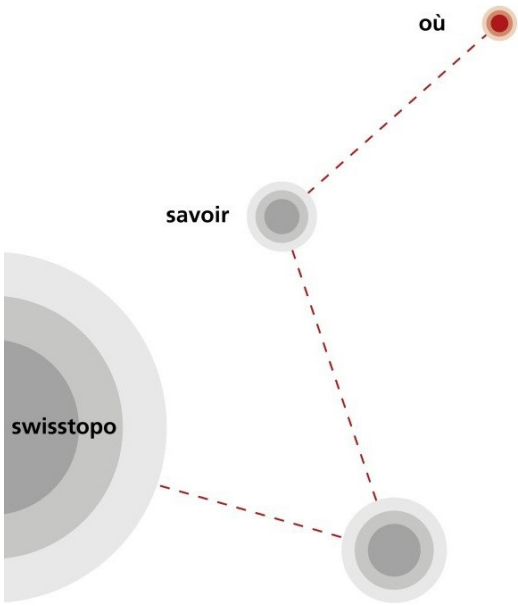
Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95'

14ème partie



Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004»

Urs Marti

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Landestopografie swisstopo
Office fédéral de topographie swisstopo
Ufficio federale di topografia swisstopo
Uffizi federal da topografia swisstopo
Federal Office of Topography swisstopo

www.swisstopo.ch

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de la défense,
de la protection de la population et des sports DDPS

Office fédéral de topographie swisstopo

Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95'

Rapport 22 f
2016

Urs Marti

14ème partie:
Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004»

2016

© 2016 **swisstopo**
Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia
Federal Office of Topography
Seftigenstrasse 264
3084 Wabern

Rédaction supervisée par A. Wiget
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
Tél: +41 31 963 24 69
Fax: +41 31 963 24 59
Courriel: adrian.wiget@swisstopo.ch

ISBN 978-3-302-10005-0

---

swisstopo Doku ist die Nachfolgeserie der Reihe "Berichte aus der L+T" in welcher über die wichtigen Arbeiten aus den Bereichen von swisstopo berichtet wird.

swisstopo Doku est la série qui succède aux «Berichte aus der L+T», lesquels décrivent les projets et activités les plus importants de swisstopo.

swisstopo Doku is the follow-up of the series "Berichte aus der L+T" in which important projects and activities of swisstopo are described.

Table des matières

1 Introduction 1
1.1 Calcul de CHGeo98 1
1.2 Les raisons d'un nouveau calcul 1
2 Les mesures utilisées 3
2.1 Mesures astro-géodésiques 3
2.2 Données GPS-nivellement 4
2.2.1 Nivellement 4
2.2.2 GPS 5
2.2.3 GPS-nivellement 6
2.3 Données gravimétriques 8
2.4 Points GPS-nivellement synthétiques dans les zones frontalières 9
2.5 Vue d'ensemble des données utilisées 9
3 Modèles de masse 11
3.1 Modèle numérique de terrain 11
3.2 Autres modèles de masse 14
3.3 Le modèle de référence global EGM96 15
4 Réduction des observations 16
4.1 Remarque concernant le système de référence 16
4.2 Réduction du modèle global 16
4.3 Réduction de l'influence de la topographie 16
4.4 Influence des autres modèles de masse 17
4.5 Réduction de l'effet de la pesanteur résiduelle 17
4.6 Représentation de la réduction des déviations de la verticale 18
4.7 Réduction des données GPS-nivellement 20
4.8 Réduction des données gravimétriques 22
5 Prédiction du cogéoïde 23
5.1 Méthode de calcul 23
5.2 Calculs des variantes 23
5.3 Précision des solutions prédites 29
5.4 La solution définitive retenue pour le cogéoïde 31
5.5 Les résidus des observations 31
6 Calcul du géoïde et du quasi-géoïde 34
7 Comparaison avec CHGeo98 38
8 Les résidus GPS-nivellement 39
9 La surface de conversion altimétrique HTRANS 42
9.1 Description succincte 42
9.2 CHGeo2004/HTRANS 43
10 Comparaison de CHGeo2004 avec d'autres modèles 44
10.1 Comparaison avec le modèle de géoïde européen 44
10.2 Comparaison avec le modèle de géoïde global EGM2008 46

11 Logiciels de calcul 49
11.1 Programmes pour le calcul du modèle de géoïde 49
11.2 Programmes pour les utilisateurs finaux 49
12 Travaux postérieurs à l'achèvement de CHGeo2004 52
12.1 Extension du périmètre 52
12.2 Points GPS-nivellement supplémentaires 52
12.3 Travaux effectués pour le tunnel de base du Saint-Gothard 53
12.4 Travaux réalisés au col du Susten 54
12.5 Détermination du géoïde en Basse-Engadine 55
13 Résumé et perspectives 56
Bibliographie 58

Annexe
A1 Récapitulatif des points GPS-nivellement utilisés

1 Introduction

1.1 Calcul de CHGeo98

Le modèle de géoïde national CHGeo98 [Marti, 1997, Marti, 1998 et Marti, 2002a] reposait très fortement sur les observations astro-géodésiques de déviations de la verticale, complétées par des observations de GPS-nivellement. Les mesures gravimétriques n'ont pas été utilisées directement en tant qu'observations, elles n'ont servi qu'à réduire les autres types d'observations au niveau de la mer que de façon indirecte. Le MNT25 (level 1) et le DTED (level 1) – dans les zones frontalières des pays limitrophes – ont été utilisés pour le modèle de masse topographique. D'autres modèles de masse ont été pris en compte dans le calcul, à savoir ceux modélisant le Moho, le corps d'Ivrea, les sédiments, les masses d'eau des lacs ainsi que celles du glacier d'Aletsch. La précision estimée du géoïde CHGeo98 était de 3 à 5 cm pour l'ensemble de la Suisse. Il a été diffusé sous la forme d'une grille régulière (résolution de 1 km) et s'est largement répandu auprès des utilisateurs du GPS en Suisse. Les déviations de la verticale à la surface de la topographie étaient calculées à l'aide du logiciel GEOLOT98.

Au total, ce sont 1041 composantes de déviations de la verticale et 72 observations de GPS-nivellement (anomalies d'altitude) qui ont été introduits comme observations dans le calcul d'ajustement de CHGeo98.

Deux problèmes ont été rencontrés lors de la détermination de CHGeo98 : 1) l'exploitation encore incomplète de RAN95 (réseau altimétrique national 1995, [Schlatter, 2007]) à cette époque et 2) le fait que les données GPS des campagnes MN95 initiales de 1989 à 1996 ont dû être utilisées. Une précision réduite des données GPS-nivellement utilisées en a résulté. En outre, ces dernières étaient parfois très éloignées les unes des autres, ce qui compliquait leur contrôle.

Aucun modèle geopotentiel de référence global n'a été utilisé pour le calcul de CHGeo98, de sorte que la précision des réductions au niveau de la mer peut être mis en doute.

1.2 Les raisons d'un nouveau calcul

Le remplacement du modèle de géoïde CHGeo98 par une version révisée CHGeo2004 est principalement dû aux incohérences persistantes entre les altitudes orthométriques issues de RAN95 (nivellement et gravimétrie) et celles provenant de mesures GPS combinées au modèle de géoïde CHGeo98. Les écarts (cf. Figure 1-1) présentent un caractère relativement systématique. Leur ordre de grandeur étant de quelques centimètres, et au maximum 20 cm sur le point Ramosch en Basse-Engadine. Ce dernier ne fut d'ailleurs pas utilisé pour la détermination de CHGeo98 car il fut considéré être entaché d'une faute grossière.

C'est donc en constatant l'ampleur de ces résidus que l'on décida de déterminer un nouveau modèle de géoïde assurant la cohérence entre le GPS (MN95) et le nivellement (RAN95) [Schneider et al. 2002]. Cet objectif devait être atteint grâce notamment à une densification du réseau GPS-nivellement (Swiss Combined Geodetic Network, CH-CGN). Une campagne de rattachement fut donc organisée en 2003, durant laquelle près de 40 rattachements GPS et RAN95 devaient être déterminés [Schlatter et al. 2005, Brockmann 2003]. Ces points furent sélectionnés de manière à couvrir les secteurs problématiques du modèle CHGeo98 (col du Susten, Basse-Engadine) ainsi qu'à combler les régions dont la densité des observations était encore faible (Grisons, Valais). De plus, les points situés à l'extrémité de cheminements de nivellement ouverts (généralement à proximité de la frontière nationale) devaient également faire l'objet d'une détermination. De surcroît, des observations supplémentaires de GPS-nivellement résultèrent du rattachement de stations AGNES et MN95 au nivellement fédéral [Schlatter et al. 2003].

L'intégration des observations issues des campagnes GPS CHTRF98 et CHTRF2004 ainsi que des nouvelles altitudes orthométriques provenant de l'ajustement complet de RAN95 devait également permettre une amélioration du modèle de géoïde.

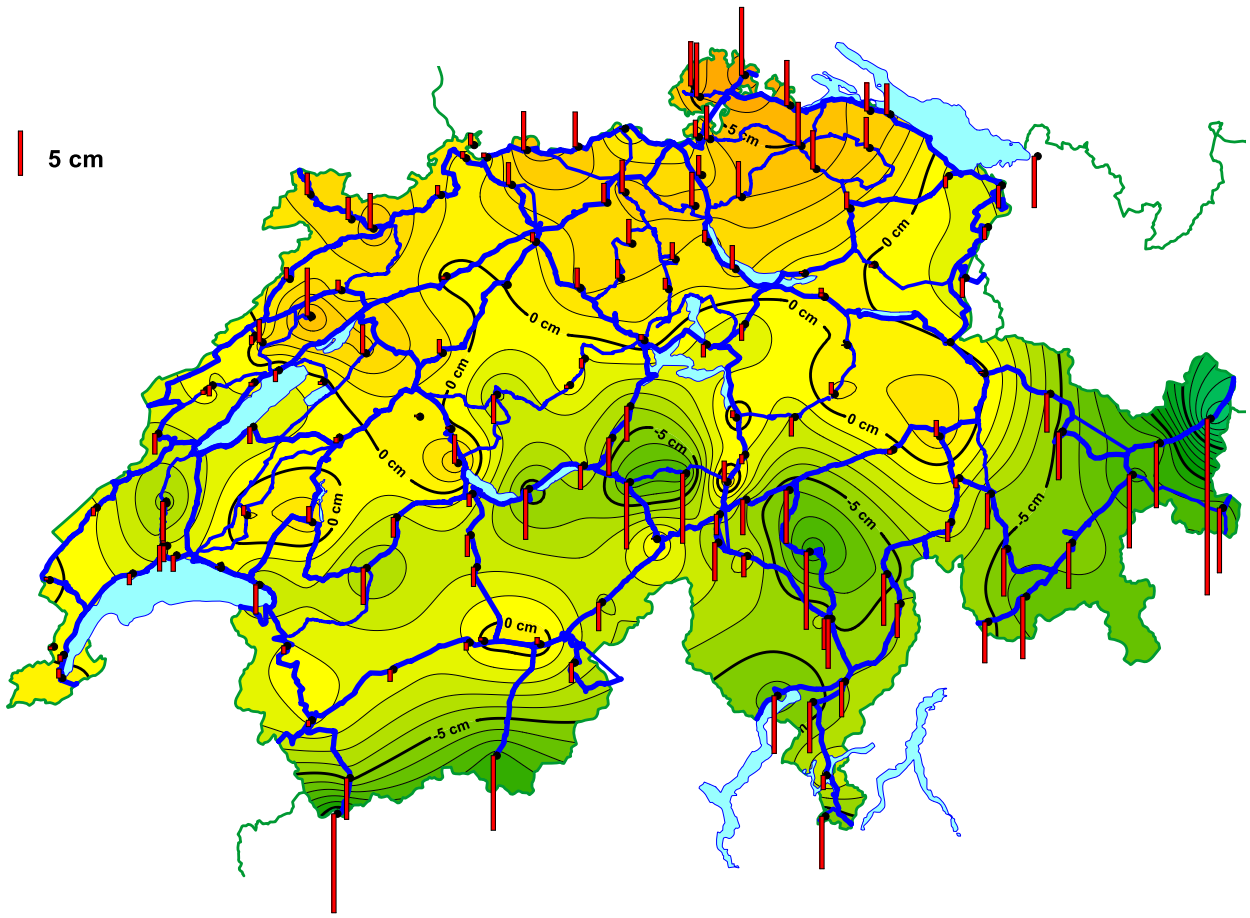


Figure 1-1: Résidus GPS-nivellement avec CHGeo98 (état en 2002)

En plus des nouvelles mesures de GPS-nivellement, de nouvelles mesures de déviations de la verticale ont été planifiées. Les deux nouvelles caméras zénithales numériques de l'ETH Zurich (DIADEM) et de la TU Hannover (TZK-2D) ont ainsi permis de déterminer plus de 60 nouvelles stations en l'espace d'un mois, avec une précision d'environ 0.1 seconde d'arc [Marti et al. 2004]. L'emplacement de ces stations ont été choisies dans des régions problématiques de CHGeo98 ainsi que dans des zones qui n'étaient que couvertes par d'anciennes mesures astro-géodésiques (antérieures à 1980), comme les rives du lac de Constance ou dans l'Oberland bernois. En effet, certaines de ces anciennes mesures étaient soupçonnées d'être entachées par des erreurs systématiques pouvant provoquer des erreurs systématiques dans le calcul du géoïde.

