

La géodésie des Antilles Françaises

Historique et perspectives

La succession des réalisations en matière de référence géodésique, inéluctable car motivée par le progrès technologique et l'amélioration de la précision, perturbe généralement le bon échange de l'information géographique sous toutes ses formes, pendant un laps de temps (toujours trop long), durant lequel l'IGN s'efforce de proposer des mesures d'accompagnement du changement. À titre d'exemple, les réalisations métropolitaines précises de 1993-1995 ont été légalisées en 2000 et ont coexisté avec les anciennes jusqu'en 2009.

L'IGN réalise et entretient des réseaux matérialisés (1952, 1993, 2009,..) et des stations GNSS permanentes (une station en Guadeloupe et une en Martinique) aux Antilles. Il diffuse les coordonnées des points matérialisés au titre du service public. Il met également à disposition sur son site <http://geodesie.ign.fr> les différents algorithmes, paramètres, logiciels qui permettent la transformation des coordonnées dans les meilleures conditions possibles.

Pour le cas des Antilles, la réalisation de 2009 était très souhaitable du point de vue géodésique, pour remplacer la précédente qui était entachée d'imprécisions. Le RGAF09 réalise donc l'ITRS de manière plus précise et plus homogène sur les Antilles. Il a donné lieu à de nouvelles coordonnées très différentes que l'IGN a calculées, mais qui ne sont pas publiées car non légales.

À l'IGN, le Service de géodésie et de nivellement réproouve cette situation, il est depuis 6 ans le premier acteur motivé par la révision du décret et agit dans ce sens autant qu'il lui est possible.

L'IGN participe ainsi activement depuis 2015 à un groupe de travail sous l'égide de la commission géo-positionnement du CNIG, chargé de cette action, réunissant les principaux acteurs concernés par « les leviers pour le compte des services publics » : OGE, DGFIP, SHOM, réseaux, ... La durée du mandat du groupe doit être de un an. Parmi ses objectifs, on note : « Le but de la révision est de rendre les textes d'application sur les références géodésiques applicables en France conformes à la directive inspire (en ce qui concerne notamment les Antilles + nouvelles projections) et homogènes avec les systèmes et standards internationaux. »

L'idée est de définir les références par un arrêté, cité dans le futur décret, les procédures législatives étant alors plus allégées pour les changements à venir.

En attendant que ce projet aboutisse, le SGN a dû réfléchir à la possibilité de diffuser d'une manière ou d'une autre ces coordonnées RGAF09 qui ne sont toujours pas légales, et de mettre à la disposition du public des outils permettant de gérer les transformations entre ces systèmes de référence géodésiques.

Les systèmes de référence géodésique locaux

Zone	Martinique
Système	Fort-Desaix 1952
Description	Réalisation bidimensionnelle effectuée par mesures angulaires lors de la mission IGN de 1952. Le point fondamental a été déterminé par la mission du SHOM 1938-1939.
Point fondamental	Borne du Fort-Desaix à Fort-de-France
Ellipsoïde	International (Hayford 1909)
Méridien origine	Greenwich
Unités d'angles	DMS
Projection associée	UTM fuseau 20 Nord

Zone	Guadeloupe, Marie-Galante, la Désirade, les Saintes
Système	Triangulation IGN 1948 (système Sainte-Anne)
Description	Réseau construit en 1948-1949 couvrant la Guadeloupe et ses dépendances proches.
Point fondamental	Pilier de Sainte-Anne I
Ellipsoïde	International (Hayford 1909)
Méridien origine	Greenwich
Unités d'angles	DMS
Projection associée	UTM fuseau 20 Nord

Le système WGS84 – RRAF

Dans les débuts du positionnement satellitaire par GPS, l'IGN a mis en place un canevas local, appelé originellement le **Réseau de Référence des Antilles Françaises (RRAF)**.

Ce système correspond à la détermination d'un canevas GPS dense, homogène et précis localement, réalisé en 1988 et 1993. Le canevas RRAF est basé sur point fondamental le point GPS réalisé lors d'une campagne internationale TANGO en 1988. Ce point est le phare de la Caravelle (également point DOPPLER TRANSIT et point fixe GPS). Le RRAF couvre aussi l'île de la Guadeloupe et toutes ses dépendances proches ou lointaines. D'une île à l'autre, il peut présenter un décalage d'ordre décimétrique.

RRAF apparaît donc dans Circé Antilles Guyane et dans la plupart des documents publiés après 2000 sous le nom de «WGS84», qui désigne tout système compatible ITRF à 1 mètre près. Dans certaines publications, ce système est également désigné par « WGS84 Antilles » ou « WGS84-RRAF ».

C'est ce système, désigné par « WGS84 », auquel il est fait référence dans le décret « **Décret n° 2006-272 du 3 mars 2006 modifiant le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics** » consultable sur :

http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/Decret2006-272_03-03-06MODdecret2000-1276.pdf

Une des conséquences de ce décret est que les coordonnées des stations permanentes du RGP aux Antilles sont publiées dans le WGS84-RRAF.

