

François L'Écu

Descriptif technique
du quasi-géoïde gravimétrique QGF16
et de la surface de conversion altimétrique
RAF18b

DIFFUSION OUVERTE

DT n° et version 600 82 8671-02

Date de création 16/03/2021

Mots-clé

Gravimétrie ; MNT ; modèle global de champ ; points GNSS nivelés ; hauteur ellipsoïdale ; altitude normale

Résumé

Le document présente les caractéristiques techniques du quasi-géoïde gravimétrique QGF16 et de la surface de conversion altimétrique RAF18b.

Matériel

Système d'exploitation

Windows 10

Logiciel

Microsoft Office Word 2010

Validation

	Fonction	Nom	Visa
Commanditaire	Chef de service	Thierry Person	17/05/2021 – signé
Rédacteur principal	Responsable produits SGM	François L'Écu	17/05/2021 – signé
Lecteur	Expert	Thierry Gattacceca	17/05/2021 – signé
Lecteur	Chef de département	Gilles Canaud	17/05/2021 – signé
Approbateur	Chef de service	Thierry Person	17/05/2021 – signé
Vérificateur	Responsable qualité	Bruno Garayt	17/05/2021 – signé

Diffusion

Organisme / Service	Fonction / Nom	Numérique	Papier
IGN / DOT	Directeur / Philippe Gerbe	oui	-
IGN / DOT	Directeur adjoint / Didier Moisset	oui	-
IGN / DP / SDPU	MO géodésie / Florence Berthier	oui	-
IGN / DP / SDPU	MO géodésie / Matthieu Le Masson	oui	-
IGN / DSTI/ENSG/REMD	Chef du CDoS / Anne Berry	oui	-
IGN / DSTI/ENSG/RECG	Centre de compétences géodésie / Isabelle Panet	oui	-
IGN / DSTI/ENSG/RECG	Chef du centre de compétences / Serge Botton	oui	-
IGN / DOT / SGM	Chef de service / Thierry Person	oui	-
IGN / DOT / SGM	Responsable qualité / Bruno Garayt	oui	-
IGN / DOT / SGM	Responsable documentation / Xavier della Chiesa	non	1
IGN / DOT / SGM / OGP	Responsable produits / François L'Écu	oui	-
IGN / DOT / SGM	Chefs de départements	oui	-
IGN / DOT / SGM/ OGP	Ingénieur d'études / Julien Gazeaux	oui	-
IGN / DOT / SGM/ OGP	Ingénieur d'études / Sylvain Lavoué	oui	-
IGN / DOT / SGM/ OGI	Expert / Thierry Gattacceca	oui	-

SOMMAIRE

1	Introduction	5
2	Processus de calcul de quasi-géoïde utilisé au SGM.....	6
2.1	Les données nécessaires	6
2.2	La méthode du retrait-restauration	6
3	Données utilisées pour le calcul de QGF16	8
3.1	Gravimétrie.....	8
3.1.1	Emprise	8
3.1.2	Origine	8
3.2	MNT	9
3.2.1	Emprise	9
3.2.2	Données à disposition	9
3.3	Modèle de champ	11
4	Le quasi-géoïde gravimétrique QGF16	12
4.1	Spécifications	12
4.1.1	Emprise	12
4.1.2	Pas	12
4.1.3	Format, référence géodésique	12
4.2	Evaluation comparée de QGF16 et QGF98 sur des points GNSS nivelés	13
4.3	Pistes d'amélioration	14
4.3.1	Gravimétrie	14
4.3.2	MNT.....	15
4.3.3	Modèle de champ.....	15
4.3.4	Processus de calcul	15
5	La surface de conversion altimétrique RAF18b	16
5.1	Points d'appui.....	16
5.2	Points de contrôle	17
5.3	Evaluation.....	18
5.4	Codes de précision.....	19
5.5	Evolution de la précision externe entre les modèles RAF09 et RAF18b	20
5.6	Comparaison de RAF18b à RAF09.....	21
5.7	Fichier diffusé.....	22

1 Introduction

Ce document présente les produits géodésiques actualisés permettant l'accès par technique GNSS à la référence verticale de la France métropolitaine, à savoir le quasi-géoïde gravimétrique QGF16 et la surface de conversion altimétrique associée RAF18b. Ce sont les remplaçants de QGF98 et RAF09, respectivement.

Pour chacun d'eux, on trouvera une brève description du processus de calcul, les caractéristiques des données en entrée, l'enchaînement des étapes successives du traitement, puis la présentation des résultats obtenus, avec leur évaluation en termes de précision.

Le document fait également état des perspectives pour l'avenir, en listant les améliorations connues et prévues à plus ou moins brève échéance. Elles touchent à la fois le processus général, les méthodes de calcul, l'évolution des modèles et l'acquisition des données terrain.

2 Processus de calcul de quasi-géoïde utilisé au SGM

2.1 Les données nécessaires

Afin de pouvoir réaliser le calcul d'un quasi-géoïde gravimétrique selon la méthode qui va être exposée dans ce document, il faut disposer :

- de données gravimétriques terrestres et marines.
- de MNT avec bathymétrie.
- d'un modèle global de champ de pesanteur terrestre.

2.2 La méthode du retrait-restauration

L'anomalie de pesanteur à l'air libre Δg_{AAL} , obtenue à partir des mesures de gravimétrie, est la différence entre le champ réel et le champ normal (qui lui est une modélisation mathématique, relativement à un ellipsoïde de référence). Elle se décompose en trois parties selon la relation :

$$\Delta g_{AAL} = \Delta g_M + \Delta g_{RT} + \Delta g_{res}, \text{ avec :}$$

- Δg_M : partie à grande longueur d'onde, créée par les structures géologiques les plus importantes et les grandes lignes du relief. Δg_M est obtenue grâce au modèle global de champ de pesanteur utilisé pour le calcul. Elle tient compte des masses situées au-dessus et en-dessous du quasi-géoïde.

- Δg_{RT} : contient les courtes longueurs d'onde du champ créées par la topographie, c'est-à-dire par les masses situées au-dessus du quasi-géoïde. Pour calculer cette composante, il faut retirer du terrain ses effets à grande longueur d'onde, puisqu'ils sont déjà pris en compte dans Δg_M issue du modèle de champ. On filtre donc le terrain, pour ne conserver que les courtes longueurs d'onde du relief. La partie restante est le **terrain résiduel**. C'est pour calculer cette composante qu'on a besoin de MNT.

- Δg_{res} : anomalie résiduelle, qui contient les courtes longueurs d'onde du champ perturbateur, créées par les masses situées sous le quasi-géoïde.

De la même façon, l'anomalie d'altitude ζ , c'est-à-dire la hauteur du quasi-géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence (grandeur que l'on cherche finalement à déterminer), se décompose elle aussi en :

$$\zeta = \zeta_M + \zeta_{RT} + \zeta_{res} \text{ avec :}$$

- ζ_M : contribution des grandes longueurs d'onde issues du modèle de champ.

- ζ_{RT} : contribution du terrain résiduel.

- ζ_{res} : partie résiduelle de l'anomalie d'altitude.

On commence par déterminer Δg_{res} grâce à :

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{AAL} - \Delta g_M - \Delta g_{RT}$$

C'est le « **retrait** » simultané du modèle de champ et du terrain résiduel.