En plus de l'intégration de nouvelles mesures décrites ci-dessus, le nouveau modèle du géoïde pourrait également être amélioré grâce à l'intégration des données gravimétriques, à l'utilisation des nouveaux modèles numériques de terrain, à l'intégration d'un modèle global du champ de pesanteur terrestre (EGM96) ainsi qu'au perfectionnement des méthodes de calcul.

2 Les mesures utilisées

2.1 Mesures astro-géodésiques

Toutes les mesures astro-géodésiques utilisées pour le calcul de CHGeo98 ont été intégrées aussi dans le calcul de CHGeo2004. De plus, les déviations de la verticale déterminées en octobre 2003 avec les caméras zénithales numériques de l'ETH Zurich (DIADEM) et de la TU Hannover (TZK-2D) sont venues s'y ajouter. A ceci s'ajoute encore quelques anciennes stations situées à l'étranger qui n'avaient pas été pris en compte pour le calcul de CHGeo98 en raison de leur éloignement de de la frontière suisse. Une vue d'ensemble des mesures de la déviation de la verticale disponibles est présenté sur la Figure 2-1. La liste détaillée des nouvelles stations de déviation de la verticale est fournie dans [Marti et al. 2004]. Des mesures de comparaison répétées effectuées sur des points identiques avec les deux nouvelles caméras ont démontré que la précision des déviations de la verticale obtenues avec ces dernières était de l'ordre de 0,1". Il s'agit d'un gain considérable par rapport aux caméras zénithales de l'ancienne génération (précision de 0,3" à 0,5").

Dans l'optique du traitement des données les coordonnées géodésiques ont tout d'abord été calculées en MN95 et en ETRF93. Aucune altitude précise n'a été déterminée pour les points mesurés lors de la campagne 2003. Ce sont les altitudes interpolées sur le modèle numérique de terrain MNT25 qui ont été utilisées dans tous les calculs. Les coordonnées astronomiques sont stockées dans un fichier séparé. Les déviations de la verticale ont été calculées à partir de ces deux fichiers avec le programme «lotabw», sans tenir compte de la convergence des méridiens.

Toutes les déviations de la verticale ont été transformées en ETRS89 avant la suite du traitement. Leur erreurs moyennes a priori ont été fixées à 0,5" (mesures classiques), 0,3" (données des caméras zénithales analogues) et 0,1" (données des caméras zénithales numériques), respectivement. Néanmoins, pour plusieurs stations, des écarts-types individuels (généralement plus mauvais) ont été assignés lorsque les résultats des traitements originaux l'indiquaient. Certaines mesures ont été éliminées des calculs ultérieurs.

Pour le calcul de CHGeo2004, on disposait de 697 stations de déviation de la verticale et au total, 1275 composantes ont été utilisées dans le calcul du géoïde.

L'existence initialement présumée d'un écart systématique significatif entre les plus anciennes mesures et les mesures plus récentes réalisées au moyen de caméras zénithales n'a pas pu être confirmée. En règle générale, les nouvelles mesures s'insèrent bien dans le canevas existant. Les causes possibles de la divergence présumée auraient pu provenir de l'utilisation de catalogues d'étoiles différents dont les systèmes de référence diffèrent, ou de la prise en compte ou non des mouvements du pôle.

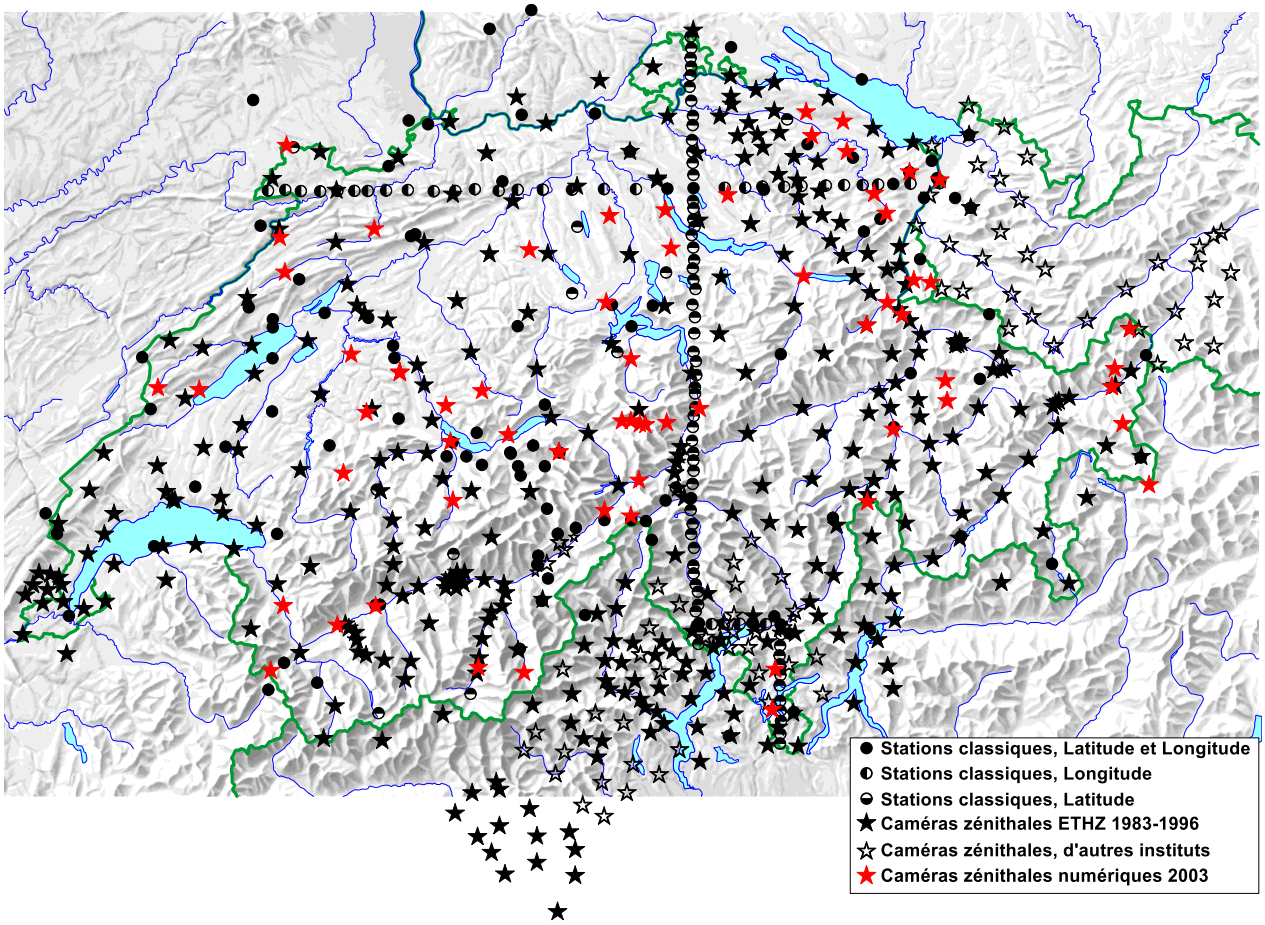


Figure 2-1: Déviations de la verticale pour CHGeo2004 avec les nouvelles mesures de 2003 en rouge

2.2 Données GPS-nivellement

Pour le calcul du géoïde CHGeo98, parmi tous les points potentiellement disponibles, seulement 72 mesures de GPS-nivellement ont été utilisées. Les autres points déjà disponibles à l'époque n'avaient pas pu être pris en compte en raison de l'exploitation alors incomplète de RAN95. Un écart-type de 3 cm avait été introduit dans le calcul final de CHGeo98 pour une observation de GPS-nivellement.

2.2.1 Nivellement

Une première compensation globale du réseau altimétrique national RAN95, comprenant l'intégralité des mesures réalisées pour le nivellement fédéral jusqu'en 2004 (année 2004 incluse), a pu être utilisée pour CHGeo2004. Cette solution baptisée RCM0406 a ensuite constitué la base de la détermination définitive de RAN95 et se rapporte à l'époque de référence 1993. Elle est décrite en détail dans [Schlatter, 2007]. Les différences entre la solution définitive RAN95 et la compensation provisoire utilisée pour CHGeo98 sont présentées sur la Figure 2-2. Elles sont inférieures à 1 cm pour la plus grande partie de la Suisse, mais des systématismes apparaissent dans certains secteurs, comme au Tessin. Le fort écart constaté au col du Saint-Gothard s'explique par un affaissement du point dû à la construction du tunnel routier.

Le calcul du géoïde CHGeo2004 s'est fondé sur les valeurs du potentiel initialement calculées dans RAN95. Elles ont été converties en altitudes normales pour la suite du traitement (en les divisant par la pesanteur normale moyenne le long de la verticale). La pesanteur normale moyenne dépendant à son tour de l'altitude normale, un processus itératif est requis, faisant intervenir les programmes QUAWIRK et POTHOE. Trois itérations suffisent à obtenir des altitudes normales rigoureuses. Des altitudes orthométriques ont également été calculées pour tous les points. Elles ont uniquement servi à titre de contrôle et pour quelques calculs de comparaison.