Zone	Antilles
Système	WGS84 – RRAF
Description	Ce système correspond à la détermination d'un canevas GPS dense, homogène et précis localement, réalisé en 1988 et 1993. Le point fondamental du canevas est le point GPS observé lors d'une campagne internationale TANGO en 1988. Le RRAF couvre la Martinique, la Guadeloupe et toutes ses dépendances, proches ou lointaines.
Point fondamental	Phare de la Caravelle (également point DOPPLER TRANSIT et point fixe GPS).
Ellipsoïde	IAG GRS80
Méridien origine	Greenwich
Unités d'angles	DMS
Projection associée	UTM fuseau 20 Nord

Le système RGAF09 (réalisation de l'ITRS aux Antilles Françaises)

Une nouvelle campagne d'observations du réseau antillais a été réalisée en 2008 dans toutes les îles des Antilles Françaises : Martinique, Guadeloupe et dépendances (Les Saintes, Marie-Galante, La Désirade, Saint-Martin et Saint-Barthélemy) et a donné naissance au **Réseau Géodésique des Antilles Françaises 2009** (RGAF09).

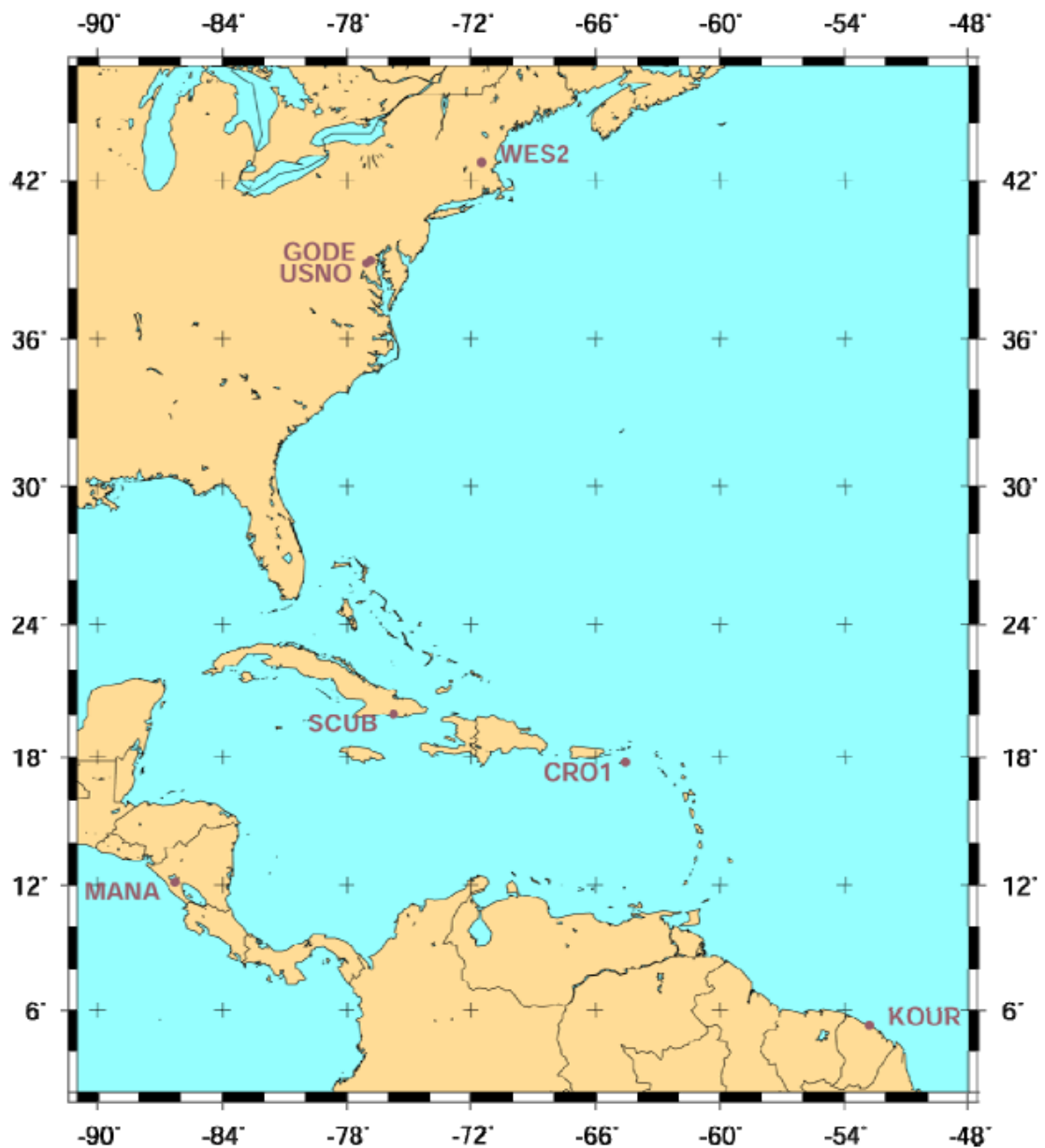
Comme dans le WGS84 – RRAF, la Guyane ne fait pas partie du système RGAF09.