Puis on calcule ζ_{res} par l'intégrale de Stokes et la connaissance des Δg_{res} . Cette intégrale n'est utilisable que si les masses sont situées sous le quasi-géoïde, ce qui est le cas à ce stade puisqu'on vient d'effectuer le retrait des anomalies de pesanteur à grandes longueurs d'onde et celles à courtes longueurs d'onde dues à la topographie. On calcule ensuite ζ_M et ζ_{RT} .

Enfin, on « re-compose » l'anomalie d'altitude par :

$$\zeta = \zeta_M + \zeta_{RT} + \zeta_{res}$$

C'est l'étape dite de « **restauration** ».

3 Données utilisées pour le calcul de QGF16

3.1 Gravimétrie

3.1.1 Emprise

Pour répondre aux spécifications souhaitées pour le quasi-géoïde en sortie, et dans le cadre d'une **intégration de Stokes à 2 degrés qui sera finalement l'option retenue pour ce calcul**, la gravimétrie doit couvrir la zone d'emprise :

$$39.9^\circ \leq \varphi \leq 53.6^\circ$$

$$-8.81^\circ \leq \lambda \leq 11.81^\circ$$

3.1.2 Origine

Les données gravimétriques terrestres et marines utilisées provenaient de diverses sources :

-la couche dense « historique », constituée par Henri Duquenne pour le calcul de QGF98. Les données sont majoritairement issues du BGI.

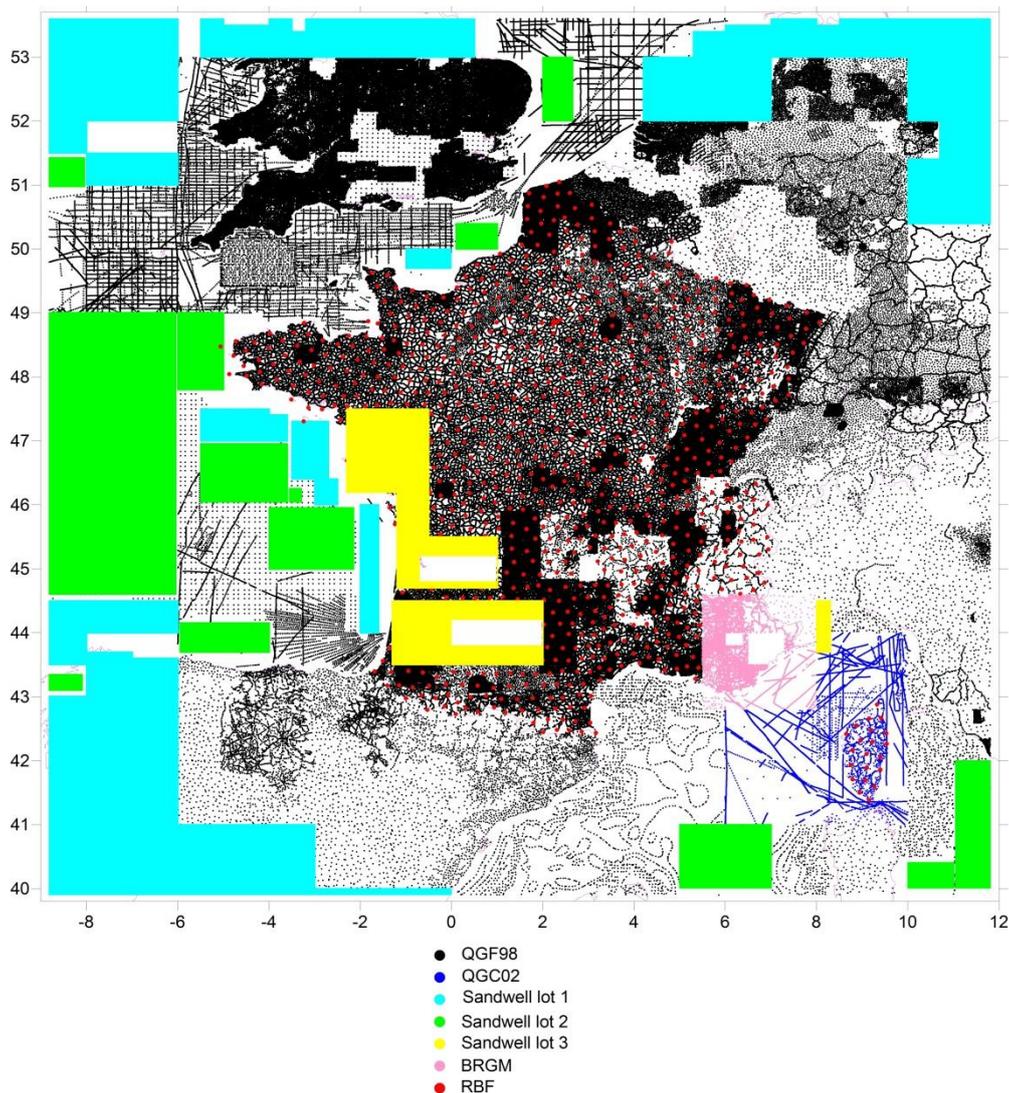
-la gravimétrie collectée par Henri Duquenne pour le calcul du quasi-géoïde de la Corse QGC02, réalisé en 2002. Elle présente l'avantage de contenir des levés aéroportés, réalisés à l'époque par l'ESGT, l'IGN, KMS (Danemark) et l'université de Bergen (Norvège). A l'époque, leur prise en compte avait permis d'améliorer la qualité des données sur la partie Sud-Est de la France, et par conséquent celle du quasi-géoïde sur cette partie du territoire.

-le modèle Sandwell : données introduites à trois reprises au cours des divers essais de calcul, dans des zones différentes et par paquets disjoints, essentiellement pour combler des vides.

-le BRGM, dont les données nativement exprimées dans la référence gravimétrique RGF83 ont été portées dans celle de l'IGN, via une transformation établie par le BRGM se basant sur les mesures en colocalisation sur environ 130 points du RBF.

-le RBF : données issues des campagnes de gravimétrie réalisées par le SGM entre 2000 et 2016 dans le cadre de son activité d'entretien des infrastructures et références géodésiques, et qui s'est vue renforcée en 2013 par un décret lui attribuant la responsabilité de la référence gravimétrique nationale.

La carte ci-dessous présente la répartition zonale des différentes sources de données.



3.2 MNT

3.2.1 Emprise

C'est un rayon d'intégration de Stokes à 2° qui a été utilisé pour le calcul du quasi-géοide. Toutefois, de nombreux essais ont été menés avec un rayon à 3° . Ceci nous a conduits à recueillir des MNTs sur une large emprise, à savoir :

$$37^\circ \leq \varphi \leq 57^\circ$$
$$-13^\circ \leq \lambda \leq 16^\circ$$

3.2.2 Données à disposition

Les différentes sources de données utilisées ont été :

MNT IGN

Il est issu de la BDTopo et de la BDAlti. Il se présente sous forme de dalles de $1^\circ \times 1^\circ$ au format GravSoft. Il est au pas de 1 seconde dans les deux directions, soit environ 30 mètres. Il contient des données bathymétriques.

