

Le nouveau réseau géodésique national du Cameroun

■ Jean-Louis CARME

Cet article présente les travaux de réalisation du nouveau réseau géodésique national du Cameroun effectués par la société FUGRO GEOID pendant l'année 2011. Après une description des principales phases du projet, le texte présente les méthodes utilisées lors du traitement des données.

Sont ainsi passés en revue la mise en référence et le calcul des 25 points du réseau de premier ordre par rapport au Core Network de l'International GNSS Service (IGS), le calcul et l'ajustement par blocs des 510 points du réseau de second ordre, et enfin la détermination d'une nouvelle surface de correction altimétrique (CGM11: Cameroon Geoid Model 2011) par adaptation du modèle global EGM2008 sur un réseau de 130 points GPS nivelés répartis sur l'ensemble du territoire. La grille CGM11 permettra à l'avenir de calculer les altitudes au-dessus du niveau moyen de la mer dans le référentiel NGAC (Nivellement Général de l'Afrique Centrale, utilisé au Cameroun) de points mesurés par GPS sur le territoire.

MOTS-CLÉS

Cameroun, 2011, réseau géodésique national, GPS précis, ajustement par moindres carrés, surface de correction altimétrique, modèle de géoïde régional



Figure 1. Situation du Cameroun

Projet

A la fin de 2010, le Ministère des Domaines et des Affaires Foncières du Cameroun (MINDAF) s'est engagé dans un vaste projet de réforme foncière et de modernisation du Cadastre et se dote, à ce titre, d'un réseau géodésique national de référence, matérialisé au sol.

Jusqu'alors, les informations cadastrales, domaniales, patrimoniales et foncières du Cameroun étaient collectées sur la base de multiples systèmes plus ou moins cohérents au niveau national. Le livre foncier du pays pouvait donc s'en trouver mis en cause. Pour la population, un cadastre national est un outil qui permettra de mettre fin aux nombreux conflits fonciers.

Au-delà de cet objectif, ce réseau de grande précision est destiné à être utilisé pour appuyer les travaux de cartographie, la délimitation des frontières ou le développement d'infrastructures sur l'ensemble du territoire (routes, voies ferrées, lignes électriques, oléoducs...).

Le MINDAF a confié la réalisation de ce nouveau canevas géodésique à FUGRO GEOID, société spécialisée en géodésie, topographie, hydrographie, scanning laser, cartographie LIDAR et géomonitoring, membre du groupe FUGRO, leader mondial dans le domaine des géosciences.

Pour superviser cette réalisation, le MINDAF a mandaté IGN France International.

Spécifications

Le nouveau réseau géodésique devait être constitué de 25 bornes de 1^{er} ordre espacées tous les 200 km, encadrées chacune par 4 bornes auxiliaires, et de 500 bornes de 2nd ordre ou repères géodésiques scellés dans un affleurement rocheux espacés tous les 20 à 30 km.

En outre, chacune des 370 communes formant le territoire Camerounais devait être pourvue d'au moins un point géodésique, sans aucune considération de géométrie.

Géographie

Même si, avec une superficie de 475 442 km² et une population d'un peu moins de 20 millions d'habitants, le Cameroun est un pays de taille moyenne en Afrique, ses caractéristiques physiques font de cette réalisation un projet de grande envergure.

En effet, le pays est d'abord très étendu. 1 240 km séparent la limite septentrionale de la forêt équatoriale du bassin du Congo au sud et le lac Tchad en bordure du Sahara au nord. D'est en ouest, son étendue maximale est de 850 km entre la rivière Sangha à la frontière avec le Congo et la Centrafrique et la péninsule de Bakassi à la frontière du Nigeria. Ainsi, un projet qui prévoit que chaque fraction du territoire soit équipée d'une borne géodésique nécessite d'avoir à parcourir au final des distances considérables.

Par ailleurs, le relief du Cameroun est compliqué, en particulier sur toute sa partie occidentale. La dorsale camerounaise, alignement de hauts plateaux et de montagnes constitué d'un bloc du socle soulevé et recouvert d'épanchements basaltiques, traverse ainsi les régions

► sud-ouest (où le Mont Cameroun culmine à 4095 m), nord-ouest et Adamaoua, interrompu au nord par l'effondrement que constitue le bassin de la Benoué. A l'extrême nord, on trouve encore les monts Mandara avant la grande plaine inondable du bassin du Logoné. Bien que moins accidentés, les plateaux vallonnés des régions Centre et Sud sont traversés par de nombreux cours d'eau.

Enfin, ce contexte géographique difficile est rendu particulièrement contraignant du fait que de nombreuses pistes ne sont réellement praticables qu'en dehors de la saison des pluies, dont les dates varient, selon les régions, entre mars et octobre. Ainsi, à l'extrême nord, la mousson africaine dure 2 mois tandis que sur le littoral et les montagnes et plateaux de l'ouest, les pluies tombent régulièrement pendant 8 mois entre mars et octobre.

Travaux préparatoires

Cette phase a consisté en l'élaboration d'un avant-projet de pré-localisation des sites candidats, des accès possibles ainsi que des repères de nivellement disponibles a priori. Ont également été rédigés le plan de réalisation et de contrôle et les procédures d'exécution des différentes phases du projet.

Une première ébauche d'avant-projet a été établie en fonction de considérations géométriques et des accès a priori. Cet avant-projet a ensuite été affiné au cours d'ateliers de travail et de réunions de concertation avec l'ensemble des responsables régionaux et départementaux des services du Cadastre afin de mettre à jour la liste de l'ensemble des communes avec leur nom officiel et leur situation exacte ainsi que de tous les villages importants et lieux-dits judicieusement situés.



Figure 4. Séminaire de travail

A l'issue de cette étude 555 sites ont ainsi été présélectionnés.

Reconnaissance sur le terrain

Cette opération stratégique avait plusieurs objectifs :

- valider, modifier ou annuler le choix des différentes localités présélection-



Figure 2. Lac Tchad



Figure 3. Monts Mandara



Figure 5. Rivière de l'Adamaoua



Figure 6. Piste dans le Centre



nées ainsi que le type de point (1^{er} ou 2^e ordre), le cas échéant rajouter des sites supplémentaires ;

- préciser l'emplacement exact des points ainsi que le type de matérialisation (bornes de 1^{er} ou 2^e ordre, repère géodésique scellé). En plus des critères de sélection classiques (pérennité du site, de préférence sur le domaine public, stabilité du sol, absence de masques GPS), la préférence était donnée aux sites situés à proximité d'un repère de nivellement ;

- reconnaître les différents itinéraires d'accès aux sites et notamment leur praticabilité avec un camion et un pick-up 4 x 4 selon les saisons (état général, durées, vitesses moyennes des différents tronçons, passages de gués, ponts submersibles, zones de broussiers ou ravinées, sections dégradées en dévers au-dessus de falaises, passage de grumiers ou autres camions lourdement chargés en direction du Tchad, etc.) ainsi que les repères de nivellement des mailles situés sur ou à proximité de ces itinéraires.

La reconnaissance a été réalisée conjointement par les équipes FUGRO GEOID et les responsables régionaux et départementaux du cadastre.