La détermination initiale du RGAF09 fournit un réseau rénové de précision centimétrique homogène à plusieurs échelles : points d'un même site géodésique, sites d'une même île, les îles entre elles, et les îles par rapport à la référence mondiale. C'est pourquoi cette réalisation constitue une amélioration significative par rapport au WGS84-RRAF qui, outre ses incohérences de plusieurs centimètres entre les îles, présentait un décalage systématique d'environ 70 cm avec la référence mondiale.

RGAF09 coïncide avec IGS05 à l'époque 2009.0, époque qui se situe vers la fin de la campagne. Les Antilles étant situées en limite de plaques tectoniques, aucun modèle de vitesse n'est applicable.

RGAF09 est une réalisation de l'ITRS via IGS05 ép. 2009.0.

Dans l'attente d'un nouveau texte légal sur les références géodésiques aux Antilles, le Service de Géodésie et Nivellement a mis en place une solution provisoire, en qualifiant le RGAF09 de système usuel recommandé par l'IGN, et en laissant à dessein en diffusion sur le site les deux versions du logiciel Circé pour permettre le passage entre les systèmes locaux et WGS84-RRAF d'une part, et les systèmes locaux et RGAF09 d'autre part.



Aperçu des stations IGS participant à la mise en référence de la réalisation RGAF09

Zone	Antilles
Système	RGAF09
Description	Système réalisé lors de la campagne GPS et nivellement de 2008. Il coïncide avec l'ITRS via IGS05 époque 2009.0.
Point fondamental	Phare de la Caravelle (également point DOPPLER TRANSIT et point fixe GPS).
Ellipsoïde	IAG GRS80
Méridien origine	Greenwich
Unités d'angles	DMS
Projection associée	UTM fuseau 20 Nord

Transformations de coordonnées

Dans l'attente de l'officialisation du système RGAF09 dans un nouveau décret ou arrêté, l'IGN met à disposition les paramètres de transformation des systèmes locaux et WGS84-RRAF vers le système RGAF09. Ce sont les paramètres utilisés dans Circé Antilles Guyane v4.2.

Concernant le signe des rotations, la BDG de l'IGN utilise la convention de l'IERS, qui consiste à ramener les axes du système (2) (ou système d'arrivée) parallèles à ceux du système (1) (ou système de départ). Cette convention est celle utilisée dans les programmes CIRCÉ. Par contre, dans la plupart des systèmes GPS autonomes ou les Systèmes d'Information Géographiques, les signes des rotations doivent être inversés.

De ce fait, il est conseillé d'utiliser pour ces rotations exprimées selon la convention IERS les symboles R_1 , R_2 et R_3 , pour les différencier des notations ε_x , ε_y , et ε_z qui sont plus couramment utilisées (en sachant que l'IGN a longtemps noté ces rotations avec le symbole ε alors que le symbole R aurait été préférable). La formule de transformation de coordonnées cartésiennes peut alors s'écrire (T étant le vecteur translation et Δ le facteur d'échelle) :

$$X' = T + \Delta \cdot X + R \cdot X \quad \text{avec} \quad R = \begin{pmatrix} 1 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 1 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 1 \end{pmatrix}$$

La formule peut également s'écrire :

$$X' = T + (1 + \Delta) \cdot X + R \cdot X \quad \text{avec} \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Attention ! Dans les formules ci-dessus, les rotations doivent être exprimées en radians.

Attention ! Ces formules sont des formules simplifiées, qui ne peuvent être utilisées que dans le cas de petites rotations (quelques secondes d'arc).



Zone	Martinique	
Transformation	Fort-Desaix → RGAF09	WGS84–RRAF → RGAF09
T_X	127.744 m	0.7696 m
T_Y	547.069 m	-0.8692 m
T_Z	118.359 m	-12.0631 m
R₁	-3.1116"	-0.32511"
R₂	4.9509"	-0.21041"
R₃	-0.8837"	-0.02390"
Δ (facteur d'échelle)	14.1012 x 10 ⁻⁶	0.2829 x 10 ⁻⁶

Zone	Guadeloupe, Marie-Galante, la Désirade, les Saintes	
Transformation	Sainte-Anne → RGAF09	WGS84–RRAF → RGAF09
T_X	-471.060 m	1.2239 m
T_Y	-3.212 m	2.4156 m
T_Z	-305.843 m	-1.7598 m
R₁	0.4752"	0.03800"
R₂	-0.9978"	-0.16101"
R₃	0.2068"	-0.04925"
Δ	2.1353 x 10 ⁻⁶	0.2387 x 10 ⁻⁶