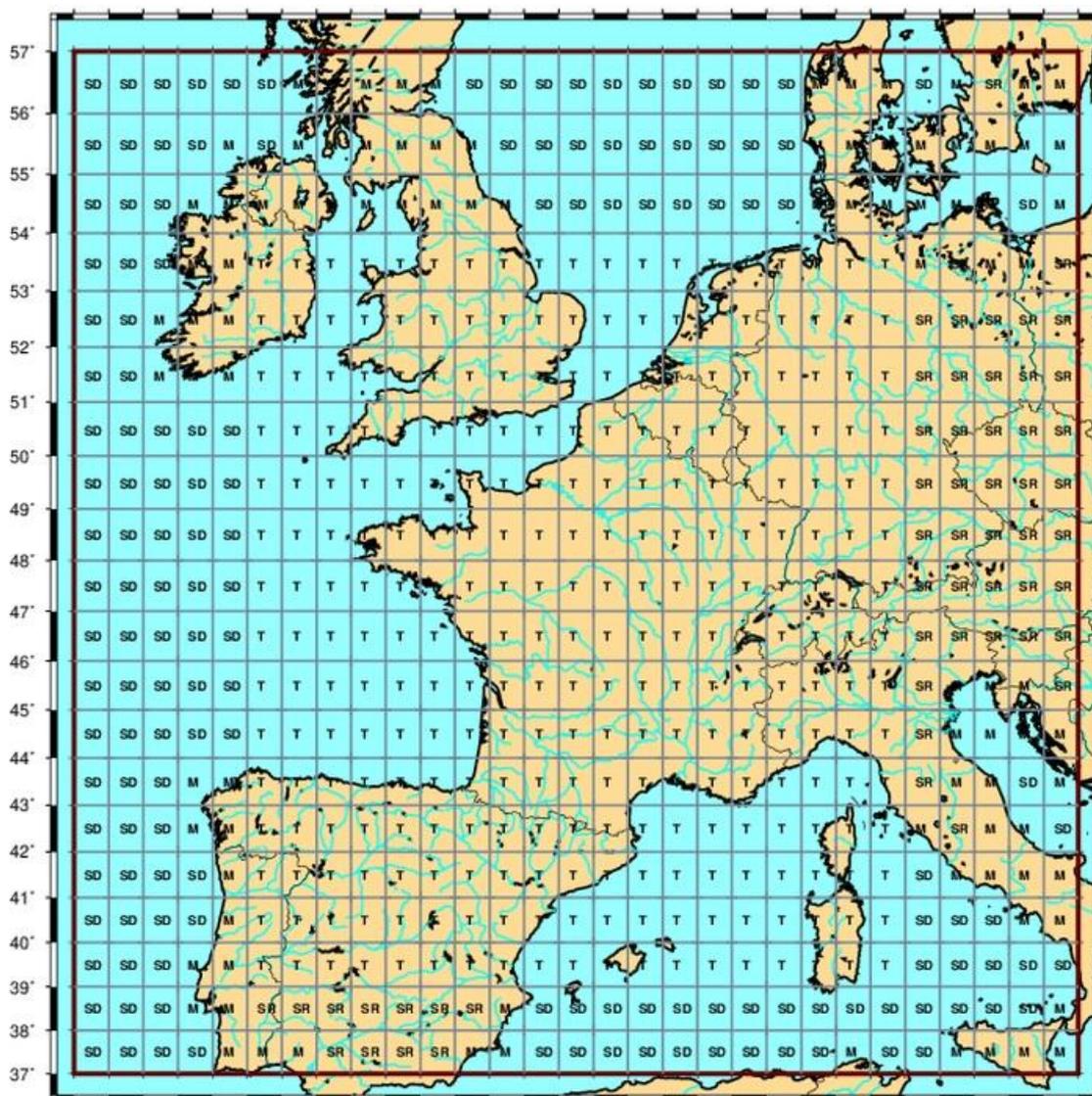
MNT Sandwell and Smith version 19.1

Il est obtenu par altimétrie spatiale, en provenance des satellites Jason, Cryosat et Envisat. Il se présente sous forme de dalles au format CGI ASCII. Il est au pas de 1 minute dans les deux directions, soit environ 1.8 kilomètres. Il contient des données bathymétriques.

MNT SRTM version 4.1

Il provient de la NASA, et obtenu par techniques spatiales. Il se présente sous forme de dalles de 5°x5° au format Arc/Info ASCII. Il est au pas de 3 secondes dans les deux directions, soit environ 90 mètres. Il ne contient pas de données bathymétriques.

A partir de ces divers modèles, nous avons fabriqué un ensemble homogène de 580 dalles toutes au format du MNT IGN : format grille GravSoft, emprise de 1°x1°, au pas de 1 seconde dans les deux dimensions, contenant de la bathymétrie. Nous trouvons sur la carte ci-dessous leur répartition spatiale, avec la légende suivante : T pour BDTopo, SD pour Sandwell, SR pour SRTM, et M pour mixte SRTM-Sandwell.



3.3 Modèle de champ

Nous avons choisi pour ce calcul EGM2008 au degré 720, car c'est celui qui donnait les meilleurs résultats en termes de comparaison aux points GNSS nivelés.

4 Le quasi-géoïde gravimétrique QGF16

4.1 Spécifications

Le millésime « 16 » s'explique par le fait que les données les plus récentes utilisées dans le calcul sont celles issues de la campagne de gravimétrie 2016 du RBF.

Les caractéristiques du quasi-géoïde sont décrites ci-dessous. Elles sont identiques à celles de son prédécesseur QGF98.

4.1.1 Emprise

$$42^{\circ} \leq \varphi \leq 51.5^{\circ}$$
$$-5.5^{\circ} \leq \lambda \leq 8.5^{\circ}$$

4.1.2 Pas

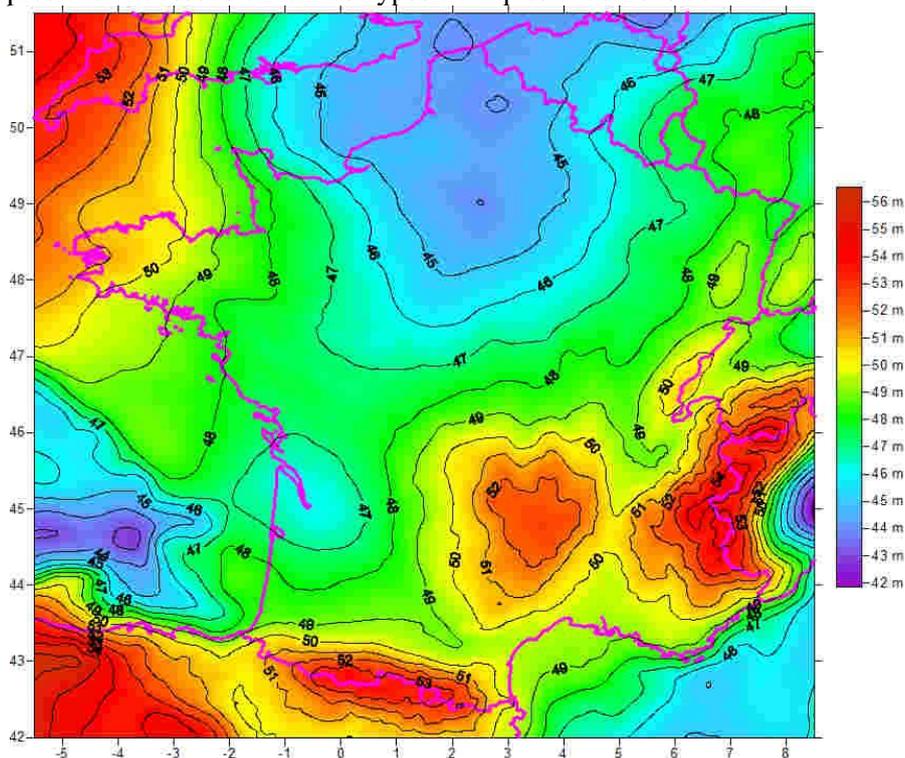
Le pas est de 0.025° en latitude et de 0.033° en longitude.