Au final, 535 sites ont été implantés, dont 25 pour le réseau de 1^{er} ordre et 510 pour celui de 2^e ordre, les 10 sites surnuméraires étant prévus pour compenser l'abandon de sites qui se seraient avérés inaccessibles pendant les phases de matérialisation ou d'observations. Par ailleurs, 145 repères de nivellement ont

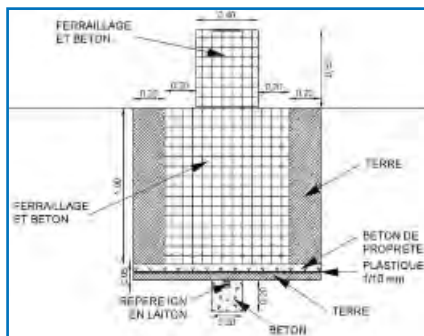


Figure 7. Schéma des bornes de 1^{er} ordre

été identifiés sur le terrain, dont seulement 30 situés à proximité d'un site d'implantation (moins de 1 km).

Matérialisation

Les 25 bornes de 1^{er} ordre ont été construites in situ par trois équipes dédiées (conducteur de travaux, maçons et aides).

Les bornes de 2^e ordre ont été confectionnées sur des chantiers de préfabrication situés dans chacune des dix régions – la qualité du béton utilisé étant ainsi validée en laboratoire par un bureau d'études et de contrôles géotechniques – puis transportées sur les différents sites par trois équipes de transport (camions). Cinq à huit équipes de pose ont ensuite effectué la mise en place de 485 bornes. Une équipe spécifique était chargée du percement et scellement des repères géodésiques des 25 points matérialisés dans un affleurement rocheux.

Un coordinateur et deux responsables équipés de pickups 4x4 ont encadré ces équipes sur le terrain.

Le schéma des bornes de référence est présenté en figure 7. L'alignement du repère en laiton à travers la plaque d'aluminium sommitale au-dessus du repère souterrain a été réalisé grâce à la mise en place de 2 paires de chaises (gabarit) reliées par des cordons dont l'intersection était rigoureusement alignée à la verticale du repère souterrain au moyen d'un fil à plomb. Les 4 bornes auxiliaires en béton encadrent le point.

Enfin, autour de toutes les bornes (1^{er} et 2^e ordres) a été mise en place une clôture métallique de protection sur laquelle est fixée une plaque d'information mentionnant le statut officiel du site.

Les opérations de matérialisation se sont déroulées de façon satisfaisante en dépit de conditions souvent difficiles et qui ont soumis les véhicules à rude épreuve compte tenu du début de la petite saison des pluies en avance de plus de 3 semaines par rapport aux prévisions.

Observations

La campagne d'observations a été conduite en plusieurs étapes :

- calibration et contrôle des instruments en atelier (antennes GPS, nivelle sphérique et plomb optique des embases, adaptateurs à nivelle torique) ;
- préparation logistique et planification des campagnes d'observations.
- acquisition de données GPS sur les 25 points géodésique de 1^{er} ordre, les 510 points géodésiques de 2^e ordre et les 100 bornes auxiliaires, ainsi que les 100 points GPS temporaires situés à

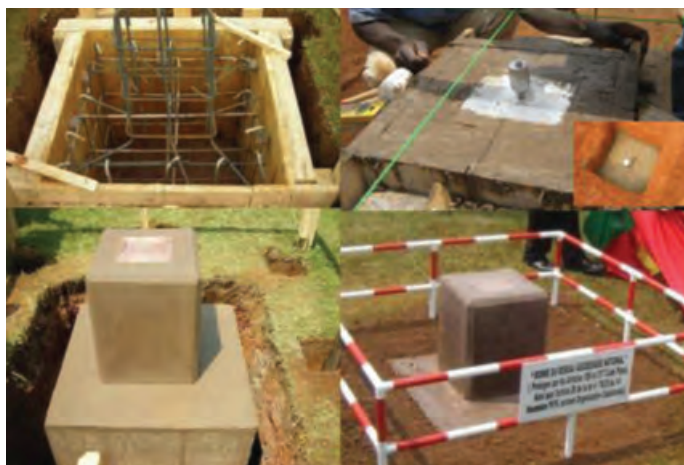


Figure 8. Etapes de la construction des bornes de 1^{er} ordre



Figure 9. Borne de 2^e ordre



proximité d'un repère de nivellement et destinés au rattachement altimétrique du réseau.

- Nivellement direct des points géodésiques et points GPS temporaires situés à proximité des 145 repères de nivellement reconnus (cheminements n'excédant pas 1 km).
- Renseignement des fiches d'observations.
- Collecte, contrôle, et archivage des données acquises.
- Validation des observations au fur et à mesure de l'acquisition.

Les réseaux de 1^{er} et 2^e ordres ont été observés simultanément afin de minimiser les déplacements, toujours compliqués, et respecter ainsi les délais d'exécution.

Huit équipes équipées de récepteurs et antennes GPS géodésiques identiques (Trimble 5700 et Zephyr Geodetic) évoluaient simultanément selon un schéma de déplacements établi à l'avance. Cinq d'entre elles étaient également pourvues d'un deuxième ensemble d'équipement GPS, et quatre également d'un niveau électronique (Trimble Dini). En outre, les 4 ensembles GPS utilisés pour l'observation des points de 1^{er} ordre étaient également équipés d'adaptateurs à nivellement torique.

Le schéma d'observation a été scindé en 27 triangles principaux reliant les points de 1^{er} ordre, dans certains cas regroupés deux par deux en quadrilatères (dans les zones de moindre densité des points géodésiques de 2^e ordre).

Lors de chaque session d'observation, 3 à 4 points de 1^{er} ordre et 5 à 9 points de 2^e ordre (ou bornes auxiliaires et points GPS temporaires) étaient observés simultanément. La durée des sessions d'observation des points de 2^e ordre était comprise entre 4 heures (durée minimale spécifiée) et 12 heures. La durée des sessions d'observations des points de 1^{er} ordre a varié entre 72 heures (durée minimale spécifiée) et 12 jours en fonction du nombre de triangles principaux auxquels appartenaient les points.