Zone	Saint-Martin, Saint-Barthélemy	
Transformation	Fort-Marigot → RGAF09	WGS84–RRAF → RGAF09
T_X	151.613 m	14.6642 m
T_Y	253.832 m	5.2493 m
T_Z	-429.084 m	0.1981 m
R₁	-0.0506"	-0.06838"
R₂	0.0958"	0.09141"
R₃	-0.5974"	-0.58131"
Δ	-0.3971 x 10 ⁻⁶	-0.4067 x 10 ⁻⁶

Changements de système avec le logiciel Circé

Concernant le logiciel Circé, les utilisateurs peuvent accéder à deux versions du programme pour les Antilles et la Guyane :

- Circé Antilles Guyane v3.2 (4Mo)  (version 3.2)
- Circé Antilles Guyane v4.2 (3Mo)  (version 4.2)

La version 3.2 ne traite pas RGAF09.

La séparation dans deux logiciels distincts réside surtout dans le fait que seule la version 3.2 permet de passer directement des anciens systèmes de triangulation à la réalisation légale WGS84-RRAF et réciproquement.

La version 4.2 traite RGAF09 mais elle ne doit pas être utilisée pour passer des anciens systèmes de triangulation à la réalisation légale WGS84-RRAF et réciproquement.

La mise à disposition dès à présent par l'IGN de Circé Antilles Guyane version 4.2, qui assure le passage entre les systèmes historiques, le système réglementaire actuel WGS84 et le RGAF09, permet effectivement de travailler dans le nouveau système tout en restant conforme au décret actuel.

Les systèmes de référence altimétriques

Le tableau suivant liste les référentiels altimétriques des Antilles Françaises de la Base de Données Géodésique du SGN.

Nom	Point fondamental	Remarque	RN
IGN 1988 (Grande-Terre & Basse-Terre)	PORT DE POINTE À PITRE	Niveau de référence à 0.629 m au-dessus du zéro des hydrographes (1947-1948) et à 0.46 m au-dessus du zéro des sondes (1984).	GO - 7
IGN 1988 MG (MARIE-GALANTE)	PORT DE GRAND-BOURG	Niveau de référence à 0.46 m au-dessus du zéro des hydrographes (1987), différence correspondant à la moyenne des amplitudes de marée de Pointe-à-Pitre.	MO - 1
IGN 1988 LS (LES SAINTES)	WHARF DE TERRE DE HAUT	Niveau de référence à 0.46 m au-dessus du zéro des hydrographes (1984), différence correspondant à la moyenne des amplitudes de marée de Pointe-à-Pitre.	O.DE - 5
IGN 1988 SM (SAINT-MARTIN)	EGLISE DE MARIGOT Niveau moyen déduit à Fort-Marigot (niveau supérieur - 40 à 45 cm)	Niveau moyen en accord avec la cote (61,840 m) du pilier géodésique, déterminée au cours de la mission IGN 1949-1950.	AS - 13
IGN 1988 SB (SAINT-BARTHELEMY)	PORT DE GUSTAVIA	Niveau de référence à 0.201 m au-dessous de la limite supérieure des coquillages, à 0.629 m au-dessus du zéro des hydrographes.	A.EF - 2
IGN 1987 (MARTINIQUE)	LE LAMENTIN en remplacement du repère SHOM 1939 disparu	Niveau de référence à 0.56 m au-dessus du zéro de réduction des sondes (1939).	N.BC - 2
IGN 1992 LD (LA DESIRADE)	Repère SHOM jetée ouest disparu	zéro IGN = zéro SHOM + 0.629 m (relevé à Pointe-à-Pitre)	O.AB - 20 ?

La Martinique : Système d'altitude IGN 1987

Type d'altitude :

Le système d'altitude IGN 1987 est de type orthométrique.

Point fondamental :

Le système d'altitude IGN 1987 a pour point fondamental un repère situé sur le socle de la statue de Jeanne d'Arc au Lamentin et dont l'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer a été déterminée à l'issue d'observations marégraphiques réalisées à partir de 1939.

Organisation du réseau :

Le réseau martiniquais de nivellement de précision est subdivisé en quatre réseaux de plus en plus denses dits de 1^{er} ordre (réseau primordial), 2^{ème}, 3^{ème}, et 4^{ème} ordre.

La Guadeloupe : Système d'altitude IGN 1988

Île	Grande-Terre et Basse Terre	La Désirade	Les Saintes	Marie-Galante	St-Barthélemy	St-Martin
Système	IGN 1988	IGN 1992 LD	IGN 1988 LS	IGN 1988 MG	IGN 1988 SB	IGN 1988 SM

Type d'altitude :

Les systèmes d'altitude IGN 1988 (toutes les îles) et IGN 1992 (la Désirade) sont de type orthométrique.