4.1.3 Format, référence géodésique

Il se présente sous forme d'une grille au format GravSoft, donnant pour chaque nœud :

- latitude en degrés décimaux exprimée dans le repère RGF93.
- longitude en degrés décimaux exprimée dans le repère RGF93.
- hauteur en mètres de la surface d'altitude normale nulle au-dessus de l'ellipsoïde de référence IAG-GRS80 associé au repère de référence RGF93.

Le résultat est représenté ci-dessous en teintes hypsométriques et courbes de niveau.



4.2 Evaluation comparée de QGF16 et QGF98 sur des points GNSS nivelés

Le quasi-géoïde QGF16 est testé sur 7869 points issus des campagnes ERNIT de 2008 à 2016. C'est l'ensemble de points le plus fiable, le plus complet et le plus facilement disponible dont on disposait au moment du calcul du modèle. Ces points sont réputés de bonne qualité, tant en GNSS qu'en nivellement, aussi on les utilise tous, sans démarche de qualification préalable. D'autre part, pour mesurer le gain obtenu entre QGF16 et son prédécesseur QGF98, on fait subir la même évaluation à ce dernier, et on compare les résultats.

Ces évaluations sont basées sur la méthode du retrait de tendance, qui consiste en l'estimation par moindres carrés des trois paramètres a, b, et c tels que :

$$N_i - \zeta_{\langle QGF \rangle i} = a + b(\phi_i - \phi_0) + c(\lambda_i - \lambda_0)\cos(\phi_i) + v_i$$

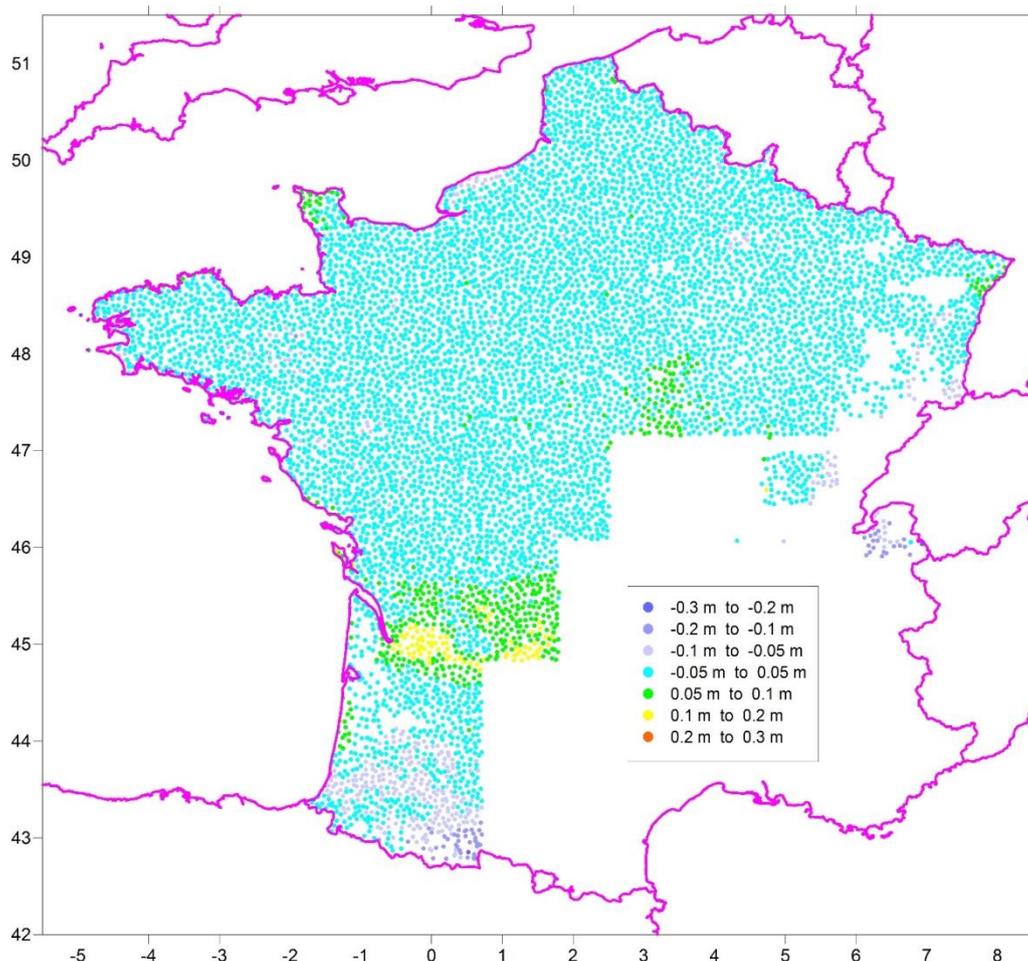
où i est l'indice du point, λ_i et ϕ_i ses coordonnées géographiques, λ_0 et ϕ_0 sont les coordonnées d'un point de référence arbitraire, a est la partie constante de la tendance (exprimée en m), b et c sont les pentes vers le Nord et vers l'Est (exprimées en m/1000km) de la surface de référence d'altitude par rapport au modèle évalué, v_i est le résidu (exprimé en m).

Dans le tableau ci-dessous, on trouve les valeurs des trois paramètres a, b et c ; ainsi que la moyenne et l'écart-type des résidus, et leur valeur minimale et maximale. On indique également ces quatre dernières valeurs pour les écarts bruts.

		QGF16	QGF98
Retrait de tendance	a	-0.287	-0.831 10 ⁻¹
	b	-0.530 10 ⁻¹	-0.579 10 ⁻¹
	c	0.330 10 ⁻¹	0.911 10 ⁻¹
	μ	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵
	σ	0.036	0.075
	m	-0.241	-0.353
	M	0.183	0.298
Ecart bruts	μ	0.287	-0.085
	σ	0.101	0.178
	m	-0.559	-0.529
	M	0.184	0.377

En conclusion de cette première évaluation rapide, c'est-à-dire sans prendre la précaution d'étudier les points pour éventuellement retirer ceux qui seraient à problème ou douteux, on constate que QGF16 est bien meilleur que QGF98. On le voit en se référant aux indicateurs les plus parlants : l'écart-type des résidus de retrait de tendance est de 3.6 cm au lieu de 7.5 cm, et les valeurs minimales et maximales sont améliorées d'environ 10 cm.

La carte ci-dessous donne la représentation graphique des résidus de retrait de tendance dans le cas de QGF16.



Ces premiers résultats seront à consolider lorsque le territoire sera complètement couvert par les campagnes ERNIT, donc probablement vers 2021-2022. Mais ils donnent déjà une bonne idée du gain obtenu entre les deux dernières versions successives du QGF.

4.3 Pistes d'amélioration

Il reste beaucoup à faire pour améliorer le quasi-géoïde français dans les prochaines années. De nombreuses pistes sont d'ores et déjà explorées. Elles concernent les points décrits ci-dessous.

4.3.1 Gravimétrie

4.3.1.1 Mise en référence de la couche dense

Le SGM utilise actuellement une couche dense « historique », composée de plus d'un million de points pour sa partie terrestre, issus de diverses sources de données (BGI, universités, BRGM, ...), dont la qualité est hétérogène et souvent inconnue. De plus, ces données sont exprimées dans une voire plusieurs références gravimétriques inconnues dans la plupart des cas. L'absence de métadonnées rend difficile une qualification correcte de cet ensemble de points.