A l'intérieur de chaque triangle principal (ou quadrilatère principal), les 4 ou 5 équipes évoluant sur les points de 2^e ordre se voyaient attribuer chacune

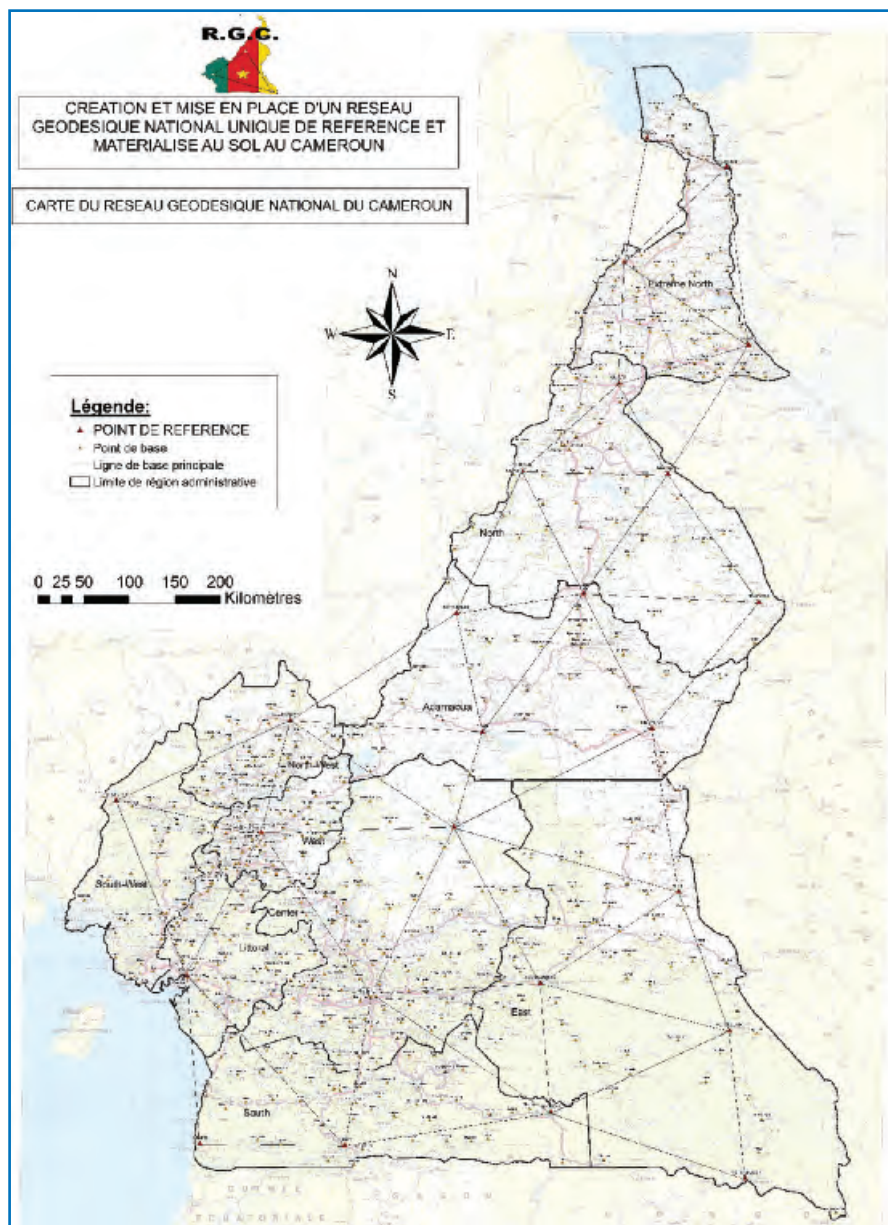


Figure 10. Schéma du réseau : 27 triangles principaux reliant les 25 points de 1^{er} ordre

une zone d'étendue réduite. Ce schéma atypique, tout en permettant de former des polygones avec des lignes de base GPS plus équilibrées (car reliant des points toujours relativement éloignés les uns des autres), a également permis d'augmenter le nombre de sessions et ainsi fortement contribué au respect des délais.

Les nivellements ont été intégrés aux déplacements des équipes et effectués dans les règles de l'art.

Les observations ont fait l'objet de procédures de contrôle spécifiques afin que toute erreur puisse être détectée et corrigée. Ainsi, par exemple, chaque mesure de hauteur d'antenne a été

photographiée, le mètre-ruban étant maintenu allongé entre le repère et l'encoche de mesure sur l'antenne, puis contrôlée indépendamment a posteriori.

La phase d'observation s'est déroulée sans problème majeur malgré un cas de paludisme ayant nécessité un rapatriement sanitaire et un grand nombre d'imprévus liés aux déplacements : effondrement du pont sur la piste principale entre Banyo et Tibati pendant la phase d'observation GPS (événement ayant entraîné un détour de plus de 400 km des équipes), grumier accidenté couché en travers de la piste entre Sangmelima et Mintom II, panne du bac entre Lomié et Mintom II...



Géoréférencement

■ Référentiel géodésique

Le calcul du réseau géodésique national du Cameroun a été effectué dans le référentiel géodésique ITRF 2008 Epoque 2011.5, correspondant presque exactement au milieu de la période d'observation (2011.503).

L'ITRF 2008 correspond à la dernière réalisation de l'ITRS et, par conséquent, s'est imposé comme le référentiel le plus approprié.

Le choix de l'Epoque 2011.5 permet de s'affranchir des systématismes liés à une modélisation imparfaite des vitesses des points du réseau géodésique du Cameroun. En effet, les modèles de vitesse disponibles (NNR-Nuvel-1a, ITRF2008 et précédents) sont, selon toute vraisemblance, relativement imprécis au Cameroun compte tenu à la fois du nombre réduit de stations permanentes sur la plaque Africaine et la sous-plaque Somalienne et de leur répartition déséquilibrée. En particulier, l'hypothèse de rigidité de la plaque dans cette zone ne peut être établie, notamment compte tenu de l'existence de la Dorsale Volcanique du Cameroun. En tout état de cause, les modèles existants ne peuvent pas être validés pour l'instant en l'absence de stations permanentes dans la région.

Au contraire des points du réseau, les vitesses des stations IGS permanentes sont parfaitement connues puisqu'elles ont été calculées à partir de longues séries temporelles (excédant toujours 2½ ans). En outre, elles peuvent être validées pendant la période de mesure grâce aux solutions quotidiennes et hebdomadaires (fichiers SINEX) calculées par les principaux centres de calcul (COD, MIT, SIO...).

Le choix de l'Epoque 2011.5 est donc apparu comme le plus pertinent dans l'hypothèse où un nouveau modèle de vitesse verrait le jour dans les années à venir, les coordonnées publiées des points du réseau géodésique du Cameroun n'étant alors pas biaisées par l'application d'un modèle imprécis devenu obsolète.

■ Référentiel altimétrique

Le référentiel altimétrique utilisé au

Cameroun est le Nivellement Général d'Afrique Centrale (NGAC), dont le marégraphe de référence se situe à Pointe Noire au Congo, et auquel est associé un système d'altitudes orthométriques.

Traitement de données

■ Mise en référence et calcul du réseau de 1^{er} ordre

Problématique

La précision de mise en référence d'un réseau de points GPS est d'autant plus élevée que le maillage constituant les stations fiducielles de référence est dense et équilibré. A contrario, des stations de référence mal réparties au plan géométrique peuvent entraîner des erreurs non négligeables.

Pour éviter d'introduire un systématisme lié à un déséquilibre des stations de rattachement et donc optimiser la mise en référence dans l'ITRF2008, l'IGS (*International GNSS Service*) a défini un sous-réseau fondamental de l'IGS08 (*Core Network, Rebischung et al, 2011*).

Méthode

La mise en référence du réseau de 1^{er} ordre a été réalisée à l'aide de la suite logicielle de calcul de précision GAMIT-GLOBK, développée conjointement par le MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), le CfA (*Harvard Smithsonian Center for Astrophysics*) et le SIO (*Scripps Institution of Oceanography*).