Point fondamental :

Le système d'altitude IGN 1988 (relatif à Grande-Terre et Basse-Terre) a pour point fondamental un repère situé sur le bâtiment de la sous-préfecture à Pointe-à-Pitre et dont l'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer a été déterminée à l'issue d'observations marégraphiques réalisées à partir de 1947.

Organisation du réseau :

Le réseau guadeloupéen de nivellement de précision est subdivisé en deux réseaux dits de 1^{er} ordre (réseau primordial) et 2^{ème} ordre. Il couvre toutes les îles. Chaque île a son propre réseau et son propre point fondamental. Seule la Désirade ne comporte pas de réseau, celui-ci se limitant au point fondamental.

Surfaces de conversion altimétrique associée au WGS84-RRAF

La surface de conversion altimétrique entre un système géodésique et un système altimétrique est une grille appelée "gg*00_**.txt" (Géoïde géométrique '* 2000) où * sont des lettres désignant la zone d'application du système de référence altimétrique (typiquement une île) et 2000 est l'année du calcul de la grille.

Par exemple pour la Martinique, la grille s'appelle "ggm00.txt".

Le pas des grilles est de 0.025°. Le système d'expression des coordonnées des nœuds est WGS84-RRAF, et l'interpolateur conseillé est l'interpolateur bilinéaire.

Elles sont utilisées pour transformer une hauteur ellipsoïdale dans le WGS84-RRAF en altitude.

Ces grilles sont issues d'une interpolation sur les points GPS nivelés connus à l'époque. De plus, toutes les grilles ont fait l'objet, lors de leur calcul, de l'utilisation de données EGM96 au large des côtes, ajoutées aux données terrestres mesurées de la BDG.

Dans certains cas, ce modèle mondial a dû être translaté localement pour éviter une distorsion trop importante et peu réaliste du modèle géométrique. L'interpolation de quelques données dans le modèle mondial EGM96 permet en effet de connaître le décalage entre les deux modèles de géoïde. L'étendu du modèle étant faible dans le cas des îles de Antilles, ce décalage a été assimilé à une constante prise sur la moyenne des valeurs du décalage.

Quelques points issus du modèle EGM96 et corrigés de cette valeur moyenne ont été ajoutés au jeu de données initiales avant le calcul de la grille définitive.

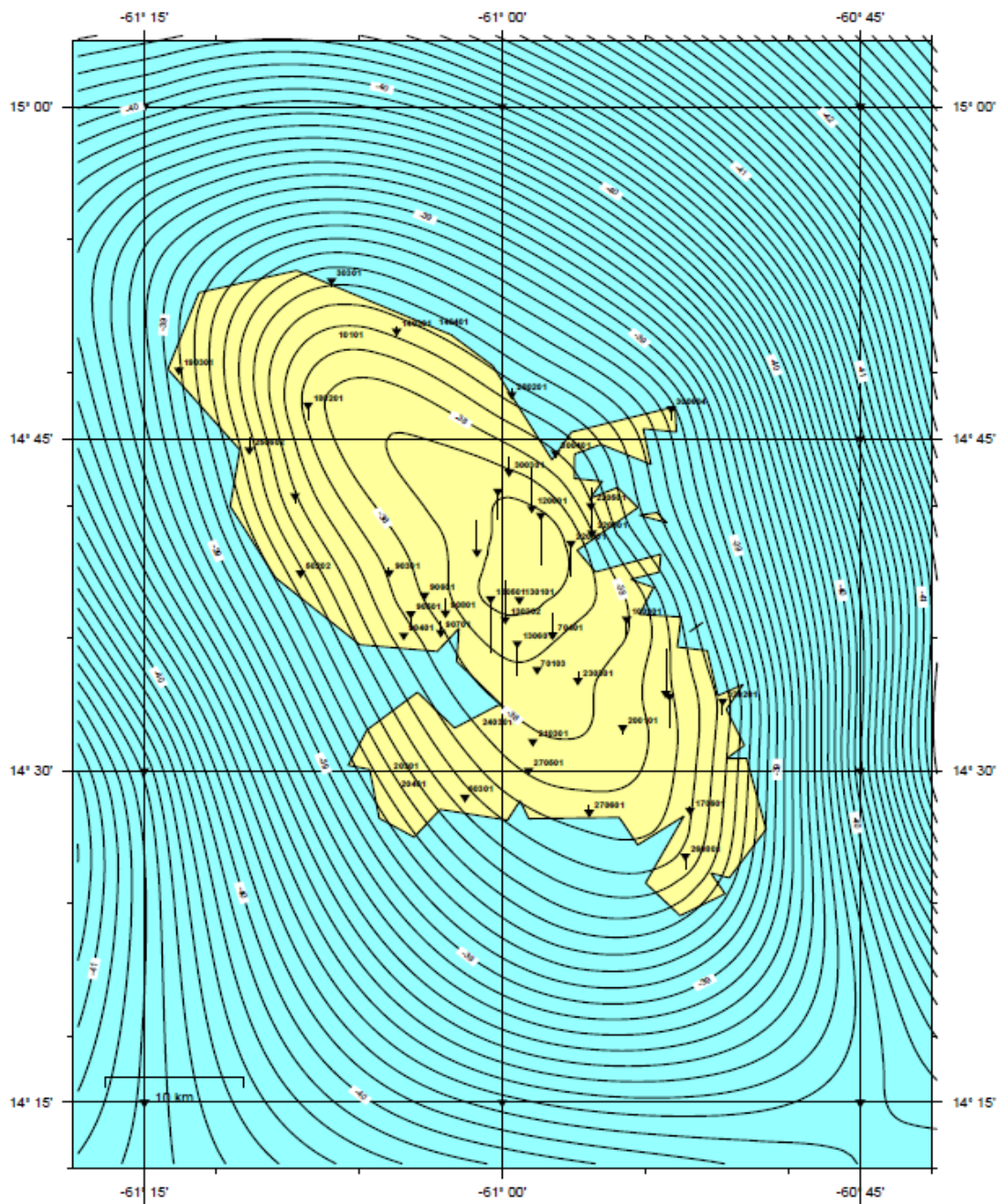
Ces grilles sont peu précises au regard des résultats obtenus de nos jours par la géodésie, car l'établissement des grilles de conversion a été effectué à partir d'un échantillonnage limité de points GPS nivelés.