Par ailleurs, il existe une couche de référence nationale basée sur le réseau RBF. Elle est peu dense, car construite sur un peu plus de mille points seulement. En revanche, le SGM connaît parfaitement sa qualité, puisque c'est lui qui l'a produite. Et il connaît également sa référence : c'est celle qui provient directement de ses instruments de mesures absolues (A10), ainsi que de mesures absolues réalisées avec des instruments de type FG5 par d'autres organismes.

L'enjeu va donc être de mettre en référence la couche dense dans la référence de la couche RBF. A l'heure actuelle, un test de densification de la gravimétrie du RBF a déjà été réalisé en Bretagne. A partir de ce nouvel ensemble enrichi, on commence par déterminer une grille d'anomalie de Bouguer. Ensuite, on interpole cette grandeur sur les points de la couche dense. Nous connaissons donc pour ceux-ci leur anomalie de Bouguer initiale, et celle qu'on vient d'interpoler à partir du RBF. On peut donc modéliser l'écart entre ces deux grandeurs par une régression linéaire. Et l'appliquer finalement à la couche dense pour la « corriger » et ainsi l'exprimer dans la référence RBF.

Ce processus complexe est en cours de développement. Il reste perfectible.

4.3.1.2 Intégration de nouvelles données dans la couche dense

A l'avenir, nous pourrions être amenés à enrichir la couche dense par de nouvelles données, notamment sur les pays étrangers, ou en mer. Le SGM a développé un outil qui réalise cette intégration en veillant à supprimer les doublons entre les données ajoutées et l'existant. Les doublons sont définis par des seuils de distance géographique (distance entre les points) et gravimétrique (détection des différences d'arrondi d'une source de données à l'autre). L'outil détecte également les valeurs aberrantes, et le cas échéant les supprime du fichier à intégrer. Là encore, de nombreuses améliorations sont possibles.

4.3.2 MNT

Les MNTs en provenance du RGE-Alti doivent être étudiés et évalués, en particulier ceux produits par la technique du Lidar. On peut également mentionner le MNT GLO-30 de l'ESA qui couvre l'ensemble de l'Europe, qui est réputé de meilleure qualité que le SRTM, et qui devrait être disponible prochainement.

Pour tester correctement ces modèles, il va falloir disposer d'un ensemble de points GNSS nivelés d'excellente qualité, et bien réparti géographiquement sur l'ensemble de nos territoires nationaux.

4.3.3 Modèle de champ

Outre les séries des EGM et EIGEN dont nous avons connaissance actuellement, avec leurs multiples versions actuelles et à venir, il existe d'autres modèles sur lesquels il faut investiguer. Leur prise en compte va certainement nécessiter une adaptation des outils GravSoft utilisés jusqu'alors, et qui commencent à prendre de l'âge. Il va falloir également bien appréhender le problème théorique complexe des marées océaniques. Là encore, pour bien tester l'ensemble de ces modèles, des points GNSS nivelés fiables et couvrant de façon homogène l'ensemble du territoire seront indispensables.

4.3.4 Processus de calcul

Depuis plus de vingt ans, la chaîne de production utilisée au SGM est basée sur la méthode dite « retrait-restauration du terrain résiduel ». Par manque de temps, les autres méthodes n'ont jamais été explorées. Il va donc falloir démarrer des investigations qui porteront sur les traitements mathématiques (gravimétrie, filtrage, interpolation), la théorie de la propagation de la précision depuis les données initiales jusqu'au produit en sortie, ainsi qu'un examen des autres méthodes mises en œuvre par des organismes tels que le nôtre (notamment celles développées par I. Panet de l'équipe IGN géodésie de l'IPGP), ou par des privés.

Il faudra également tenir compte des progrès des technologies informatiques, car cette chaîne mise en place au siècle dernier montre des limites dans ses capacités de calcul. Il faudra se pencher sur une prise en compte améliorée d'importants volumes de données, ainsi que sur la parallélisation pour permettre des gains évidents en matière de temps de calcul.

5 La surface de conversion altimétrique RAF18b

Après la publication de l'ITRF2014 et du repère de référence de l'IGS, l'IGS14, le SGM a retraité les données GNSS des stations du RGP et des stations IGS de référence de 1998 à 2018, cumulé les solutions hebdomadaires et journalières obtenues et aligné la solution retenue sur l'IGS14.

Ceci a conduit à la publication d'un nouveau jeu de coordonnées dans le repère de référence géométrique RGF93 pour les stations du RGP, nommé RGF93V2b, qui est aligné sur l'ETRF2000 époque 2019.0. Celui-ci remplace à partir du 5 janvier 2021 la solution de référence qui était en vigueur depuis juin 2010, à savoir le RGF93v2, qui elle était directement compatible avec l'ETRF2000 époque 2009.0.

La surface de conversion altimétrique RAF18b, associée à la version RGF93V2b, permet le passage des hauteurs ellipsoïdales dans ce repère à des altitudes NGF-IGN69. Elle est obtenue par adaptation du quasi-géoïde QGF16 à un ensemble de points d'appui GNSS nivelés.

L'adaptation se fait en utilisant le logiciel Surfer. Son principe consiste à déterminer, aux points d'appui, l'écart entre l'ondulation observée N_{obs} et l'anomalie d'altitude ζ issue du quasi-géoïde, puis d'en faire une grille, et s'en servir pour interpoler par krigeage cet écart aux nœuds de la future grille de conversion altimétrique RAF. En ces mêmes nœuds, on détermine par ailleurs la valeur de ζ issue du quasi-géoïde. Enfin, on la corrige de l'écart interpolé, pour la rendre conforme à l'observation, ramenée à la référence altimétrique.

5.1 Points d'appui

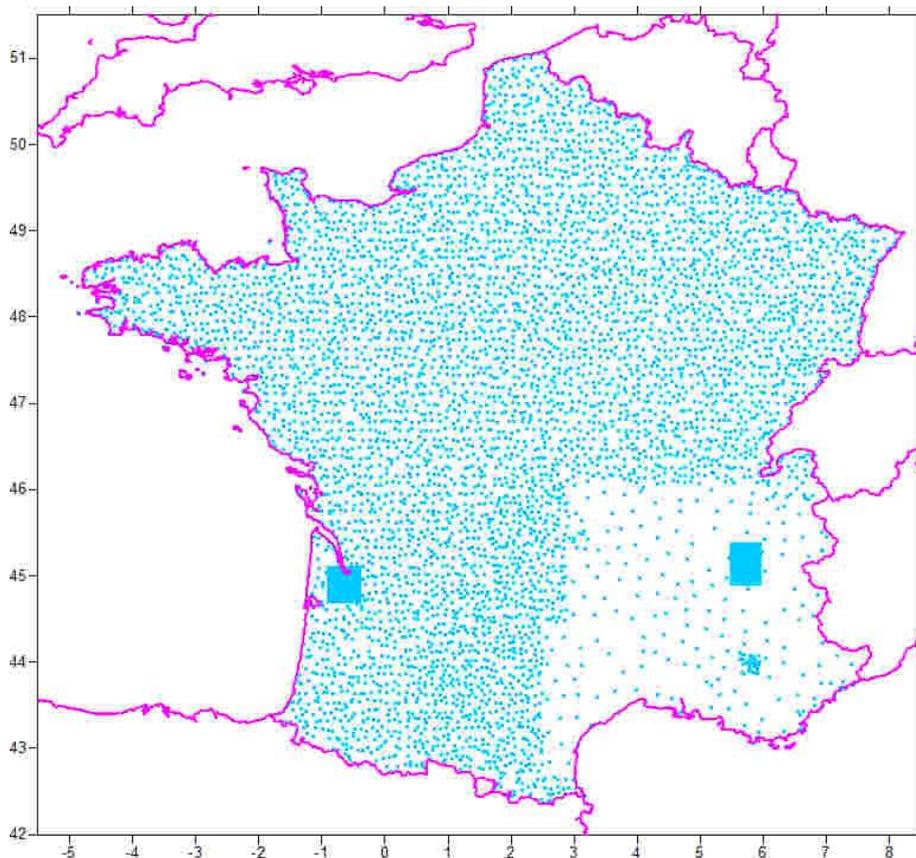
On a sélectionné 10 658 points d'appui. Ils ont été choisis en fonction de la qualité de leur détermination géométrique par mesures GNSS et altimétrique par nivellement, mais aussi d'après une analyse spatiale ayant permis d'obtenir une bonne répartition géographique de l'ensemble.