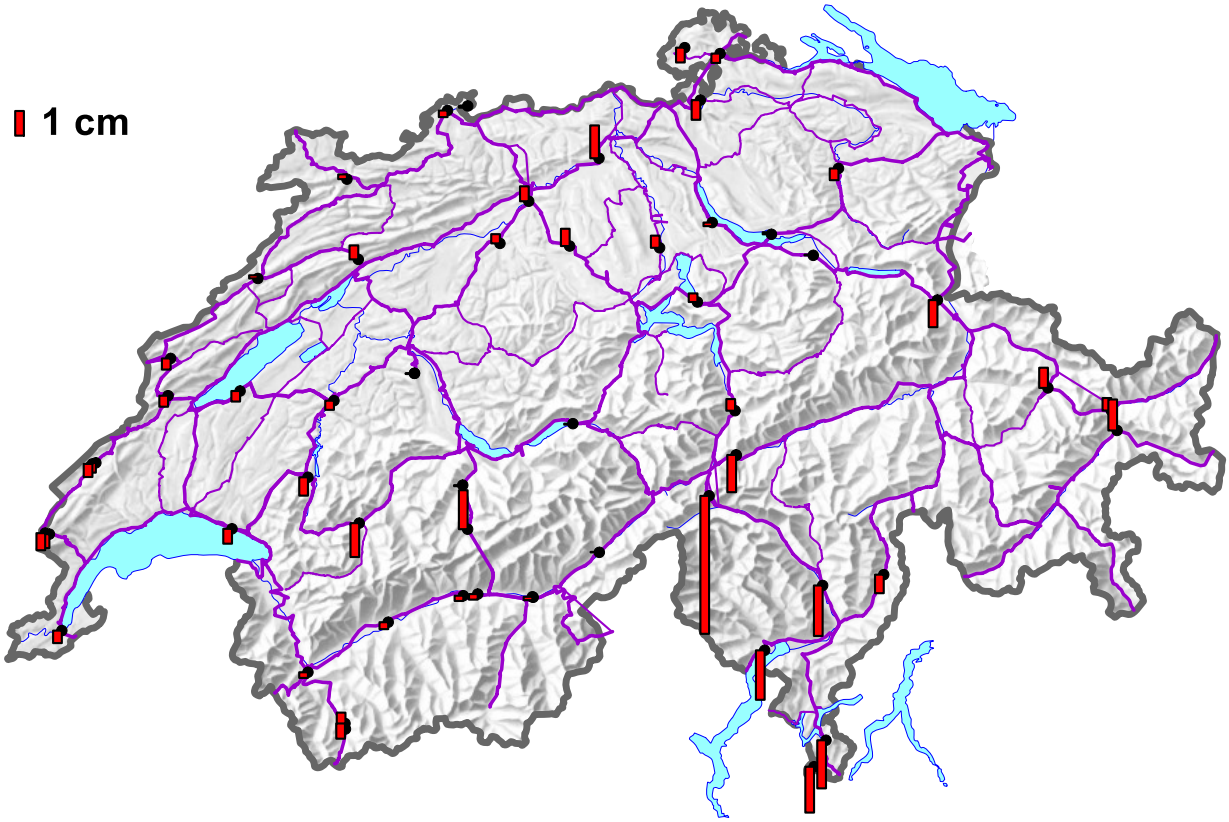


Figure 2-2: Différences entre les altitudes orthométriques définitives (RAN95) et la solution utilisée dans CHGeo98 sur les points d'appui du calcul de CHGeo98 (issu de [Schlatter 2007])

2.2.2 GPS

Il fut décidé d'attendre l'exploitation définitive de la campagne de mesure GPS CHTRF2004 (solution CH_COMBI.ED_EF_04b) avant de procéder au calcul final du modèle de géoïde CHGeo2004. Ceci, afin que les meilleures altitudes GPS puissent être utilisées. Les différences entre les altitudes GPS ellipsoïdales utilisées dans les calculs de CHGeo98 et CHGeo2004 sont représentées sur la Figure 2-3. Les écarts varient entre -5 et +7 cm et diffèrent grosso modo selon un plan incliné dans la direction nord-sud. De telles valeurs sont assurément significatives pour le nouveau calcul du géoïde. Néanmoins, elles ne peuvent toutefois rendre compte que d'une petite partie des résidus GPS-nivellement issus du calcul de CHGeo98. La solution GPS utilisée pour CHTRF2004, était encore statique, sans estimation des vitesses verticales.

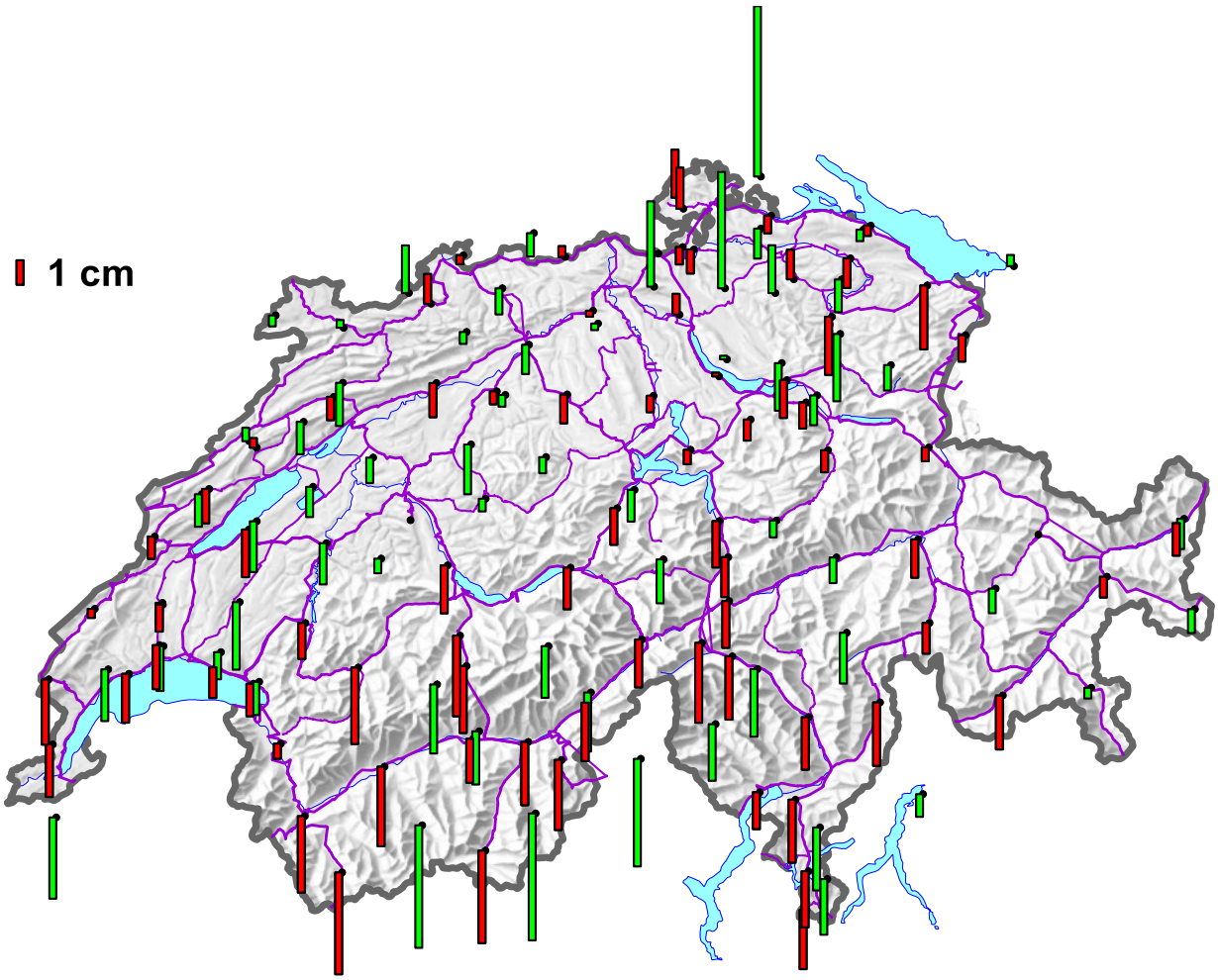


Figure 2-3: Différences entre les altitudes ellipsoïdales (CHTRF95 - CHTRF2004) sur les points du réseau GPS MN95 ainsi que les rattachements excentriques de GPS-nivellement. Les points utilisés pour le calcul de CHGeo98 sont représentés en rouge (issu de [Schlatter, 2007])

2.2.3 GPS-nivellement

Les côtes du géoïde observées sont obtenues en formant la différence entre les altitudes ellipsoïdales (GPS) et les altitudes orthométriques (RAN95). Parfois, il faut tenir compte d'un écart altimétrique supplémentaire pour quelques points (notamment pour les stations AGNES), dû au fait que le point de référence du nivellement ne coïncide pas avec celui issu de l'exploitation GPS.

Au final, 193 de ces points ont été utilisés pour le calcul du géoïde CHGeo2004. La forte augmentation de ces points par rapport à CHGeo98 résulte notamment du rattachement des points de densification MN95 au nivellement fédéral, de l'effort particulier consenti en 2002 pour rattacher des points principaux de MN95 ainsi que des stations AGNES supplémentaires (CH-CGN), et finalement de la campagne de mesures spécifique CHGeo2003. Une vue d'ensemble de tous les points utilisés pour le calcul du géoïde CHGeo2004 est représentée sur la Figure 2-4. De façon générale, ces campagnes de densification ont permis de confirmer sans ambiguïtés les écarts systématiques entre CHGeo98 et les observations de GPS-nivellement (cf. Figure 2-5). De plus, il s'est avéré que la côte du géoïde observée sur le point de Ramosch (en Basse-Engadine), qui avait été éliminé à tort des calculs de CHGeo98 en raison des soupçons de faute qui pesaient sur lui, a été confirmée par deux nouveaux points déterminés dans son voisinage.

Un élément important pour différencier la qualité des observations de GPS-nivellement est lié à la durée des sessions GPS dont elles sont issues (cf. Figure 2-4). En effet, de nombreux rattachements excentriques des points principaux de MN95 ont été déterminés par des sessions assez brèves (environ 4 heures) avec des récepteurs L1. Ces points présentent donc une précision plus faible et ont fait l'objet d'une pondération en conséquence plus faible dans le calcul du nouveau géoïde.

Les mesures de rattachement au nivellement fédéral sont décrites dans [Schlatter et al. 2003], la campagne de mesure GPS CHGeo2003 et son exploitation dans [Brockmann, 2003].

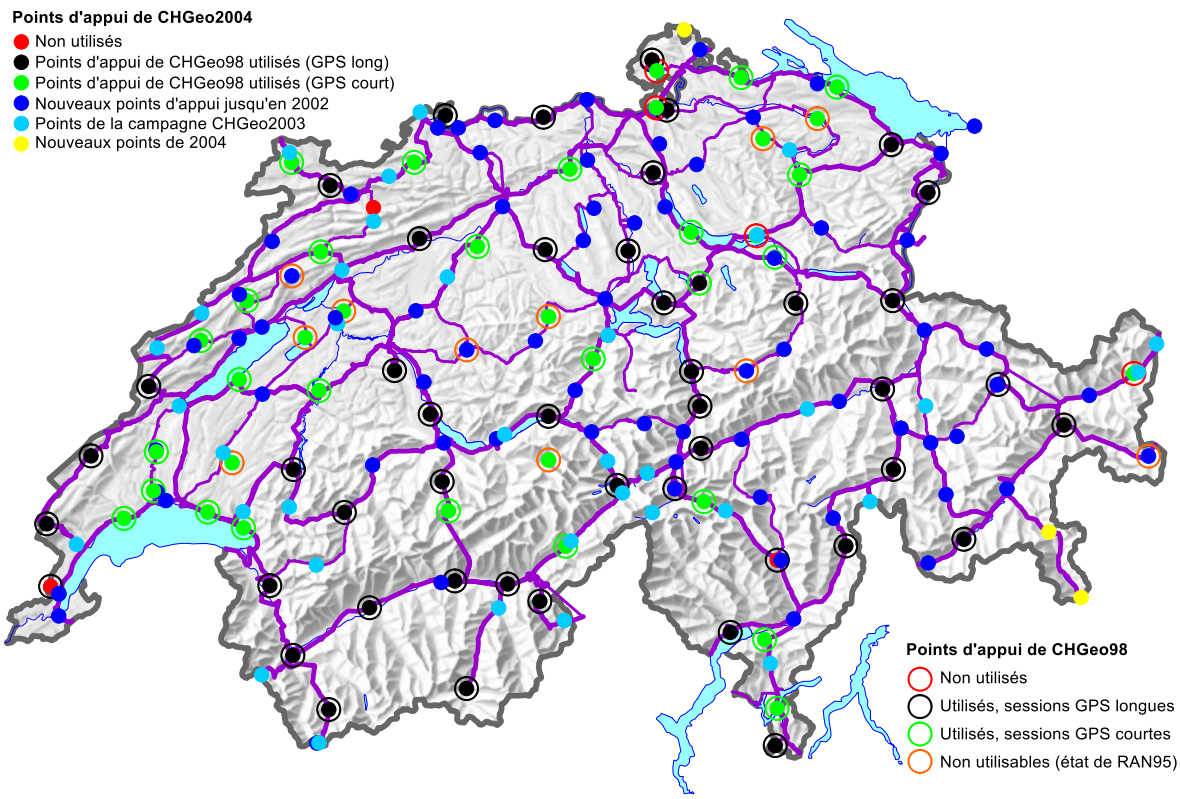


Figure 2-4: Points GPS-nivellement pour le calcul des géoïdes CHGeo98 et CHGeo2004