Nous avons fait le choix d'effectuer un calcul global des 25 points dans le réseau de l'IGS selon une approche en trois étapes :

Dans la première étape, nous avons utilisé les doubles-différences de phase des observations journalières pour estimer les coordonnées des points observés, le délai zénithal atmosphérique de chaque station toutes les deux heures, les paramètres d'orbites (dérivés des orbites précises finales calculées par les différents centres de calcul IGS, SIO, MIT) et les paramètres d'orientation de la Terre (dérivés du mouvement polaire et de la différence UT1-UTC fournis par l'IERS) en appliquant de faibles contraintes de départ à l'ensemble des paramètres.

Nous avons permis un contrôle des orbites en incluant les observations de 12 stations permanentes IGS réparties le plus régulièrement possible sur la plaque Africaine pour 8 d'entre elles (ADIS, MAS1, NKLG, NOT1, RABT, RAMO, SUTH, WIND) et la sous-plaque Somalienne (dont les paramètres de rotation ne sont pas très différents) pour 4 d'entre elles (HARB, MALL, MBAR, NURK).

Cette première étape a fourni un réseau flottant de grande précision (c'est-à-dire avant la mise en référence) dans la mesure où les stations IGS utilisées permettent d'augmenter la redondance du réseau d'observations avec des lignes de base supplémentaires dans toutes les directions à l'extérieur du réseau de référence du Cameroun).

Dans la seconde étape, nous avons utilisé ces solutions journalières faiblement contraintes et leurs matrices de covariance comme quasi-observations que nous avons combinées via un filtre de Kalman dans GLOBK pour déterminer un jeu de coordonnées des 37 stations de ce réseau avec une grande précision relative. La mise en référence dans l'ITRF du réseau découle directement de l'intégration des 12 stations IGS sélectionnées.

Ces deux premières étapes ont été répétées en utilisant les coordonnées calculées lors de ce premier calcul (*postfit coordinates*) comme données d'entrée (*a priori coordinates*) d'un second calcul GAMIT-GLOBK. Ce second calcul a fourni une solution régionale très précise mais affectée par la géométrie particulière des stations IGS présentes sur la plaque Africaine et la sous-plaque Somalienne.

Lors de la troisième étape, nous avons combiné les quasi-observations journalières de notre solution régionale avec les quasi-observations de la solution globale issue de données de phase de 80 stations IGS fournies par le *Geodesy and Geodynamics Group du Department of Earth, atmospheric and Planetary Science* du MIT pour s'affranchir des systématismes liés à la géométrie particulière de la solution régionale compte tenu de l'objectif de mise en référence au mieux dans l'ITRF 2008



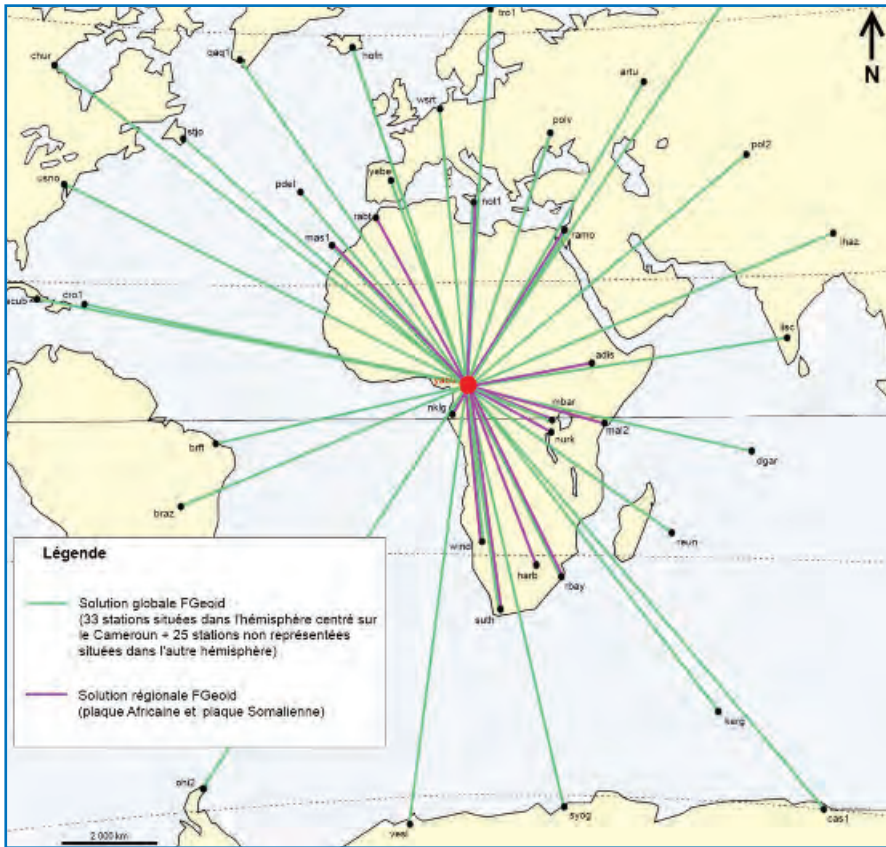


Figure 11. Schéma partiel du réseau de rattachement à l'IGS

(et non, par exemple, d'un sous-ensemble particulier, comme ça aurait été le cas pour mesurer des déformations locales en géophysique). Nous avons appliqué de fortes contraintes sur les 80 stations IGS de notre réseau de stabilisation et relâché les contraintes sur les satellites GPS ainsi que sur les paramètres d'orientation de la terre. Les coordonnées finales des points du réseau ont été déterminées en calculant une similitude spatiale à 6 paramètres – 3 translations et 3 rotations, mais pas de facteur d'échelle (voir à ce sujet Dong et al, 1998) – qui minimise les écarts entre les positions des stations IGS issues de notre solution et leurs homologues fournies par le centre de calcul ITRF.

Cette solution finale a été calculée en 4 itérations à partir des 58 stations IGS les plus cohérentes entre elles, dont 7 communes avec notre solution régionale (MAS1, MBAR, NKLK, NOT1, RAMO, SUTH, WIND).

Résultats

Nous avons généré les séries temporelles de toutes les solutions journalières calculées avec le module GLRED de GLOBK pour les 25 points de réfé-

rence afin d'analyser leur répétabilité. Les EMQ obtenues sont inférieures à 4,6 mm en planimétrie et 8,6 mm en hauteur, ce qui est acceptable étant donné les conditions d'acquisition (mise en station sur un trépied lesté, sessions perturbées par des pluies tropicales, période caractérisée par plusieurs éruptions solaires).

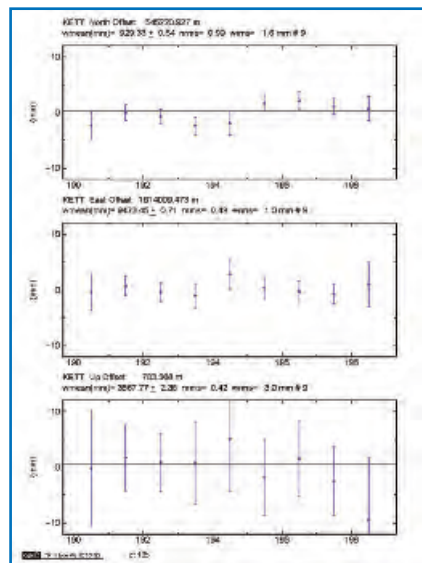


Figure 12. Exemple de série temporelle sur le point de Kette (9 jours) en Nord, Est et Hauteur. L'échelle verticale est de 10 mm.