On note que les dernières données ayant servi au calcul ont été collectées sur le terrain en 2018, d'où le millésime « 18 » adopté pour la surface résultante.

La répartition des points selon leur provenance est la suivante :

- 114 pivots issus du processus NIVAG (NIVellement avec Assistance GNSS), premier processus d'entretien du réseau de nivellement faisant intervenir les techniques spatiales, mené par l'IGN de 2003 à 2007.
- 4837 points issus du processus ERNIT (Entretien du Réseau de Nivellement par les Triplets), seconde étape du processus d'entretien du réseau de nivellement par méthode GNSS, mené par l'IGN de 2008 à 2018.
- 645 points du réseau RBF.
- 2 points IGN du polygone d'essai de l'Est parisien.
- 8 points observés par l'unité des Travaux Spéciaux au cours de ses diverses missions.
- 18 stations RGP nivelées.
- 50 points collectés par les élèves du groupe d'instruction de l'ENSG.
- 9 points recueillis par le Grand Port Maritime du Havre.
- 6 points observés par l'OGE dans le cadre de son opération sur les marégraphes en 2019.
- 19 points d'appui de calcul du modèle RAF09.
- 7 points situés sur les îles entourant la France.
- 12 points issus des campagnes SONEL de 2013 à 2016.
- 6 points SHOM.
- 1001 points ayant servi à faire la grille de conversion altimétrique pour la ville de Bordeaux.
- 3923 points d'appui ayant servi à faire la grille de conversion altimétrique pour la ville de Grenoble.
- 1 point observé au Pic du Midi d'Ossau.

En voici la carte :



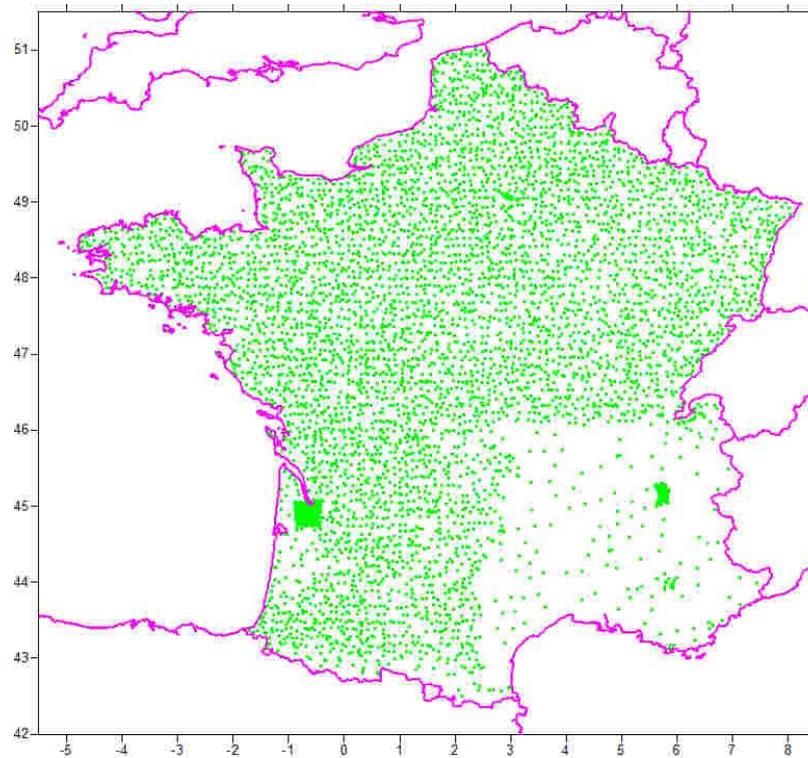
5.2 Points de contrôle

On a sélectionné 5 728 points de contrôle, d'après les mêmes critères que les points d'appui, à savoir la qualité de leur détermination géométrique par mesures GNSS et altimétrique par nivellement, et le fait d'obtenir une bonne répartition géographique de l'ensemble.

La répartition des points selon leur provenance est la suivante :

- 175 pivots issus du processus NIVAG.
- 4770 points issus du processus ERNIT.
- 243 points du réseau RBF.
- 32 points IGN du polygone d'essai de l'Est parisien.
- 8 points observés par l'unité des Travaux Spéciaux au cours de ses diverses missions.
- 15 points collectés par les élèves groupe d'instruction de l'ENSG.
- 4 points recueillis par le Grand Port Maritime du Havre.
- 10 points d'appui de RAF09.
- 4 points situés sur les îles entourant la France.
- 1 point issu des campagnes SONEL de 2013 à 2016.
- 3 points SHOM.
- 365 points ayant servi à faire la grille de conversion altimétrique pour la ville de Bordeaux.
- 98 points d'appui ayant servi à faire la grille de conversion altimétrique pour la ville de Grenoble.

En voici la carte :



