ..... Paris (2°20'14,025" E)  
 Latitude origine ..... 46°48'  
 faux est 600 000m - faux nord 2 200 000m  
 Ellipsoïde ..... Clarke 1880  
 demi grand axe 6 378 249m - petit axe 6 356 515m  
 facteur d'échelle 0,999 877 42

**ÉCHELLE :** 1 / 2 000 000      **DATE D'ÉDITION :** Décembre 2009

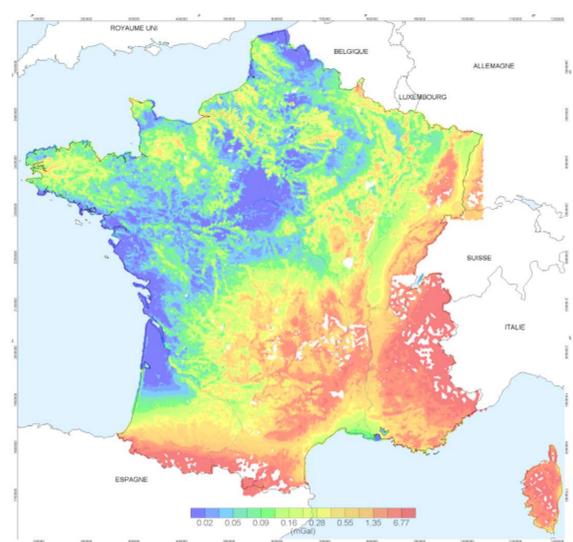
**Planche n°1 : Anomalie de Bouguer**  
Rapport BRGM n° RP-57908-FR

**brgm**  
Géosciences pour une Terre durable

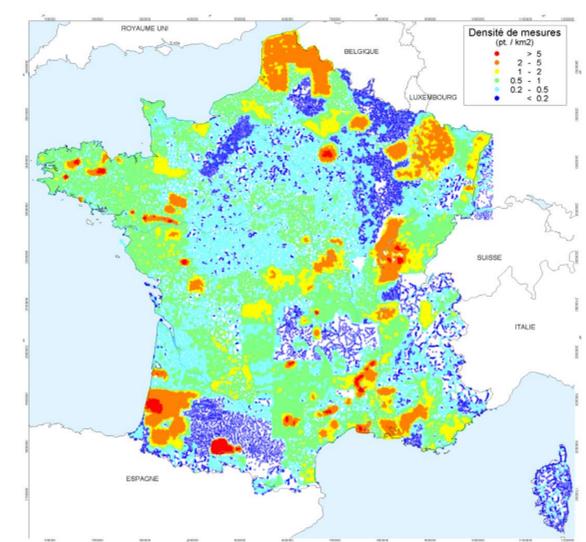
**ANOMALIE DE BOUGUER**  
RESEAU ET CARTE GRAVIMETRIQUE DE LA FRANCE 2009 - RCGF09



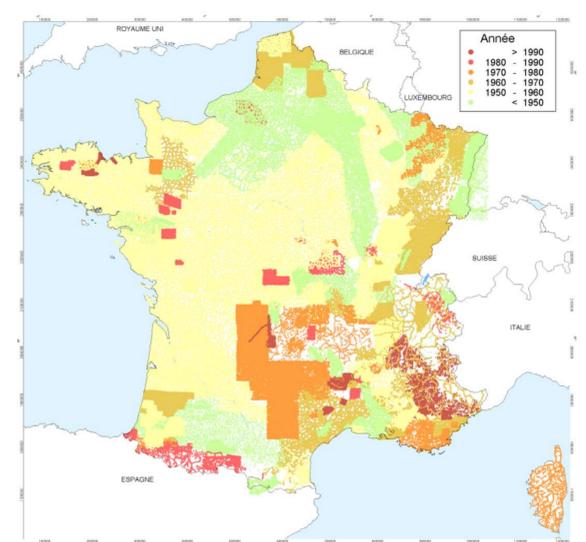
Carte indicatrice de la précision intrinsèque de l'anomalie de Bouguer (obtenue par prédiction aux stations gravimétriques)



Carte des corrections de terrain gravimétriques calculées jusqu'à 167 km de chaque station



Carte de la répartition et de la densité de stations gravimétriques par kilomètre carré



Carte de l'époque de mesure des études qui composent la Banque Gravimétrique de la France