Au regard du nombre très limité de points GPS nivelés, de la nature spécifique et de l'histoire géodésique » de chaque île, il est assez délicat de quantifier la précision globale des modèles. On peut tout de même raisonnablement penser que la précision de ces grilles est de l'ordre de :

- 20 cm pour Martinique, Guadeloupe (GrandeTerre BasseTerre), Marie Galante, Saint Martin, Saint Barthélémy
- 30 cm à 50 cm pour La Désirade et Les Saintes

Le département de la Guadeloupe, compte tenu des différents systèmes altimétriques propre à ses dépendances, a plusieurs grilles :

ggg00.txt	Guadeloupe (Grande-Terre, Basse-Terre)
ggg00_mg.txt	Guadeloupe Marie-Galante
ggg00_ld.txt	Guadeloupe La Désirade
ggg00_ls.txt	Guadeloupe Les Saintes
ggg00_sb.txt	Guadeloupe Saint-Barthélemy
ggg00_sm.txt	Guadeloupe Saint-Martin



Isolignes du modèle GGM00 [MARTINIQUE]

Surfaces de conversion altimétrique associées au RGAF09

La surface de conversion altimétrique entre un système géodésique et un système altimétrique est une grille appelée `gg10_*.mnt` (Géoïde géométrique '*' 2010) où * sont des lettres désignant la zone d'application du système de référence altimétrique (typiquement une île).

Le pas des grilles est de 0.025° . Le système d'expression des coordonnées des nœuds est RGAF09, et l'interpolateur conseillé est l'interpolateur bilinéaire.

Par exemple pour la Martinique, la grille s'appelle `gg10_mart.mnt`.

Longitude minimum -61.300° maximum -60.725°

Latitude minimum 14.300° maximum 15.000°
 Pas en longitude 0.025° pas en latitude 0.025°
 Système d'expression des coordonnées des nœuds : RGAF09
 Utilisation : île de la Martinique
 Interpolateur : bilinéaire

Elles sont utilisées pour transformer une hauteur ellipsoïdale dans le RGAF09 en altitude.

Le département de la Guadeloupe, compte tenu des différents systèmes altimétriques propre à ses dépendances, a plusieurs grilles :

gg10_gtbt.txt	Grande-Terre et Basse-Terre
gg10_mg.txt	Marie-Galante
gg10_ld.txt	La Désirade
gg10_ls.txt	Les Saintes
gg10_sb.txt	Saint-Barthélemy
gg10_sm.txt	Saint-Martin

Méthode de calcul :

Les points GPS nivelés des îles (traitées séparément les unes des autres) ont des coordonnées RGAF09 ($\lambda \phi h_e$) et des altitudes (H), dont on a déduit les anomalies d'altitude RGAF09 ($\zeta_{\text{mesuré}} = h_e - H$).