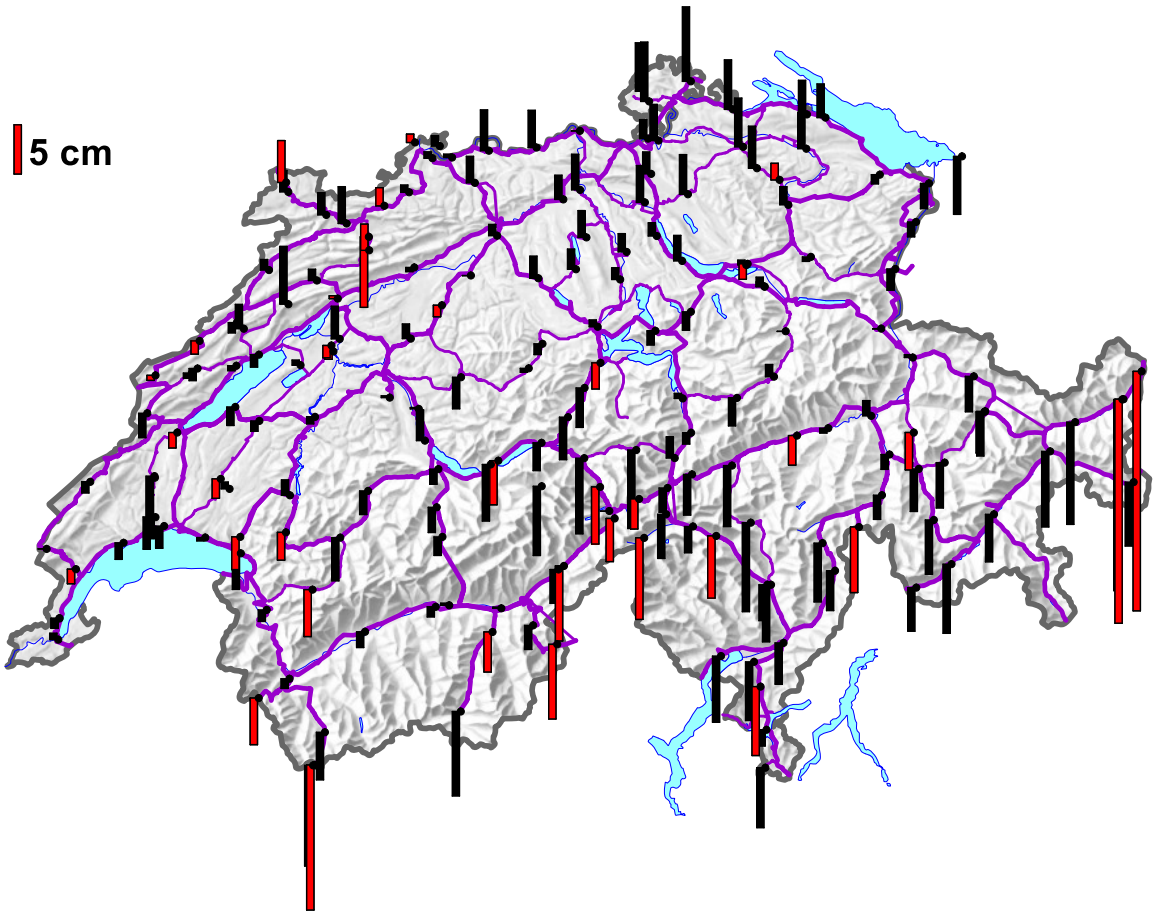


Figure 2-5: Résidus GPS-nivellement de CHGeo98 (état en 2003). Les points de la campagne CHGeo2003 sont représentés en rouge

2.3 Données gravimétriques

Par opposition à la stratégie choisie pour le calcul du géoïde CHGeo98, les mesures gravimétriques ont été directement intégrées dans le nouveau calcul du géoïde CHGeo2004. Elles permettent un contrôle supplémentaire des autres observations et accroissent la précision locale du modèle de géoïde. En particulier, dans les zones dépourvues d'observations de déviations de la verticale. Le jeu de données du relevé gravimétrique national de la Commission géophysique suisse (CGS) [Olivier et al. 2010] a pu être utilisé. Quant aux nombreuses données gravimétriques étrangères disponibles au sein de swisstopo dans les zones frontalières, elles n'ont pas été utilisées pour la détermination du géoïde CHGeo2004, leur qualité n'ayant pas encore été validée. Seul le jeu de données du Bureau gravimétrique international (BGI) a été utilisé pour réduire les points de GPS-nivellement synthétiques (cf. § 2.4).

Les données gravimétriques de la CGS ont été reprises telles quelles. Seules quelques mesures identifiées comme étant erronées et quelques doublons ont été éliminés de tous les calculs.

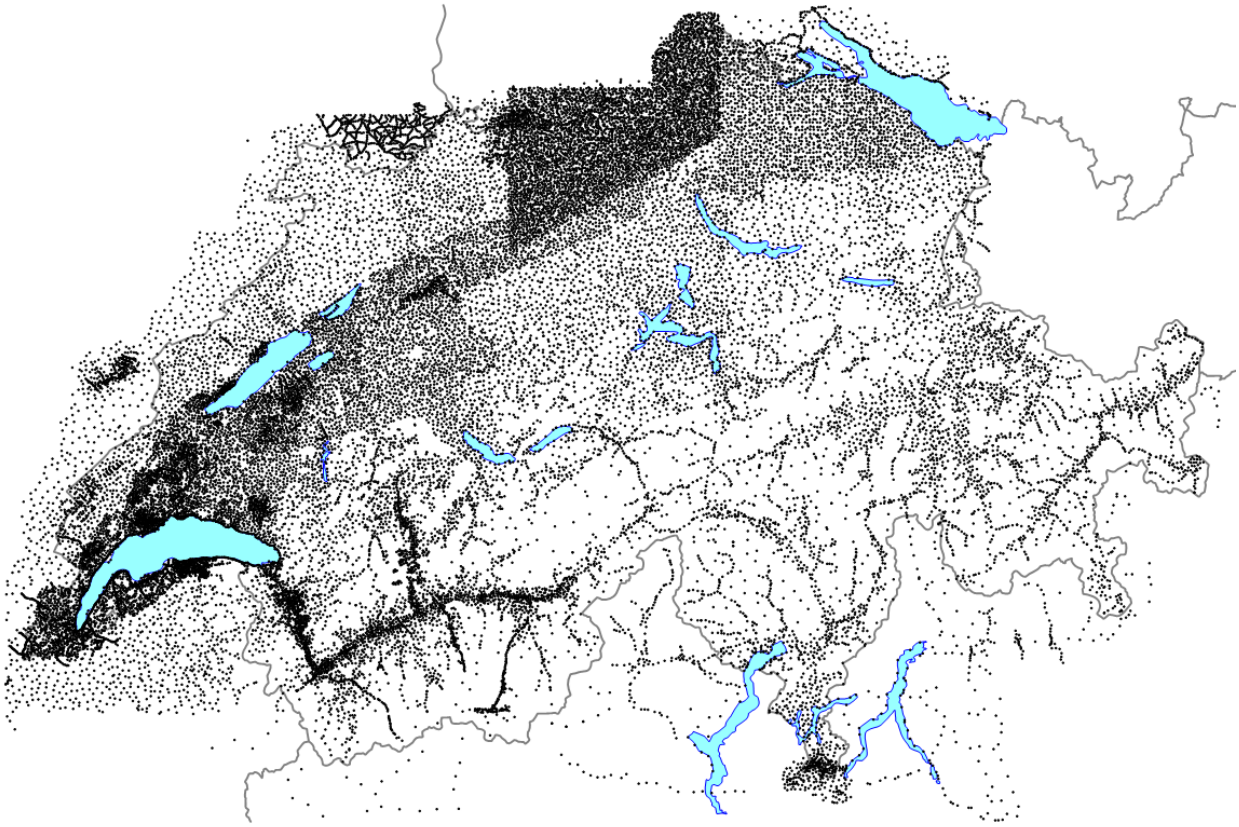


Figure 2-6: Données gravimétriques de la Commission géophysique suisse.

Au total, elles représentent plus de 30'000 points. Etant donné leur grand nombre, l'utilisation directe de ces données pour le calcul d'un modèle de géoïde par collocation est rendue impossible, même pour les ordinateurs actuels. Pour cette raison, le nombre de données a dû être considérablement réduit à quelques points représentatifs. Pour y parvenir, toutes les valeurs gravimétriques ont d'abord été réduites de l'influence des modèles de masse connus, puis des valeurs représentatives ont été interpolées sur une grille régulière de 5x5 km à partir de ces résidus gravimétriques. Aucune valeur interpolée n'est stockée si un carré de cette grille ne contient aucun point mesuré. Le jeu de données réduit qui en résulte est représenté sur la Figure 2-7. Il ne comporte plus que 2225 données gravimétriques.

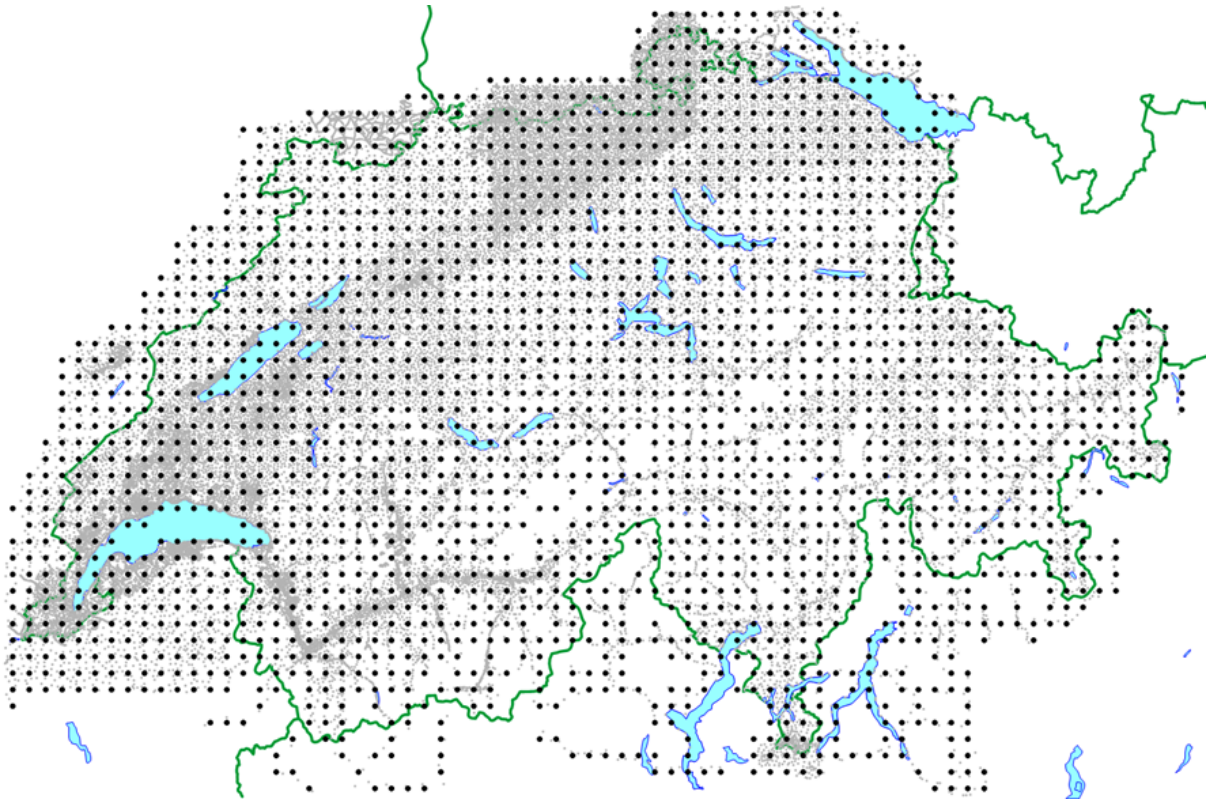


Figure 2-8: Réduction du nombre de mesures gravimétriques sur une grille régulière de 5x5 km