Globk Analysis, GLOBK Version 5.16		
Position system stabilization results		
X Rotation (mas)	-0.15815 +-	0.01544
Y Rotation (mas)	1.64639 +-	0.01542
Z Rotation (mas)	-0.26548 +-	0.01699
X Translation (m)	-0.00283 +-	0.00046
Y Translation (m)	0.00475 +-	0.00046
Z Translation (m)	-0.00568 +-	0.00050
Postfit RMS = 0.00251 m		

Table 1. Résultat de l'adaptation GlobK-Glorg

La table 1 présente les paramètres de la similitude spatiale appliquée aux observations. L'EMQ a posteriori de cet ajustement final (2,5 mm) et les valeurs des résidus sur les stations IGS (inférieures à 12 mm) ont démontré la cohérence du réseau de rattachement.

L'examen de ces incertitudes permet de confirmer la précision légèrement moindre des points situés à la périphérie du réseau par rapport à celle des points situés au centre (Mbe, Tibati, Yoko, Yaoundé, Abong-Mbang).

La composition quadratique des précisions calculées, de la précision de l'adaptation globale et du systématisme du réseau global IGS par rapport à l'ITRF 2008 permet d'estimer une exactitude moyenne à 2-σ des points de référence dans le référentiel ITRF Epoque 2011,5 de 6,2 mm en planimétrie et 13,1 mm en hauteur.

Ces valeurs sont satisfaisantes et conformes à ce que l'on pouvait attendre compte tenu des conditions citées plus haut et de la situation géographique du réseau.

■ Calcul et ajustement du réseau de 2^e ordre

Méthode

Le calcul des vecteurs GPS reliant ces points entre eux et aux points de 1^{er} ordre a été effectué au moyen de deux logiciels distincts afin d'avoir deux solutions de calcul pour chacune des lignes de base retenues.

Le calcul principal a été effectué avec le logiciel TTC (*Trimble Total Control*), tandis que le calcul de contrôle était réalisé avec l'un des trois logiciels TGO (*Trimble Geomatics Office*), LGO (*Leica Geomatics Office*) ou TBC (*Trimble Business Center*).



La sélection des lignes de base GPS retenues a été opérée de telle sorte que :

- Les vecteurs soient les plus courts possibles.
- Les cheminements constitués des vecteurs reliant les points de base soient des polygones fermés reliant tous les points de référence de la session en deux ou trois boucles.
- La géométrie des polygones ainsi formés soit la plus équilibrée possible par rapport au triangle principal (ou au quadrilatère) formé des points de 1^{er} ordre.
- Les critères statistiques de qualité GPS et les différences entre les deux logiciels utilisés soient satisfaisants.
- Le nombre de vecteurs retenus pour chaque session soit limité par la règle d'indépendance (vecteurs non triviaux).

Au terme de cette sélection, les lignes de base retenues étaient validées au moyen d'un calcul de fermeture de boucles (vecteurs rigoureusement indépendants).

Enfin, les lignes de base validées ont été ajustées par moindres carrés sur les vingt-cinq (25) points de référence au moyen du logiciel GEOLAB, développé par BWI (Bitwise Ideas).

Cet ajustement a été réalisé par triangles (ou quadrilatères) en contraignant les points géodésiques de 1^{er} ordre à leurs coordonnées calculées précédemment dans le référentiel ITRF2008 Epoque 2011.5.

L'analyse des résidus de ces ajustements contraints a fourni un dernier contrôle du calcul.

Résultats

Les résultats des ajustements par moindres carrés des différents sous-réseaux ont été validés en examinant les paramètres suivants :

- Le facteur de Variance et le résultat du test du Chi carré (X^2).
- Les valeurs des résidus normalisés de l'ajustement ainsi que leurs valeurs absolues.

Les appoints sont restés millimétriques à centimétriques, les valeurs absolues les plus élevées n'excédant pas 5 cm, toujours sur la composante X_G (proche de la verticale). Au final, les incertitudes finales des coordonnées des points de 2^e ordre varient entre 4 mm et 12 mm en

Est et Nord, 5 mm et 15 mm en hauteur ellipsoïdale.

Surface de référence altimétrique

Problématique

Le cahier des charges prévoyait que les points du nouveau réseau géodésique national soient rattachés par nivellement géométrique à des repères de nivellement du NGAC situés à proximité. En pratique, la distance maximale de 1 km avait été retenue. Cependant, étant donné le déséquilibre de la géométrie des mailles de nivellement, le grand nombre prévisible de repères détruits (nivellement effectué par l'IGN français au début des années 1950) et les contraintes sur la position des points du réseau géodésique, ce nivellement ne pouvait être réalisé que pour un petit nombre de ces points.

Aussi avait-il été prévu que les altitudes orthométriques des points du nouveau réseau géodésique soient déterminées à partir de leurs hauteurs ellipsoïdales et des ondulations d'un modèle de géoïde homogène avec le référentiel NGAC. La modélisation d'une telle surface de correction altimétrique présentait également l'avantage d'éliminer les erreurs liées à une possible altitude erronée de certains repères de nivellement compte tenu de leur âge (près de 60 ans).

Pour améliorer la modélisation de cette surface, nous avons intégré au réseau 115 points GPS temporaires situés à proximité d'un repère de nivellement, portant ainsi à 145 le nombre de points GPS nivelés.

Méthode

De nombreux auteurs (Doerflinger, 1997, Nocquet et al. 2000) ont montré qu'un géoïde géométrique (déterminé à partir de seuls points GPS nivelés) ne permettait pas de rendre les anomalies de courte et moyenne longueurs d'onde du géoïde. L'utilisation de données complémentaires (modèle de champ global, mesures gravimétriques, modèle numérique de terrain) est fortement recommandée.

Une approche en deux étapes est souvent proposée. Certains auteurs (Jiang

et al. 1996) ont montré qu'un modèle de surface altimétrique pertinent consistait à utiliser un modèle de géoïde gravimétrique déterminé au cours d'une première étape pour effectuer une interpolation entre les points GPS nivelés.

Dans cette hypothèse, la détermination du modèle de géoïde requis résulte donc de deux éléments :

- L'élaboration d'un modèle de géoïde gravimétrique ou la sélection d'un modèle parmi les grilles existantes.
- Le choix d'une méthodologie d'adaptation du modèle retenu à la réalisation du référentiel NGAC que constituent les points GPS nivelés.

Le terme géoïde ne doit pas ici être pris dans son acception rigoureuse. Ainsi, la surface de correction calculée ne corrige pas nécessairement le modèle de géoïde gravimétrique dans le sens d'une plus grande précision mais plutôt pour le faire correspondre au mieux avec la réalisation du NGAC sur le territoire camerounais, considérée comme suffisamment fiable.