On dispose de l'écart en chaque point entre les valeurs d'anomalies d'altitude mesurée et celle que l'on interpole dans le modèle mondial EGM08 :

$$\delta\zeta_i = \zeta_i \text{ mesuré} - \zeta_i \text{ EGM08 (i point GPS nivelé)}$$

Le principe du traitement est de trouver, pour chaque île, une fonction de ces valeurs qui permette d'interpoler un $\delta\zeta_n$ en chaque nœud de la grille que l'on souhaite créer. Les valeurs aux nœuds en seront déduites par somme des $\delta\zeta_n$ et des valeurs interpolées et dans EGM08 :

$$\zeta_n = \delta\zeta_n(\delta\zeta_i) + \zeta_n \text{ EGM08 (n nœud de la grille)}$$

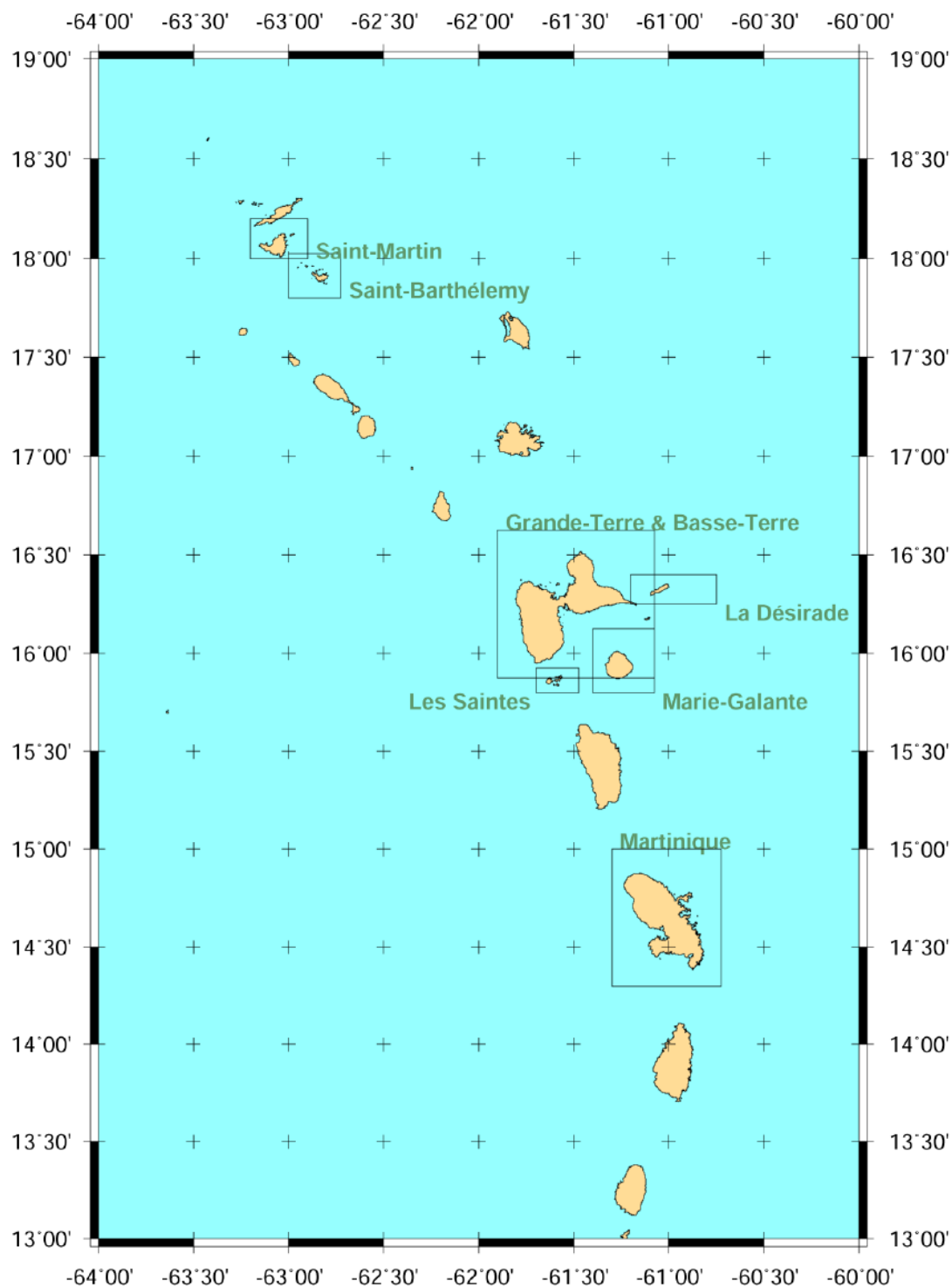
Trois possibilités sont envisagées pour déterminer ces fonctions :

- Pour les grandes îles incluant de nombreux points mesurés bien répartis (Grande-Terre & Basse-Terre et Martinique), les écarts sont modélisés par collocation.
- Pour les petites îles incluant suffisamment de points mesurés bien répartis (Marie-Galante), les écarts sont modélisés par un basculement (régression linéaire d'ordre 1).
- Pour les petites îles incluant peu de points mesurés ou mal répartis (La Désirade, Les Saintes, Saint-Martin, Saint-Barthélemy), les écarts sont modélisés par une translation (régression linéaire d'ordre 0).