2.4 Points GPS-nivellement synthétiques dans les zones frontalières

Un des problèmes issu du calcul de CHGeo98 est, que le modèle se dégrade très vite lorsque l'on s'approche de la frontière nationale. A l'extérieur des régions dans lesquelles il y a des observables du géoïde, le modèle est en fait extrapolé et devient rapidement irréaliste. Bien que ces régions ne suscitent généralement que peu d'intérêt pour la mensuration nationale suisse, il est tout de même parfois nécessaire d'y calculer des côtes du géoïde approchées. C'est pourquoi, pour le calcul de CHGeo2004, des observations artificielles ont été ajoutées dans ces régions. Ces observations supplémentaires sont formellement des anomalies d'altitude «observées» sur une grille de 10x10 km, dans la zone du périmètre de calcul dans laquelle aucune observation des jeux de données présentés ci-dessus n'est disponible. Ces 271 anomalies d'altitude supplémentaires (cf. Figure 2-9) sont issues du quasi-géoïde européen EGG97 [Denker et Torge 1998] et ont été considérées comme des observations GPS-nivellement dans la suite du calcul. Afin de pouvoir les intégrer proprement avec les autres données disponibles, elles ont été réduites de façon similaire de l'influence des modèles de masse. A cet effet, les valeurs gravimétriques nécessaires aux calculs ont été interpolées à partir du jeu de données du BGI.

2.5 Vue d'ensemble des données utilisées

Voici donc l'ensemble des données utilisées pour le calcul du géoïde CHGeo2004 :

- 697 stations de déviation de la verticale avec 657 composantes ξ et 618 composantes η (soit au total 1275 observations)
- 193 points de GPS-nivellement, trois d'entre eux ayant été éliminés pour cause de précision insuffisante ou pour d'autres motifs
- 2225 valeurs gravimétriques interpolées sur une grille régulière
- 271 points de GPS-nivellement synthétiques issus de l'EGG97 dans les pays limitrophes.

Au total, ce sont 3961 observations qui ont été utilisées pour le calcul du géoïde (Figure 2-9).

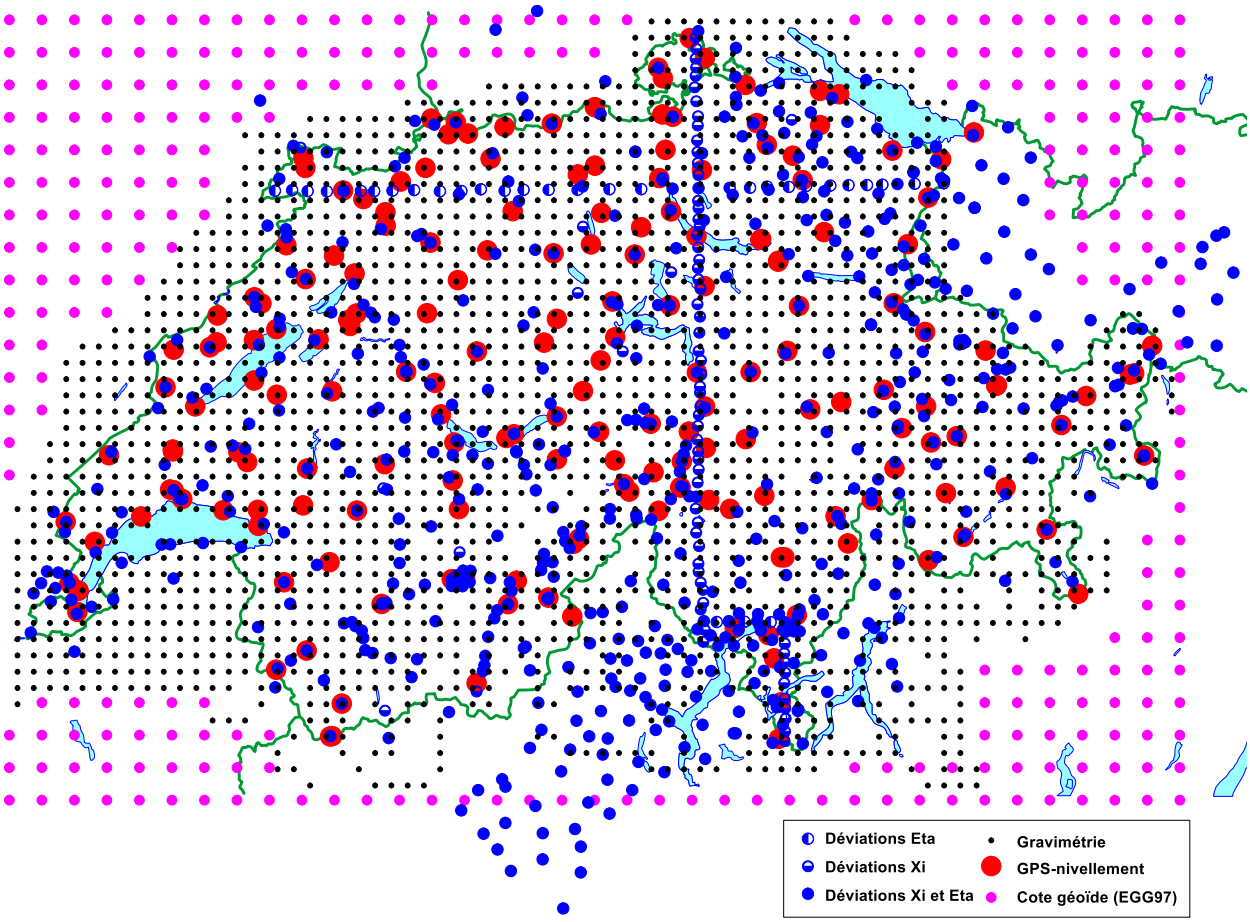


Figure 2-9: Jeu de données complet utilisé pour le calcul du géoïde CHGeo2004

3 Modèles de masse

3.1 Modèle numérique de terrain

Les modèles de masse utilisés pour le nouveau calcul du géoïde sont presque identiques à ceux utilisés dans le calcul de CHGeo98. La seule différence est l'utilisation du MNT25 level 2 à la place du MNT25 level 1. Ce changement n'a cependant qu'un faible impact sur la détermination du champ de pesanteur. Seulement quelques rares erreurs grossières du MNT25/L2 ont été corrigées manuellement. A l'extérieur du périmètre de MNT25, dans les zones frontalières, le DTED1 a été remplacé par SRTM3.

Comme pour le calcul de CHGeo98, le modèle de la topographie a été enregistré en différentes résolutions (25, 50, 500 et 10'000 m). Le périmètre du modèle est lui aussi resté inchangé (410'000 – 900'000 en direction ouest-est et -10'000 – 350'000 en direction sud-nord).

Le SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) est un modèle numérique de surface global d'une résolution de 3", en libre accès. Il a été déterminé sur la base de mesures réalisées en février 2000 lors d'une mission de 10 jours. Il couvre les régions comprises entre les latitudes 56° sud et 60° nord. La précision annoncée est de ±16 m (intervalle de confiance à 90%). Au moment du calcul de CHGeo2004, SRTM3 comportait encore de nombreuses lacunes (il manquait 3% environ de la surface totale ; taches noires sur les figures suivantes) qu'il fallut combler avec les données moins précises issues de DTED1. En effet, les écarts entre le DTED1 et le SRTM3 peuvent parfois atteindre 2000 m (cf. Figure 3-1). C'est surtout dans le nord de l'Italie, mais aussi en Autriche que le SRTM3 a considérablement amélioré le modèle. Les imprécisions du DTED1 résultent principalement du pauvre géoréférencement des données originales (en règle générale, des courbes de niveau numérisées à partir de cartes topographiques).

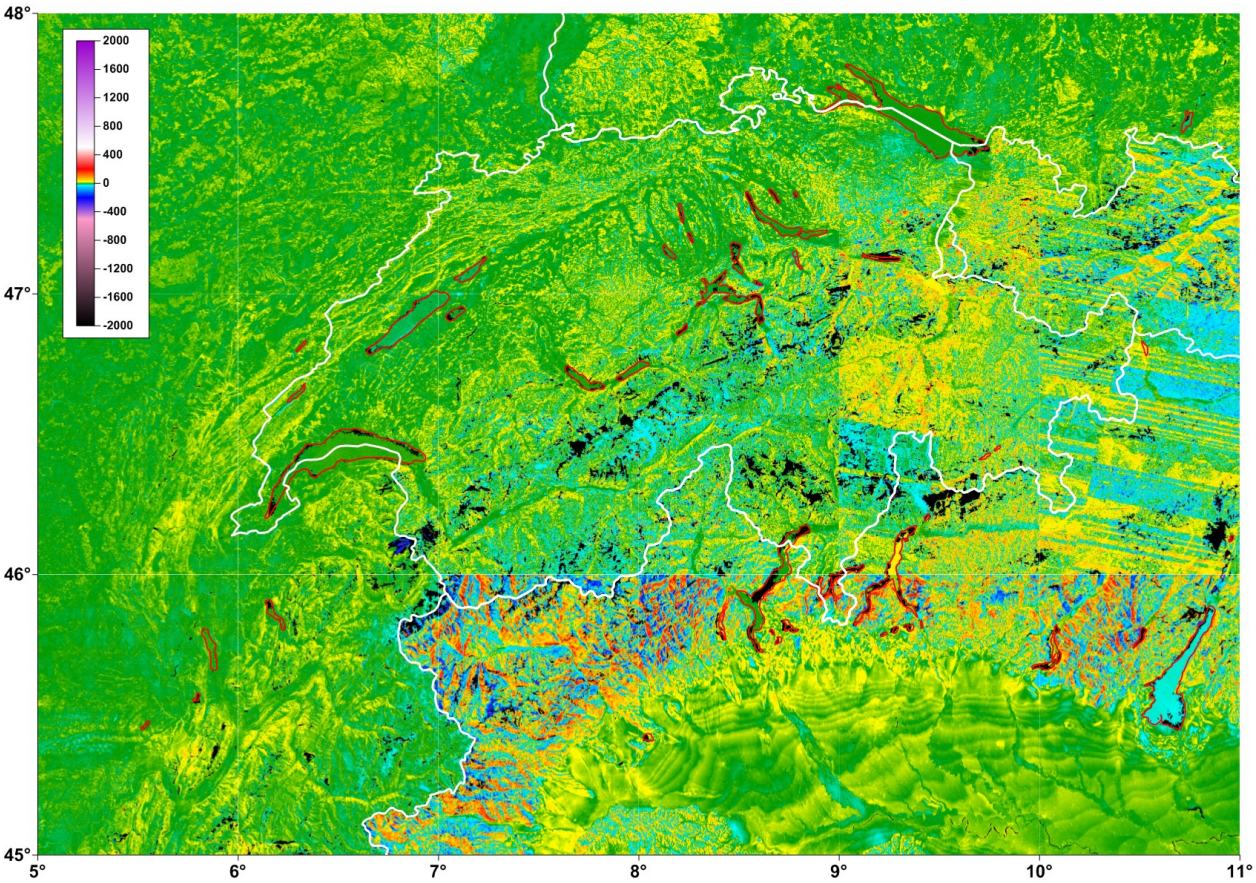


Figure 3-1: Ecarts entre SRTM3 et DTED1. Taches noires = lacunes dans SRTM3

La précision du SRTM3 a été estimée par comparaison au MNT25. Les écarts y sont présentés sur la Figure 3-2. Sur cette figure, il est possible de voir que le SRTM3 est plus élevé que le MNT25 dans de nombreuses régions (zones en jaune). Il s'agit en règle générale de secteurs boisés, ce qui confirme que SRTM3 est bien un modèle de surface. Ceci est également clairement visible sur l'histogramme des écarts (Figure 3-3), lequel diffère significativement d'une distribution normale. De façon générale, les vérifications empiriques réalisées en Suisse ont confirmé la précision annoncée du SRTM3.