■ Modèles de géoïde existants

Au Cameroun, deux modèles de géoïde gravimétrique utilisables a priori ont été identifiés : CGM2005 (*Cameroon Geoid Model 2005*) et EGM2008 (*Earth Gravitational Model 2008*).

Le modèle AGP2003 (*African Geoid Project 2003*), ou sa révision de 2006, a été estimé redondant avec CGM05.

CGM05

Le modèle CGM05 a été développé en 2005 au sein du LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'IGN) par J. Kamguia, chargé de recherche à l'INC. L'étude de l'article de synthèse de ces travaux (Kamguia et al, 2007) permet de pointer un certain nombre d'éléments susceptibles de remettre en cause le choix de cette grille comme modèle gravimétrique de référence :

- Le modèle global EGM96 utilisé en référence (même s'il a été en partie combiné avec GGM02C) a une précision annoncée très inférieure à celle de l'EGM08. En outre, il semble qu'il modélise mal les variations de gravité sur le continent Africain (Mery, 2003).
- Le MNT GLOBE utilisé pour déterminer les anomalies de petite longueur





d'onde est, semble-t-il, peu représentatif de la topographie sur ce continent (Mery, 2003). L'auteur lui-même recommande que le CGM05 soit recalculé en utilisant les données de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, 2001).

- Plus problématique, la validation du modèle CGM05 a été effectuée en utilisant un réseau de 87 points GPS nivelés tous situés dans la seule zone de Douala.

Même si l'écart-type des différences a été jugé encourageant (11 cm après adaptation), il nous a semblé que la surface réduite de la zone de test en atténuait fortement la portée. D'ailleurs, la méthode d'adaptation choisie n'était effectivement réellement applicable que sur une petite surface.

EGM2008

EGM2008 (ou EGM08, *Earth Gravitational Model 2008*) est un modèle du potentiel de gravité développé par l'US National Spatial Intelligence Agency en combinant par moindres carrés le modèle global ITG-GRACE03S avec les données de gravité d'une grille mondiale de pas 5'. Cette grille a été obtenue en fusionnant les données de gravimétrie terrestre, aéroportée et dérivée de mesures d'altimétrie.

Par rapport à EGM96 auquel il succède, EGM08 représente une amélioration d'un facteur 6 en résolution, et 3 à 6 en précision en fonction des régions. Fourni avec une résolution d'environ 9 km et une précision mondiale annoncée de 15 cm à 1- σ (18.3 cm d'après Pavlis et al., 2008), le modèle de gravité EGM08 est le modèle global le plus utilisé en 2011. Il a été validé dans de nombreux pays au moyen de réseaux de points GPS nivelés. Dans les zones où les données de gravité étaient de très bonne qualité, cette précision atteint 5 à 10 cm (après avoir supprimé systématisme et tendance linéaire), ce qui lui confère un statut comparable à celui de certains modèles de géoïde régionaux actuels.

Cependant, d'après Pavlis, le Cameroun fait partie des zones dans lesquelles les anomalies de gravité sont issues de "remplissage" (*fill-in*) parce que les

données de gravité n'étaient pas dans le domaine public (*proprietary data*). La procédure de remplissage utilise les anomalies de gravité de Bouguer, et reconstitue les anomalies à l'air libre en utilisant les altitudes du MNT mondial DTM2006, principalement issu de la mission SRTM. Aussi, la précision probable d'EGM08 au Cameroun est-elle sans doute plus proche des 18,3 cm annoncés par Pavlis.

Validation des points GPS nivelés retenus

Sur la carte des ondulations du modèle EGM08 (dont la précision est connue), nous avons fait apparaître les 145 points GPS nivelés avec les écarts bruts entre leur ondulation EGM08 et leur ondulation GPS nivelé.

La carte a fait apparaître une bonne homogénéité des écarts entre les deux types d'ondulation dans les différentes zones malgré quelques couples de points proches avec des écarts légèrement différents. 15 points aberrants ont été éliminés. L'un des points (écart de 46 cm) a donné lieu à une étude plus fine, mais a finalement été conservé car situé au centre d'une zone d'anomalies cohérentes (21, 25, 26, et 33 cm au nord, 14, 19, 24 cm au sud), dans une zone d'affleurement du socle (plateau de l'Adamaoua), et associé à un repère de nivellement proche fixé sur le mur d'un bâtiment administratif en parfait état.

Au final, 130 points GPS nivelés ont ainsi été retenus.

Choix du modèle de géoïde gravimétrique

Pour effectuer ce choix, nous avons comparé les différences entre les ondulations des modèles EGM08 et GPS nivelé corrigées de la moyenne de leurs écarts respectifs (systématisme) avec les différences entre les ondulations des modèles CGM05 et GPS nivelé à encore corrigées de la moyenne de leurs écarts respectifs (systématisme). Cette analyse a clairement fait apparaître la cohérence entre le GPS nivelé et l'EGM08, avec une répartition normale des écarts. L'écart-type est de 18 cm et confirme donc la précision annoncée du modèle. On peut également noter que tous les écarts sont inférieurs à 3.5 fois l'écart-type.

Point GPS nivelé	Différence des ondulations EGM08-GPS Nivelé corrigées de la moyenne des écarts (mètres)	Différence des ondulations CGM05-GPS Nivelé corrigées de la moyenne des écarts (mètres)	Différence des ondulations EGM08-CGM05 corrigées de la moyenne des écarts (mètres)
Abong-Mbang_RN	0,09	0,53	-0,44
Akonolinga_RN_Po	0,04	1,23	-1,19
Ambam_RN_Ss-pref	-0,21	-0,73	0,52
Ayos_RN_PTT	0,09	1,02	-0,92
Bafia_RN_Meteo	-0,18	0,09	-0,27
Batouri_RN_Aero	-0,01	-0,36	0,35
Batouri_RN_Ctr	-0,02	-0,38	0,37
Batouri_RN_Ss-pref	-0,03	-0,40	0,37
Beka_RN33	0,36	-0,02	0,38
Belaba_RN15	0,22	0,11	0,11
Bertoua_III_RN	0,10	-0,16	0,25
Bogo_RN47	-0,07	-0,50	0,43
Bongolo_RN	-0,11	0,44	-0,55
Campo_RN	-0,09	-0,12	0,02
Doume_RN63	0,02	-0,21	0,22
Doume_RN64	-0,03	-0,26	0,23
Dourbeye_RN	0,18	-0,09	0,27
Ebolowa_RN17	-0,25	0,70	-0,89
Efoulan_RN	-0,05	0,50	-0,54

Table 2. Extrait du tableau de comparaison entre CGM05 et EGM08

L'analyse fait clairement apparaître la moins bonne cohérence du modèle CGM05. L'écart-type excède 55 cm, donc très au-delà de la précision annoncée (11 cm) au vu de comparaisons effectuées sur la seule zone autour de Douala. Nous fournissons dans la table 2 un extrait de cette comparaison.

Nous avons donc sélectionné le modèle géopotential EGM08 et abandonné le modèle CGM05.