La méthode de collocation a été développée au SGN. Il s'agit d'un algorithme de krigeage universel qui inclut une régression linéaire d'ordre 1. De plus, il met en œuvre une méthode de validation optimisée qui prédit la valeur de chaque point de mesure par détermination d'un sous-krigeage qui n'utilise pas le point à contrôler.

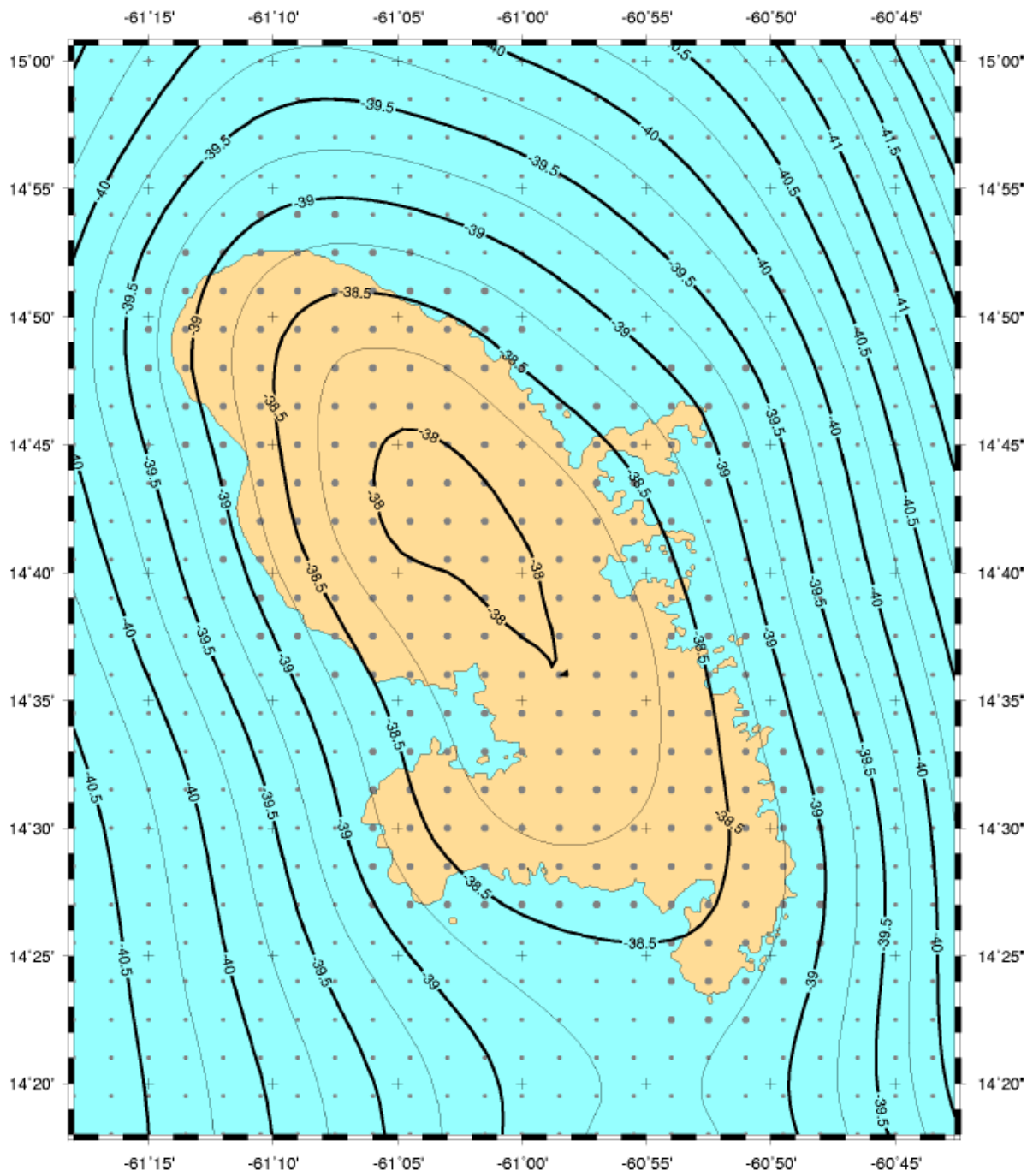
La validation repose en partie sur un examen visuel des résidus, car il faut repérer les points qui s'écartent des tendances locales tout autant que les points qui ont un fort résidu. Par ailleurs, on privilégie les points mesurés nouveaux.

A l'issue des calculs, les codes de précision de la conversion altimétrique aux nœuds des grilles sont « de 5 à 10 cm » sur les terres émergées, et « supérieure à 1 m » en mer.



Carte GMT¹ des emprises des grilles de conversion altimétrique

¹ Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, **EOS Trans. AGU**, 72, 441, 1991.



Carte de gg10_mart.mnt sous forme de courbes de niveaux