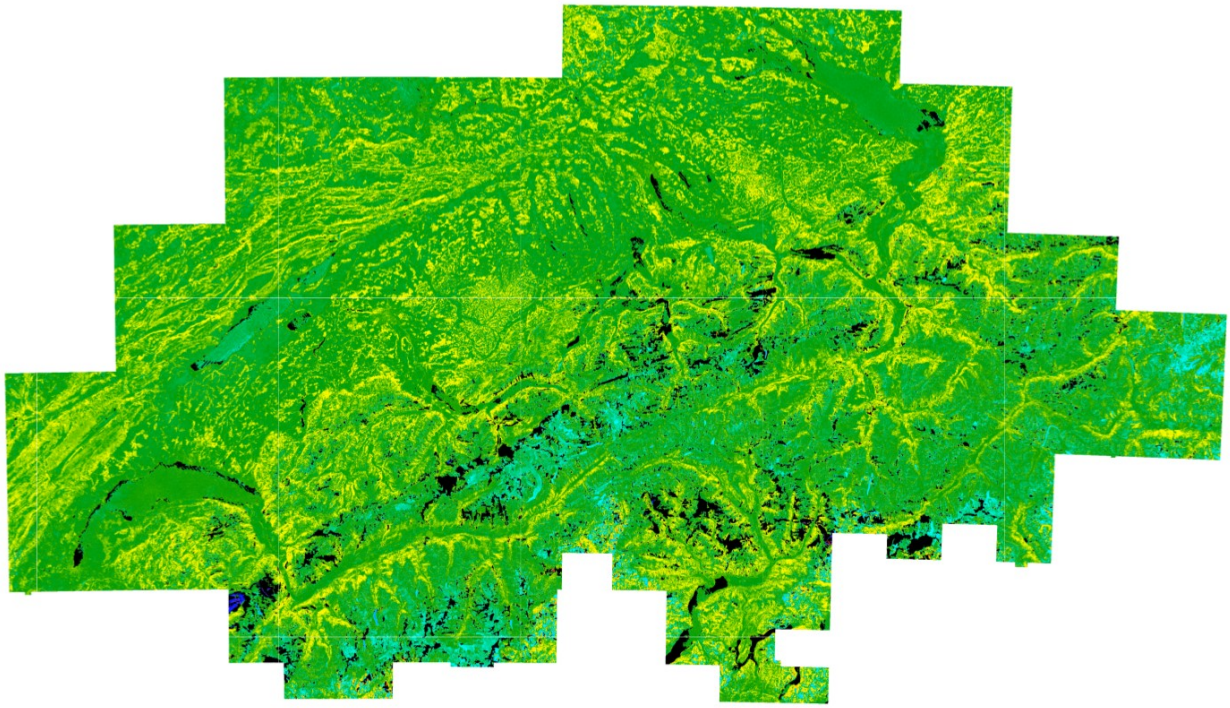


Figure 3-2: Ecarts entre SRTM3 et MNT25 (même échelle des couleurs que sur la Figure 3-1)

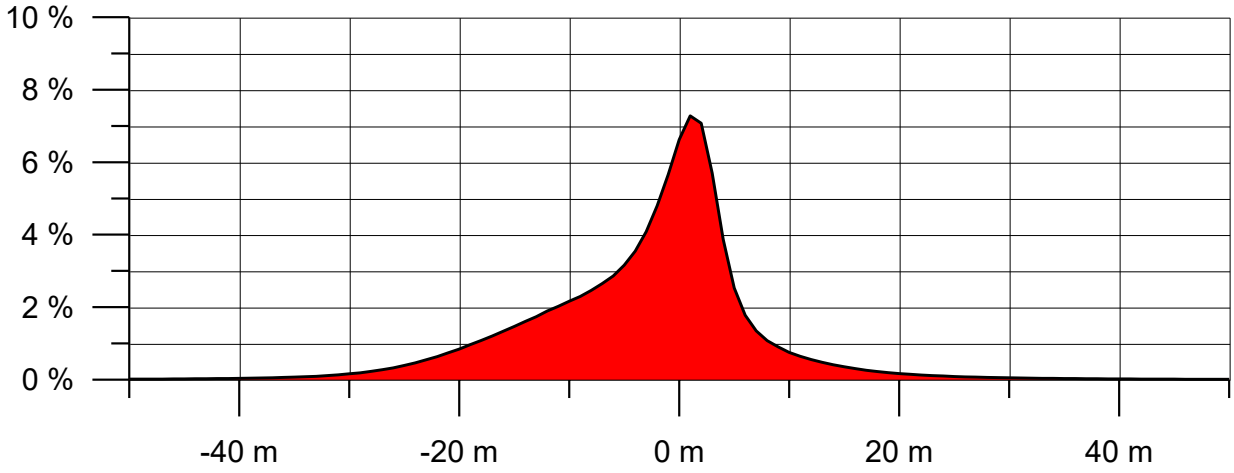


Figure 3-3: Histogramme des écarts (MNT25 moins SRTM3)

Pour bien mettre en évidence les répercussions engendrées par l'utilisation des nouveaux MNT (SRTM3 et MNT25/L2) par rapport à ceux utilisés pour CHGeo98 (DTED1 et MNT25/L1) sur la détermination du champ de pesanteur, l'effet topographique des deux modèles sur la gravimétrie (Figure 3-4) et sur la côte du géoïde a été comparé (Figure 3-5).

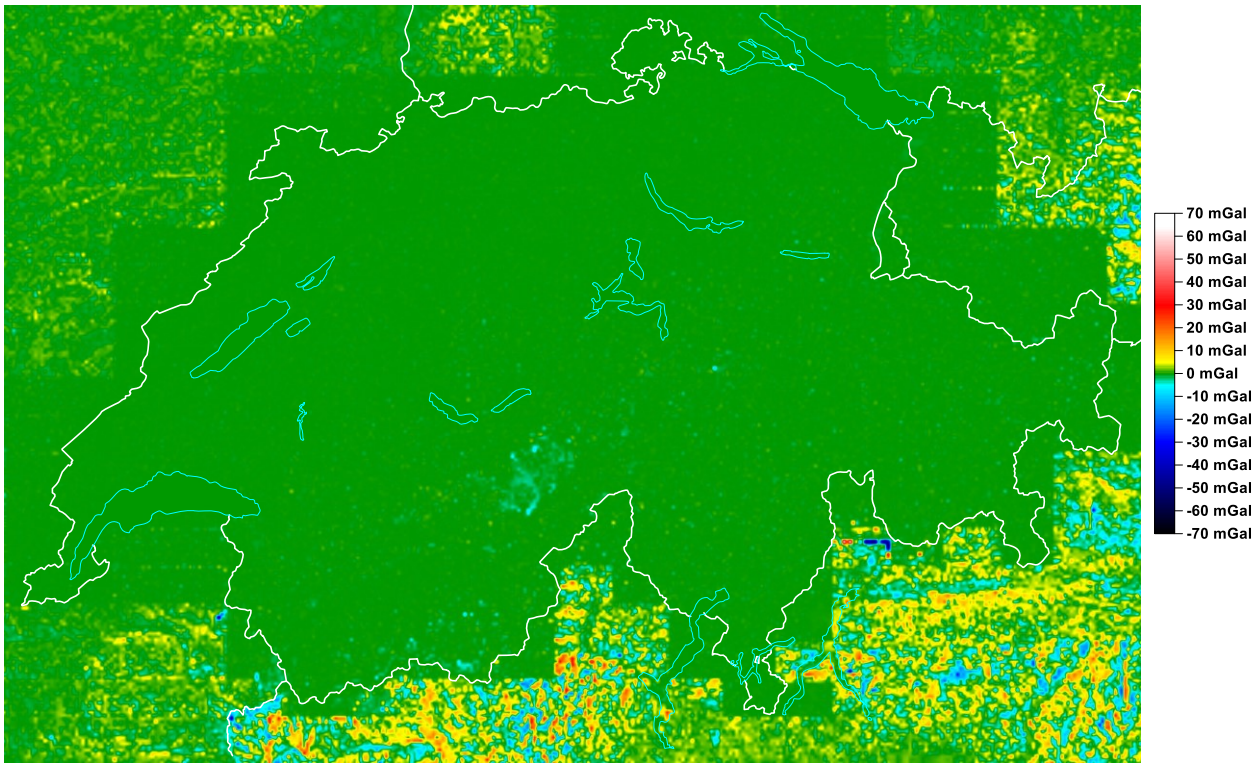


Figure 3-4: Différences de l'effet topographique sur la gravimétrie calculées avec MNT25/L2 et SRTM3 moins MNT25/L1 et DTED1 [en mGal]

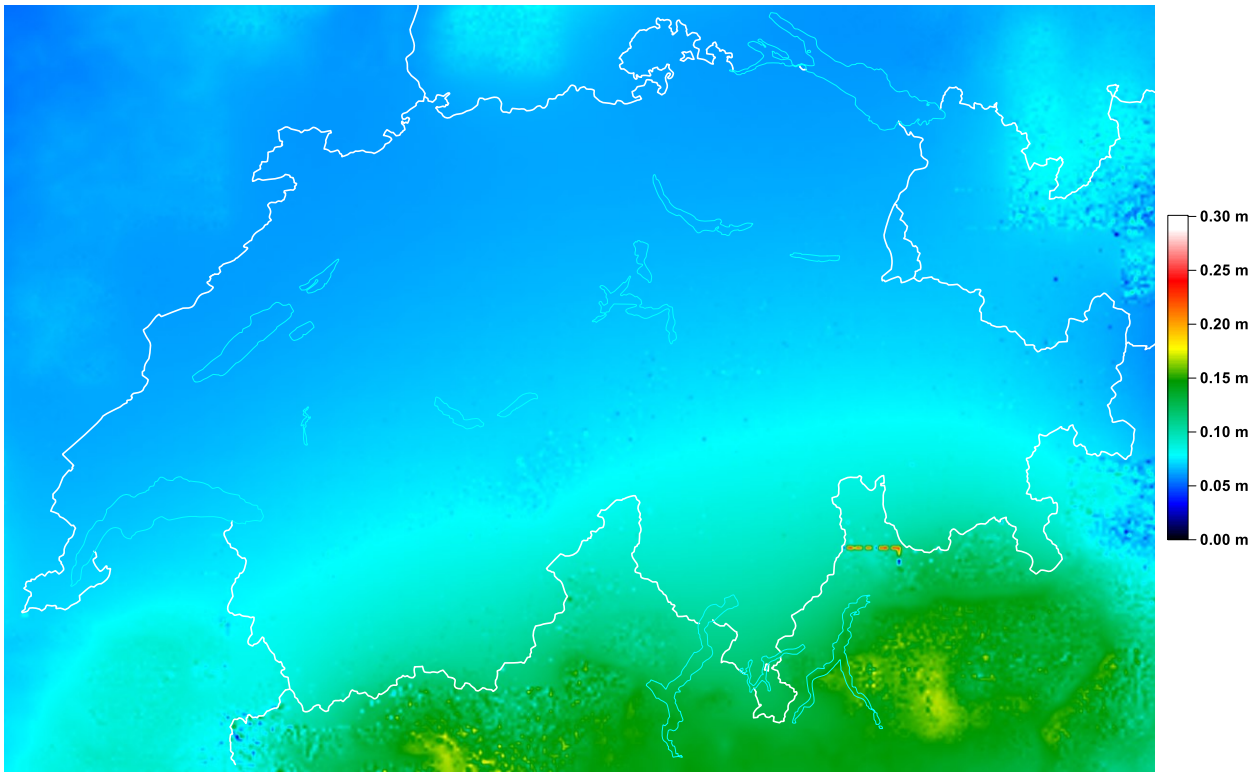


Figure 3-5: Différences de l'effet topographique sur l'anomalie d'altitude calculées avec MNT25/L2 et SRTM3 moins MNT25/L1 et DTED1 [en m]

Les différences restent faibles en Suisse, ce qui témoigne du caractère généralement insignifiant des écarts entre MNT25/L1 et MNT25/L2 pour la détermination du champ de pesanteur. Par contre, dans les zones frontalières, les améliorations obtenues en utilisant SRTM3 apparaissent clairement. Les écarts sur la gravité varient avec une amplitude entre -64 et +67 mGal et la fréquence de ces variations est très élevée.