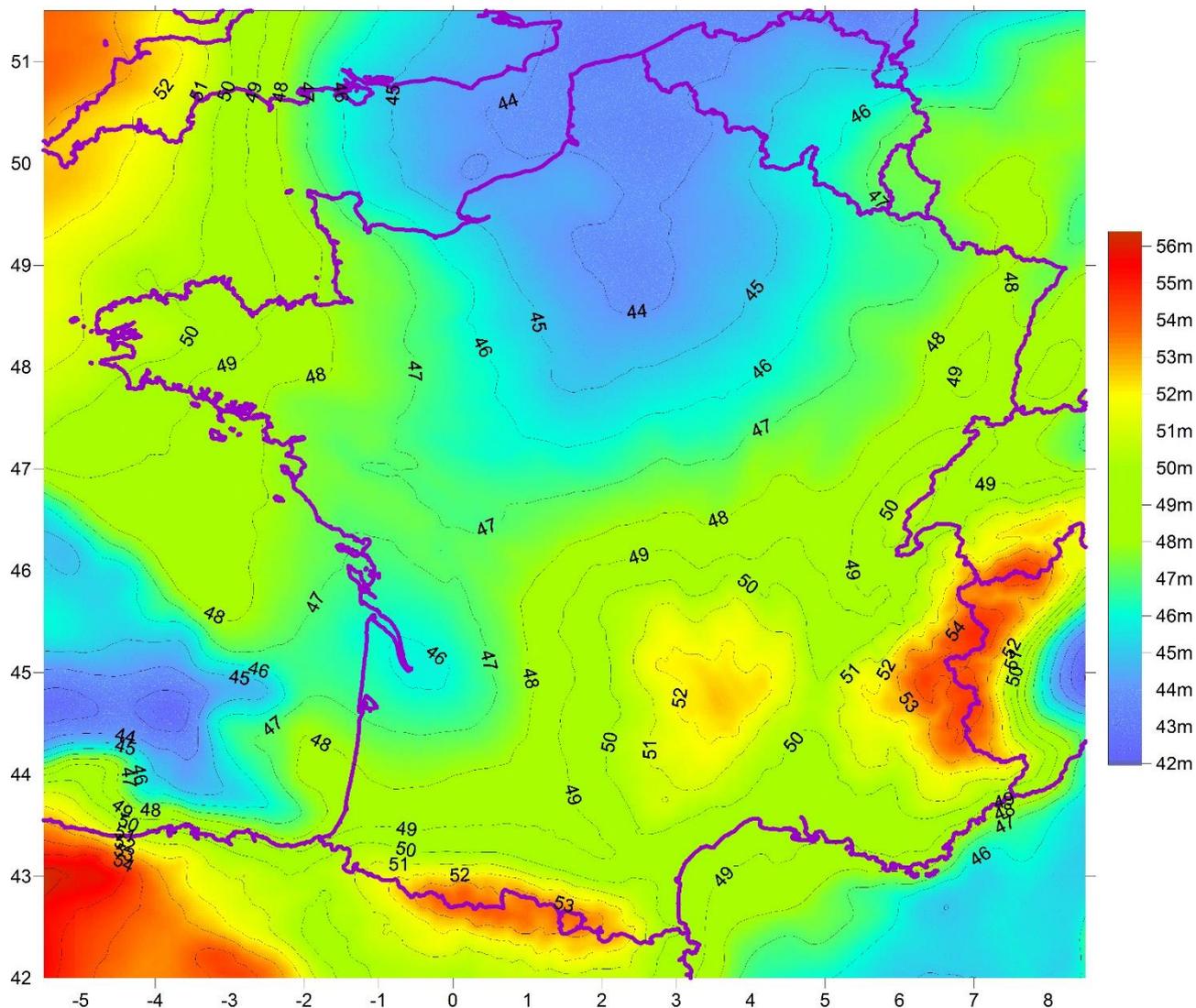
5.3 Evaluation

Les résultats des tests interne (sur les points d'appui) et externe (sur les points de contrôle), portant sur les valeurs de l'écart (en mètres) entre la grille et l'observation, sont les suivants :

	Test interne	Test externe
Nombre de points	10 658	5 728
Moyenne	$2.930 \cdot 10^{-5}$ m	0.001 m
Ecart-type	0.003 m	0.011 m
Valeur minimale	-0.019 m	-0.029 m
Valeur maximale	0.022 m	0.029 m

Ces valeurs permettent de dire que la précision de la grille RAF18b, déterminée grâce à la valeur de l'écart-type sur les points de contrôle est de 1 cm à 1 sigma.

La carte ci-dessous donne une représentation graphique de RAF18b en teintes hypsométriques et courbes de niveau.



5.4 Codes de précision

Jusqu'alors, pour toutes les grilles précédant RAF18b produites au SGM, on avait affecté à chaque nœud un code de précision par simple attribution zonale, en fonction de la connaissance a priori que l'on pouvait avoir de la précision des points d'appui et de contrôle dans telle ou telle partie du territoire couvert par le modèle. Pour améliorer cette façon de faire qui ne met pas en valeur de manière fine les progrès accomplis, on a développé cette fois une méthode d'interpolation de la précision en chaque nœud de la grille, qui s'appuie sur les écarts réels entre le modèle et l'observation. Pour ce faire, on a à nouveau utilisé l'outil de krigeage disponible sous Surfer.

L'écart brut entre N_{RAF18b} et N_{obs} aux points de contrôle est interpolé aux nœuds de RAF18b. Puis on fait la correspondance entre cette « précision externe » (notée p_{ext}) et le code de précision de Circé 5.2 (noté $p_{ext_Circé}$) de la façon suivante :

$$\text{-si } 0 \leq p_{ext} \leq 0.02 \text{ m, alors } p_{ext_Circé} = 7.$$

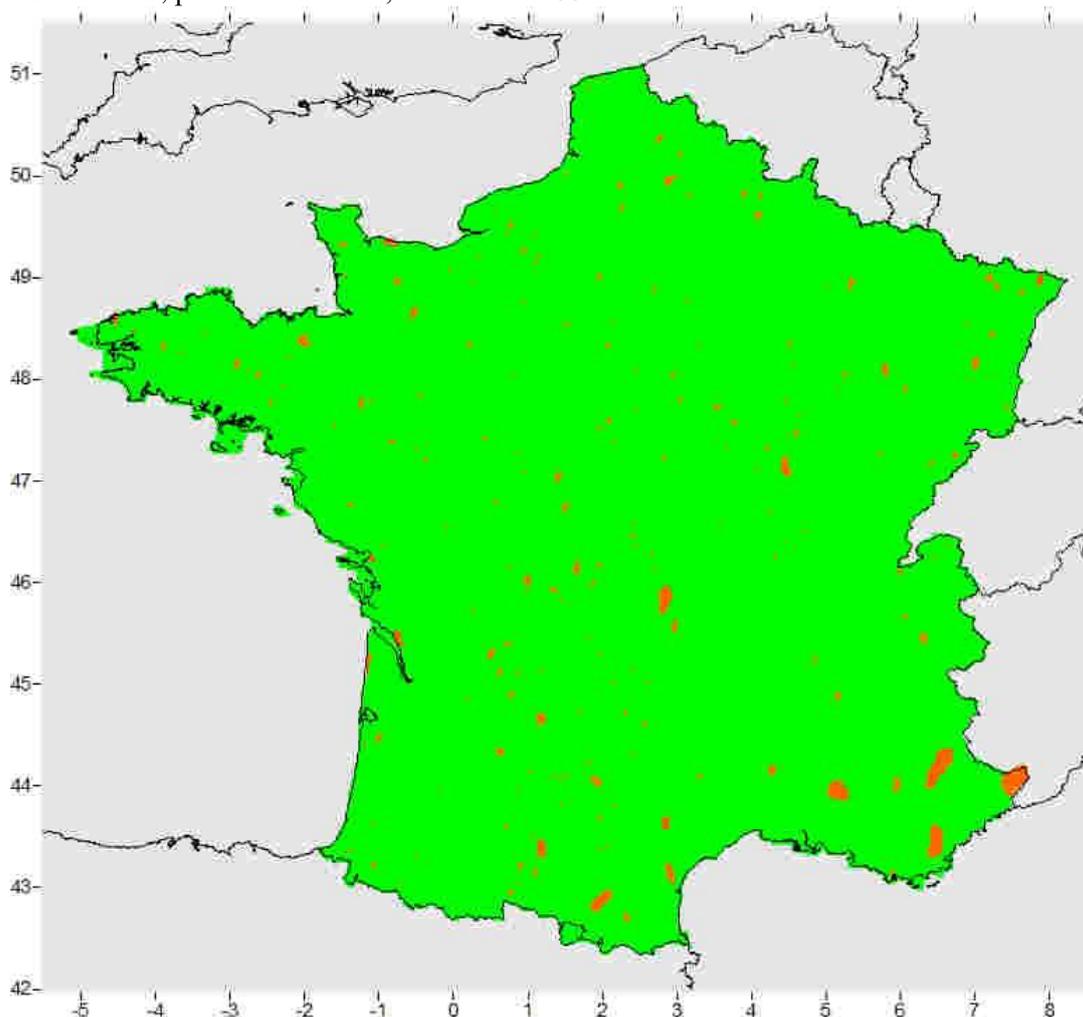
- si $0.02 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 0.05 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 1$.
- si $0.05 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 0.1 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 2$.
- si $0.1 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 0.2 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 3$.
- si $0.2 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 0.5 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 4$.
- si $0.5 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 1 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 10$.
- si $1 \text{ m} < p_{\text{ext}} \leq 2 \text{ m}$, alors $p_{\text{ext_Circé}} = 5$.