Choix d'une méthodologie d'adaptation

Trois méthodologies au moins pouvaient être envisagées a priori : krigage ordinaire (KO), collocation par moindres carrés (CMC) ou cokrigage.

Dans les deux premières méthodes, les quasi-observations qui doivent être modélisées sont en fait les différences d'ondulations géoïdales (entre EGM08 et GPS nivelé). Le modèle interpolé doit ensuite être ajouté à la grille EGM08. Lorsque CMC est utilisée, EGM08 doit d'abord être transformé en enlevant les éventuels systématismes et tendance entre les deux jeux de données de sorte que l'hypothèse de moyenne nulle nécessaire à l'application de la méthode soit respectée.

Dans la troisième méthode, le modèle principal est constitué des ondulations géoïdales des points GPS nivelés et le modèle secondaire les ondulations géoïdales de EGM08.



Après avoir testé les différentes possibilités, le modèle interpolé des écarts d'ondulations entre les géoïdes gravimétrique et géométrique optimal a été obtenu par krigeage ordinaire appliqué avec une fenêtre glissante et lissé au moyen d'une fonction multiquadratique inverse. Cette grille a ensuite été sommée à la grille EGM2008 pour fournir la surface de correction altimétrique CGM11 (Cameroon Geoid Model 2011). Cette analyse a été effectuée avec le logiciel ArcGIS – Geospatial / Geostatistical Analyst (ESRI).

Les altitudes orthométriques NGAC de l'ensemble des points du réseau ont ensuite été calculées par soustraction des ondulations de la grille CGM11 des hauteurs ellipsoïdales (ITRF2008 Epoque 2011.5, ellipsoïde GRS-80) de ces points. La carte présentée *figure 13* montre à la fois les écarts (en grands caractères) sur les 130 points GPS nivelés entre les ondulations issues du GPS nivelé et les ondulations EGM08, les courbes de niveau de la surface obtenue par krigeage ordinaire lissé de ces écarts, et enfin les écarts sur les 535 points du

réseau entre la solution CGM11 finale et l'application du seul modèle EGM08 (écarts en petits caractères). L'examen de la répartition géospatiale de ces écarts a permis de valider la nouvelle grille CGM11.

Cette carte permet de mesurer l'influence des points GPS nivelés. La grille CGM11 semble acceptable dans toutes les zones. Les zones les plus incertaines sont certainement le bassin du Faro dans l'Ouest des régions Adamaoua et Nord et toute la partie orientale de la région Nord. Signalons que cette bande, située à la frontière des régions Adamaoua et Nord n'est correctement pourvue en repères de nivellement qu'en son centre.

Les solutions obtenues par CMC et cokrigeage se sont avérées nettement inférieures. Ce résultat ne remet pas forcément en cause le bien-fondé de ces deux méthodes mais plutôt les paramètres utilisés dont la plupart procèdent d'une analyse empirique de la structure géospatiale des données. En effet, il est apparu que la difficulté de cette interpolation était due à la très grande hétérogénéité de la répartition des points GPS nivelés avec une absence totale de points dans un certain nombre de zones.

La précision de la nouvelle grille CGM11 est estimée entre 10 et 20 cm selon les zones, en fonction de la densité des points GPS nivelés et de la pente locale du géoïde. Cette grille pourrait cependant être améliorée avec une campagne de nivellement et gravimétrie.

Conclusion

Le nouveau réseau géodésique du Cameroun a été réalisé avec des spécifications qui sont allées au-delà du cahier des charges et dans les délais, de janvier à décembre 2011.

25 bornes de 1^{er} ordre et 510 bornes et repères scellés de 2^e ordre ont été établis à travers le territoire. Les coordonnées planimétriques de ces points ont été déterminées dans un référentiel homogène avec l'ITRS, et leurs altitudes dans le référentiel NGAC en vigueur.

Par ailleurs, une nouvelle grille de correction altimétrique utilisable pour déterminer des altitudes au-dessus du

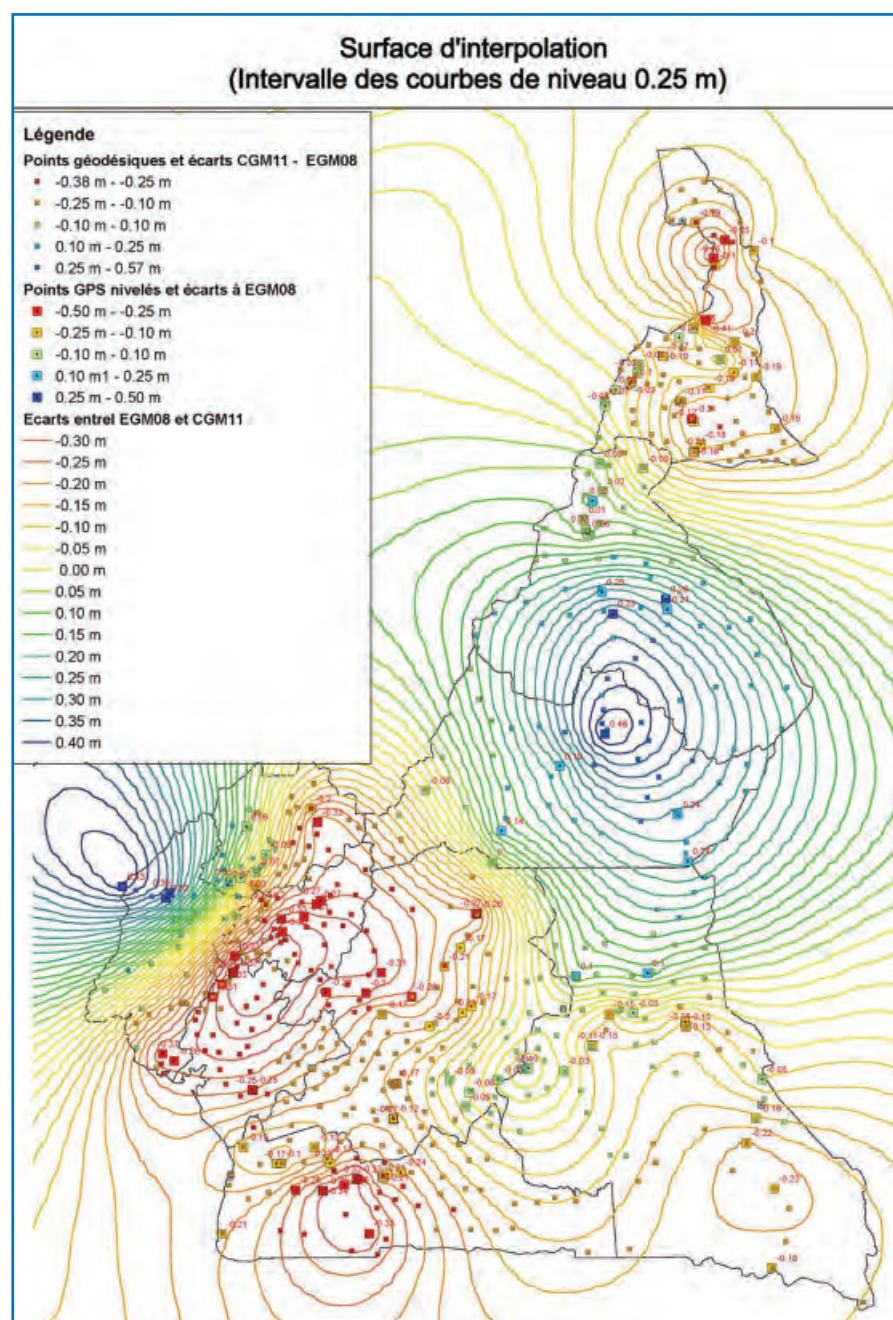


Figure 13. Surface d'interpolation des différences d'ondulations entre EGM08 et Points GPS nivelés





niveau moyen de la mer dans le référentiel NGAC à partir de mesures GPS a été déterminée. ●