Ces différences sont également la raison principale de l'élimination de nombreuses mesures de la déviation de la verticale dans le nord de l'Italie lors du calcul du géoïde CHGeo98. Ceci parce qu'elles avaient été considérées à tort comme des erreurs de mesure.

Les écarts au niveau des anomalies d'altitude varient entre 0 et 27 cm avec des variations de bien plus longues longueurs d'onde (ce qui est logique) que pour la gravimétrie. Ils peuvent donc être facilement interpolés. C'est aussi la raison pour laquelle ils ne provoquent pas directement d'erreurs dans le calcul du géoïde, la plus grande partie de l'erreur étant en fait annulée par la méthode de calcul de retrait-restauration (remove-restore) appliquée pour CHGeo98 et CHGeo2004.

3.2 Autres modèles de masse

Les autres modèles de masse utilisés pour le calcul ont été conservés sans changement par rapport à CHGeo98. Il s'agit des modèles du Moho, du corps d'Ivrea, des masses d'eau des lacs, des sédiments du Po, du remplissage quaternaire des vallées principales et du glacier d'Aletsch. Une description précise de ces modèles figure dans [Marti, 1997]. Les valeurs de densité utilisées sont récapitulées dans le Tableau 3-1.

De plus, un modèle très simple des densités de surface a par ailleurs été utilisé pour la réduction topographique. Il comprend les principaux sédiments quaternaires, le corps d'Ivrea et les sédiments du Po. Ce modèle (cf. Figure 3-6) résulte de la numérisation de la carte tectonique au 1:500'000.

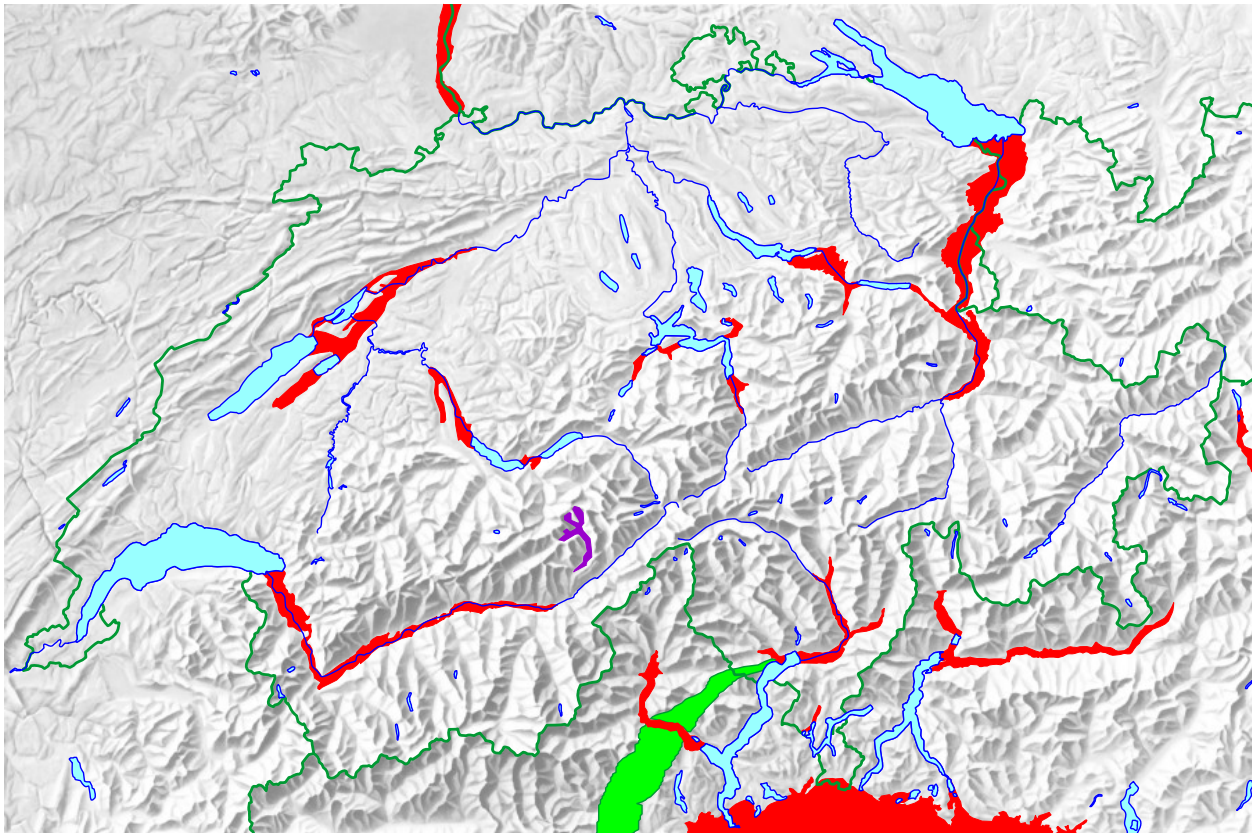


Figure 3-6: Modèle utilisé pour les densités de surface

Tableau 3-1: Densités utilisées pour les modèles de masse

Modèle de masse	Densité [g/cm^3]
Topographie standard	2,67
Eau des lacs	1,00
Glace des glaciers	0,90
Sédiments quaternaires	2,00
Couche superficielle des sédiments du Po	1,90
Couche superficielle du corps d'Ivrea	3,10

3.3 Le modèle de référence global EGM96

Il est courant de recourir à un modèle de référence global lors d'une détermination locale du géoïde. Toutes les mesures sont alors réduites de l'influence de ce modèle. L'avantage de procéder ainsi est que la majeure partie des variations globales de grandes longueurs d'onde sont éliminées sans que l'on ait à se préoccuper de leurs causes. L'estimation de ces variations n'est donc plus nécessaire, de surcroît, les masses très éloignées ou situées à de grandes profondeurs n'ont pas à être nécessairement modélisées.

L'utilisation d'un modèle global pose toutefois quelques problèmes, puisqu'une partie de l'effet des modèles de masse locaux est déjà prise en compte dans celui du modèle global. Ainsi, lors du calcul des effets des modèles locaux (comme l'influence de la topographie), seulement les effets à haute fréquence qui ne sont pas déjà pris en compte dans le modèle global doivent être considérés. Ceci conduit à la notion de «correction de terrain résiduelle» (residual terrain correction, RTC). Le modèle de masse topographique n'est pas le seul à modéliser des effets déjà pris en compte dans le modèle global. Il en va de même pour tous les autres modèles de masse. Leurs effets sur le champ de pesanteur doivent par conséquent être séparés en deux parties (grandes longueurs d'onde et courtes longueurs d'onde).

Au moment du calcul de CHGeo2004, le modèle global EGM96 (Earth Gravitational Model 1996, [Lemoine et al. 1998]) était le modèle disponible le plus actuel et le plus précis. Il a donc été utilisé. Il fut déterminé en 1996 sur la base d'analyses d'orbites de satellites, de données d'altimétrie satellitaire et de données gravimétriques terrestres menées conjointement par la NASA et la NIMA (aujourd'hui NGA). Sa résolution spatiale est d'environ 50 km (degré et ordre 360 de la modélisation en harmoniques sphériques).

Son effet sur le géoïde en Suisse est présenté sur la Figure 3-7. On voit que sa résolution spatiale est limitée, mais on y distingue déjà les caractéristiques principales du géoïde local (valeurs minimales sur le Plateau, valeurs maximales dans le sud du Valais et descente marquée en direction de la plaine du Po). Les structures plus fines comme les grandes vallées alpines ne sont toutefois pas visibles dans ce modèle.

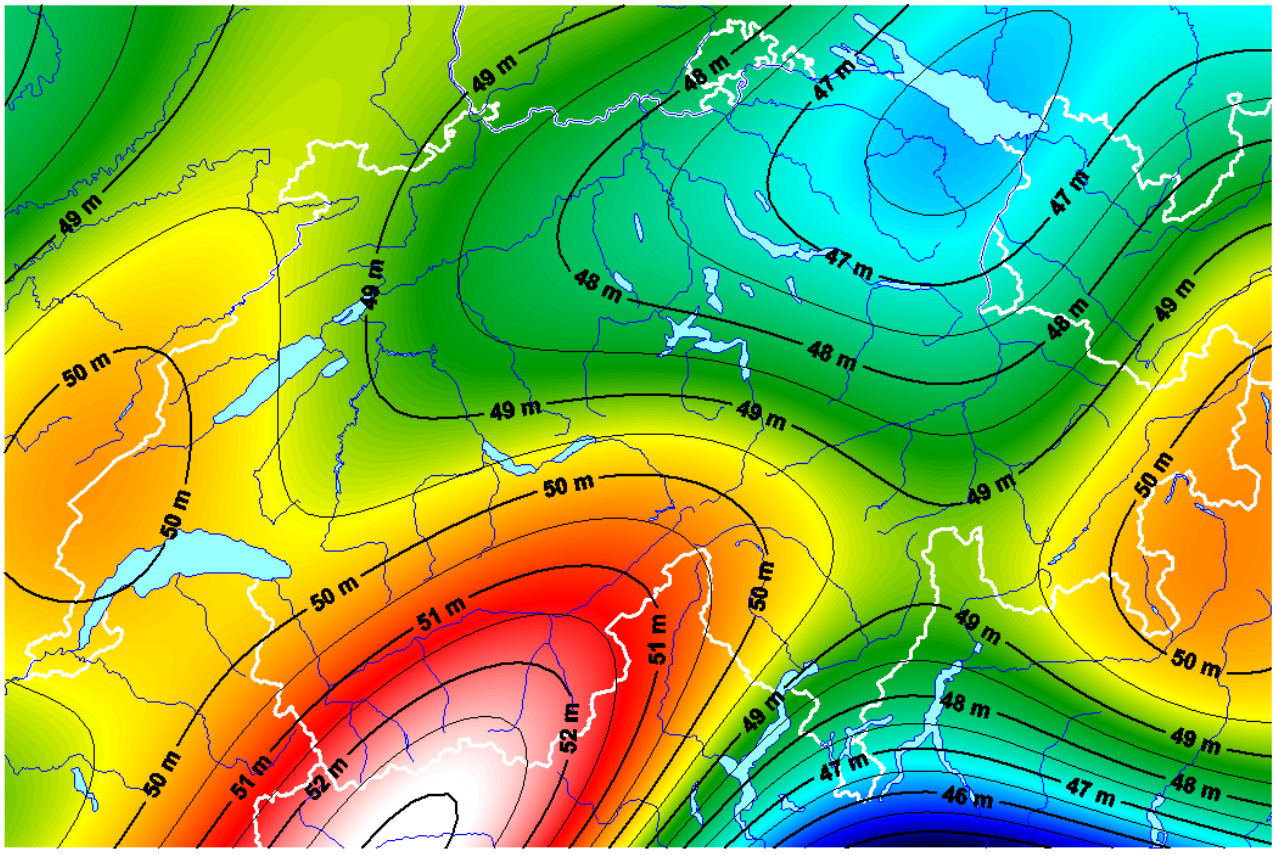


Figure 3-7: Le modèle de référence (géoïde) EGM96 en Suisse

4 Réduction des observations

Les observations doivent toutes être réduites de l'influence des masses et des modèles connus pour que la méthode de collocation puisse être appliquée. Il s'agit du modèle global EGM96, de la topographie et éventuellement d'autres modèles de masse.