La carte ci-dessous illustre la répartition zonale de ces codes Circé.

En vert : précision meilleure que 0.02 m, code Circé = 7.

En orange : précision comprise entre 0.02 et 0.05 m, code Circé = 1.

En gris : zone marine, pas d'information, code Circé = 99.



5.5 Evolution de la précision externe entre les modèles RAF09 et RAF18b

Dans cette partie, nous déterminons, pour les points de contrôle exprimés dans la référence géométrique RGF93V2, leurs écarts bruts à la grille RAF09. Nous calculons ensuite, pour ces mêmes points exprimés dans la référence géométrique RGF93V2b, leurs écarts bruts à la grille RAF18b.

Les résultats statistiques sont donnés dans le tableau ci-dessous, où « e » désigne la valeur absolue de l'écart entre l'observation et les modèles testés.

	Ecart brut à RAF09	Ecart brut à RAF18b
Moyenne	-0.003m	0.001 m
Ecart-type	0.020 m	0.011 m
Valeur minimale	-0.109 m	-0.029 m
Valeur maximale	0.181 m	0.029 m
Points avec : $0 \leq e \leq 1$ cm	2892, soit 50.49%	3892, soit 67.95%
Points avec : $1 \text{ cm} < e \leq 2$ cm	1522, soit 26.57%	1472, soit 25.7%
Points avec : $2 \text{ cm} < e \leq 3$ cm	789, soit 13.77%	364, soit 6.35%
Points avec : $e > 3$ cm	525, soit 9.17%	0, soit 0%

A la lecture de ces résultats, on constate :

- un gain d'environ 1 cm sur l'écart-type, donc sur la précision à 1 sigma.
- une nette diminution des valeurs minimale et maximale des écarts entre observation et modèle.
- une forte augmentation du nombre des points à écart faible.
- la disparition des points à écart fort.

On peut donc annoncer qu'en passant de RAF09 (compatible avec la référence géométrique RGF93V2) à RAF18b (compatible avec la référence géométrique RGF93V2b), nous avons amélioré la précision de l'accès par GNSS à la référence verticale de 1cm à 1 sigma.

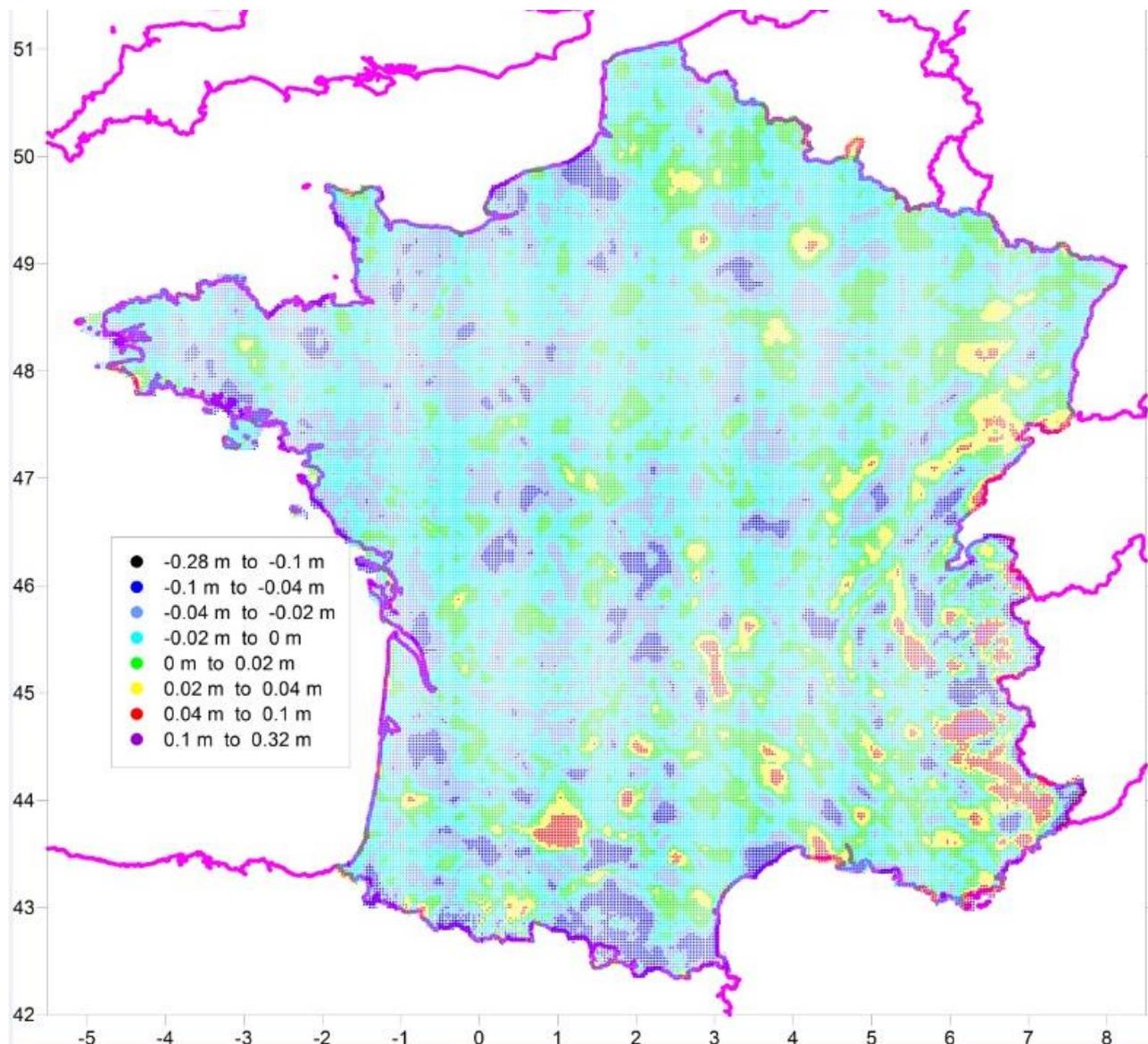
5.6 Comparaison de RAF18b à RAF09

Pour avoir une comparaison significative sur les zones utiles du territoire, il est nécessaire de ne tenir compte ni des zones hors France continentale ni des îles, qui présentent des écarts importants et polluent les statistiques et les graphiques.

Les résultats statistiques sont :

	$N_{\text{RAF18b}} - N_{\text{RAF09}}$
Moyenne	-0.011m
Ecart-type	0.022 m
Valeur minimale	-0.275 m
Valeur maximale	0.315 m

Et la carte des écarts :



5.7 Fichier diffusé

Il se présente sous forme d'une grille au format .mnt directement lisible par le logiciel Circé 5.2.

-Nom du fichier : RAF18b.mnt

-Emprise de la grille :

$42^{\circ} \leq \varphi \leq 51.5^{\circ}$

$-5.5^{\circ} \leq \lambda \leq 8.5^{\circ}$

-Pas de la grille : 0.025° en latitude et 0.033° en longitude.