Contacts

Jean-Louis CARME

Directeur technique de FUGRO GEOID

jl.carme@fugro.com

s.lacombe@fugro.com

c.michel@fugro.com

Bibliographie

Doerflinger E, Jiang Z, Duquenne H, Bayer R, Determination of the quasi-geoid in a Mountainous area : example of the

eastern pyrenees (France), International Association of Geodesy Symposia, vol 117: Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Springer-Verlag, 1997.

Doerflinger E, Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues, Thèse de doctorat. - Université des Sciences et des Techniques, Montpellier, 1997*

Gribov A, Krivoruchko K, Mathematical Geology, Volume 36, Number 2, February 2004

Herring TA, King RW, McClusky SC, Gamit reference manual, release 10.4, October 2010

Herring TA, King RW, McClusky SC, GlobK reference manual, release 10.4, December 2010

IGN France – Service de la Géodésie et du Nivellement, Etude du Système géodésique adapté au Cameroun, Mars 2007

Kamguia J, Tabod CT, Nouayou R, Tadjou JM, Manguelle-Dicoum E, Kande HL, The Local Geoid Model of Cameroon: CGM05, Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research, Vol. 4, Nb. 2, 2007

Merry CL, The African Geoid Project and its relevance to the unification of African vertical reference frames. Proceedings, 2nd Regional Conference of the Fédération Internationale des Géomètres, Marrakech, Morocco, December 2003

Nocquet JM, Duquenne H, Boucher C, Harmel A, Willis P, Conversion altimétrique RGF93-IGN69, Conseil National de l'Information Géographique, Groupe de travail permanent Positionnement statique et dynamique, Février 2000

Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK (2008) An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April

(*) On peut noter que cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un contrat de collaboration entre le laboratoire de Géophysique et Tectonique UMR5573 (CNRS et Université de Montpellier II) et la société FUGRO GEOID.

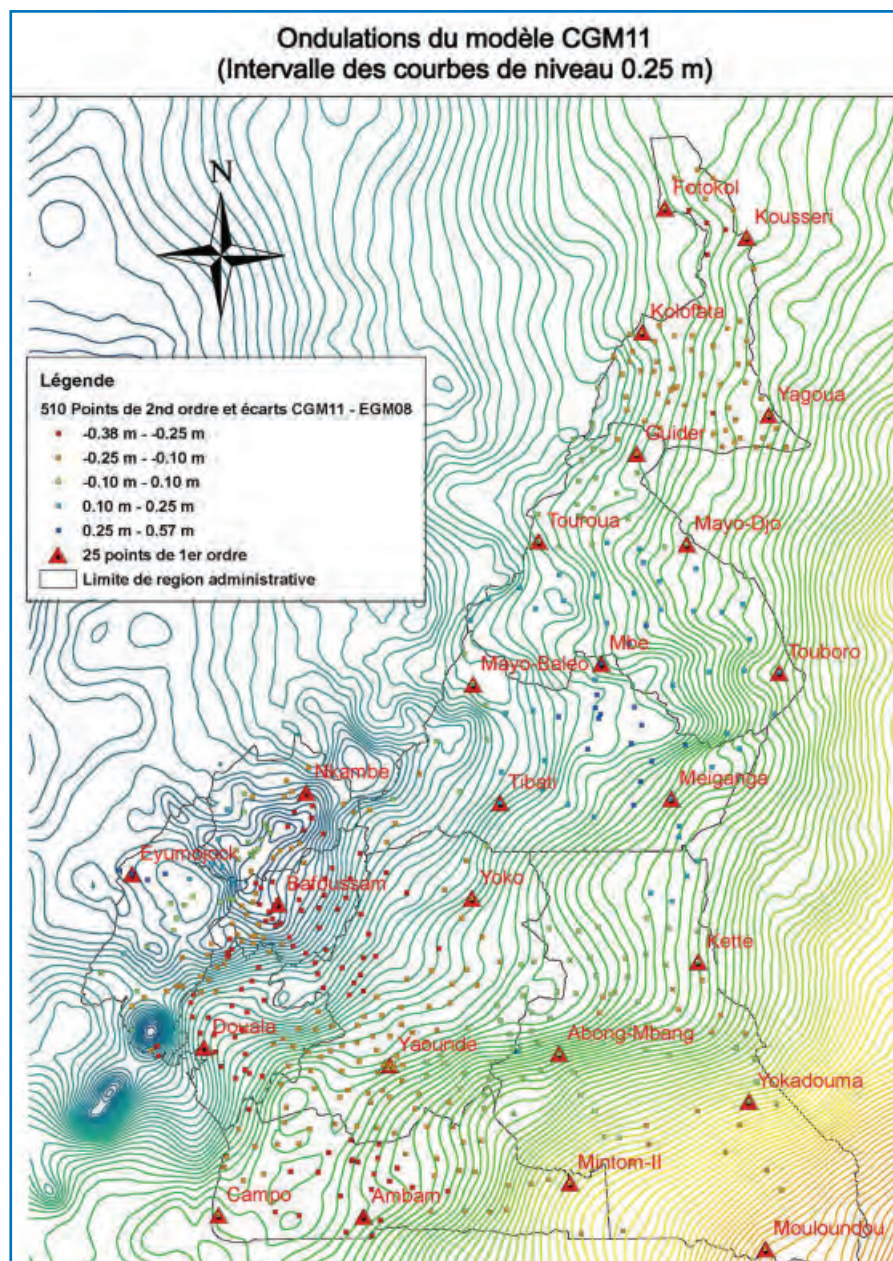


Figure 14. Modèle de géoïde CGM11 (surface de correction altimétrique vers NGAC)

ABSTRACT

This paper presents the establishment of the new Cameroon national geodetic network carried out by FUGRO GEOID during year 2011. After a description of the project's main stages, the text focuses on the methods implemented for data processing.

So, we examine the processing and geodetic referencing of the 25 First Order network points with respect to the International GNSS Service (IGS) Core Network, the processing and piece-wise least squares adjustment of the 510 Second Order network points, and finally the determination of a new height correction surface (CGM11: Cameroon Geoid Model 2011), developed by fitting of the EGM2008 global model to a network of 130 GPS levelled point distributed through the whole territory. In the future, the CGM11 grid will allow deriving heights above Mean Sea Level in the NGAC height datum (Nivellement Général de l'Afrique Centrale, used in Cameroon) from GPS-measured points within the territory.