4.1 Remarque concernant le système de référence

Les mesures (surtout les déviations de la verticale et les données de GPS-nivellement) et les coordonnées des stations peuvent être exprimées dans différents systèmes de référence. Il convient bien évidemment de veiller à ce qu'ils soient utilisés de manière cohérente pour la détermination du géoïde. Tous les calculs pour CHGeo2004 ont été effectués en ETRS89 (identique à CHTRS95). Toutefois, le modèle numérique de terrain était uniquement disponible dans la projection suisse (MN03 et MN95). C'est pourquoi toutes les influences des modèles de densité locaux ont été calculées dans le système de projection suisse en tenant compte de la courbure de la Terre. Aucun inconvénient majeur n'en résulte pour une détermination locale du géoïde. Les légères différences dues aux déformations de la projection sont négligeables.

De même, aucune transformation altimétrique n'a été exécutée. Toutes les informations altimétriques ont été laissées telles qu'elles apparaissent dans les données originales et traitées comme si toutes les altitudes étaient exprimées dans le système NF02. C'est incorrect si l'on veut rester rigoureux et l'effet produit n'est pas négligeable lors du calcul de l'influence de la topographie sur la pesanteur ou lors du calcul d'anomalies d'altitude. En effet, les altitudes ellipsoïdales doivent être utilisées en entrée pour calculer l'effet du modèle global. Ces valeurs ont été obtenues à partir des altitudes NF02, d'abord en ajoutant les côtes du géoïde du modèle CHGeo98 puis à partir de solutions provisoires de CHGeo2004 et de HTRANS lors d'étapes de calcul ultérieures.

4.2 Réduction du modèle global

Pour calculer l'influence d'un modèle global en harmoniques sphériques sur les diverses composantes du champ de pesanteur, nous disposions d'une version légèrement modifiée du programme GEOPPT (initialement développé par HG Wenzel, Uni Karlsruhe). Les déviations de la verticale et les valeurs gravimétriques ont ainsi été réduites de l'influence du modèle global, avec en entrée, leurs positions données en coordonnées et altitudes ellipsoïdales. De façon analogue, les anomalies de hauteur ainsi que les côtes du géoïde (points de GPS-nivellement) ont été réduites à une l'altitude ellipsoïdale égale à 0.

4.3 Réduction de l'influence de la topographie

Au cours d'une première étape, l'influence de la topographie a été calculée comme pour le modèle CHGeo98 [Marti, 1997], avec les mêmes paramètres. En voici les principaux : calcul avec la résolution maximale du MNT25 jusqu'à 100 m, puis avec une résolution de 50 m jusqu'à une distance de 1250 m et enfin avec une résolution de 500 m jusqu'à 50 km. L'effet a été calculé avec une densité uniforme de 2,67 g/cm^3. L'influence due aux autres modèles de masse a été calculée séparément (Figure 3-6).

Il convient à présent, comme cela a été indiqué au paragraphe 3.3, de retrancher du modèle de topographie local, la part de l'influence topographique déjà contenue dans le modèle de référence global. Pour ce faire, une version lissée du modèle topographique a été produite à cet effet en filtrant le modèle original par une moyenne glissante sur 50 km (la résolution d'EGM96). L'effet de ce modèle topographique filtré a pu être déterminé et soustrait de l'effet topographique complet. Pour la réduction des mesures gravimétriques, une correction supplémentaire est néanmoins requise : lors de la formation du modèle topographique lissé, de très nombreux points de mesure se trouvent sous la surface de ce modèle filtré, alors qu'en fait, ils se trouvent bien «en surface». C'est pourquoi la correction suivante, dite correction harmonique, doit être appliquée à tous les points situés sous la surface du modèle lissé. Elle correspond à une correction de Bouguer (cf. par exemple Forsberg, 1994) :

$$\Delta g_{harm} = 4\pi\Gamma\rho(h_{ref} - h_P)$$

Γ désigne ici la constante gravitationnelle, ρ la densité de la roche, h_{ref} l'altitude du modèle topographique lissé et h_P l'altitude du point de mesure. Cette correction est égale à 0 pour les déviations de la verticale ainsi que pour les côtes du géoïde observées.

4.4 Influence des autres modèles de masse

Le calcul de l'influence des autres modèles de masse pose un problème analogue à celui rencontré pour la topographie : si on utilise un modèle de référence global tel qu'EGM96, il contient déjà une partie des effets. C'est pourquoi chacun de ces modèles devrait aussi être scindé en deux parties, grandes longueurs d'onde d'un côté et courtes longueurs d'onde de l'autre. Cependant, ce mode opératoire est plutôt compliqué et aucune solution réellement satisfaisante ne peut être apportée ici. De petits modèles locaux comme les lacs ou les remplissages quaternaires des vallées sont dépourvus de partie visible dans le modèle global. Leurs influences peuvent être calculées et réduites sans difficulté. Les modèles de plus grande ampleur comme le corps d'Ivrea ou les sédiments de la plaine du Po comprennent les deux types d'effets (grandes longueurs d'onde et courtes longueurs d'onde). Une séparation devrait donc être entreprise les concernant. Les modèles d'une ampleur encore supérieure (comme le Moho par exemple), sont presque intégralement inclus dans le modèle global et n'ont de ce fait plus à être considérés séparément.

La prise en compte de ces modèles de masse remplit deux fonctions lors de la détermination du géoïde :

- le lissage du champ résiduel pour faciliter son interpolation
- la réduction des observations de l'altitude du point de mesure à celle au niveau du géoïde.

Le second objectif peut aussi être atteint si la réduction est uniquement formée de la différence entre l'effet de la masse à l'altitude du point de mesure moins l'effet au niveau du géoïde. Cette composante est normalement limitée localement et intègre tous les effets à haute fréquence, même dans le cas des modèles de grande ampleur. Ainsi, le premier objectif est aussi partiellement atteint. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour le calcul de CHGeo2004. En d'autres termes, seule la différence « haut moins bas » a été retranchée pour la réduction du corps d'Ivrea, de la plaine du Po et du Moho. Il s'agit là d'une approche pragmatique destinée à éviter d'avoir à scinder l'effet des modèles en deux parties. Ceci est suffisant pour le calcul du géoïde. L'inconvénient est qu'une partie relativement importante de l'effet de ces modèles subsiste dans les observations réduites et nécessite encore une interpolation lors de la collocation. Cela est surtout vrai pour le corps d'Ivrea, comme les figures suivantes permettent de le constater.

4.5 Réduction de l'effet de la pesanteur résiduelle

Si le géoïde est calculé sur la base d'anomalies d'altitude déduites d'altitudes normales et de hauteurs ellipsoïdales, ces dernières doivent encore subir une petite réduction au niveau de la mer due au fait que les surfaces équipotentielles ne sont pas parallèles entre elles. Cette réduction est simplement obtenue en multipliant la pesanteur résiduelle interpolée (déduction faite de tous les effets de masses pris en compte) par l'altitude. Si l'on applique cette correction, on obtient exactement le même résultat qu'en calculant avec des côtes du géoïde observées, issues de la différence entre altitudes orthométriques et hauteurs ellipsoïdales.

4.6 Représentation de la réduction des déviations de la verticale

Dans ce paragraphe, les différentes étapes de réductions des observations sont illustrées à l'aide des déviations de la verticale. Les déviations de la verticale observées sont représentées sur la Figure 4-1. Elles témoignent d'une grande irrégularité et peuvent dépasser 1 minute d'arc.

La réduction du modèle global EGM96 (Figure 4-2) a pour effet de diminuer de façon générale les valeurs des déviations de la verticale. En bien des endroits sur le Plateau, elles sont déjà devenues très faibles. L'image d'ensemble reste évidemment agitée en raison de l'influence de la topographie.

Après avoir retranché le modèle topographique (Figure 4-3), on obtient un champ résiduel ne comprenant quasiment plus que de très faibles valeurs. L'image que présentent les parties restantes de la déviation de la verticale est désormais harmonieuse et ne révèle que des signaux systématiques dont les longueurs d'onde sont inférieures à 50 km. Néanmoins, on voit encore très clairement apparaître les effets du corps d'Ivrea. Quelques valeurs erronées sont aussi visibles. Elles ne suivent pas le champ continu des données dans leur voisinage.

La réduction des autres modèles de masse ne modifie plus substantiellement l'image d'ensemble, seulement localement on voit leurs effets assez faibles.

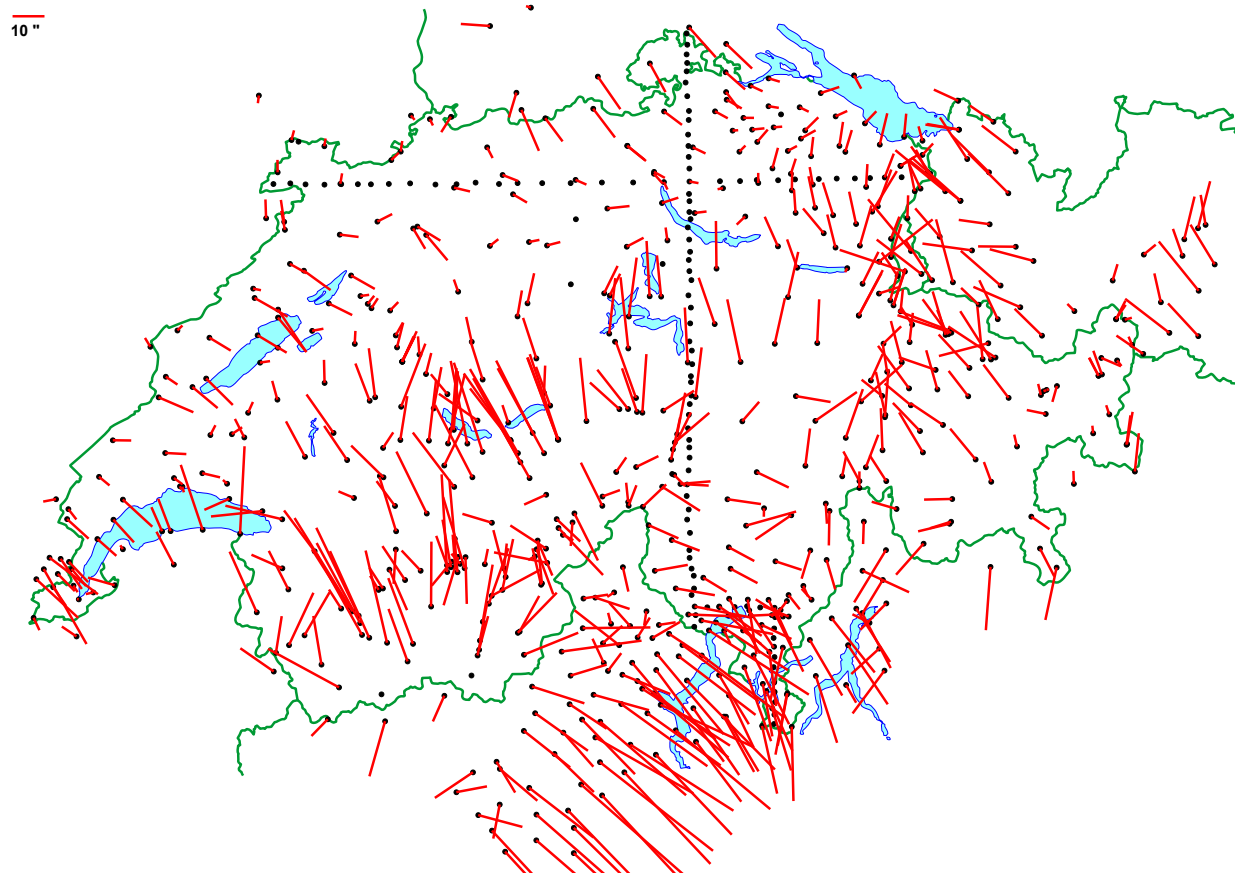


Figure 4-1: Déviations de la verticale observées

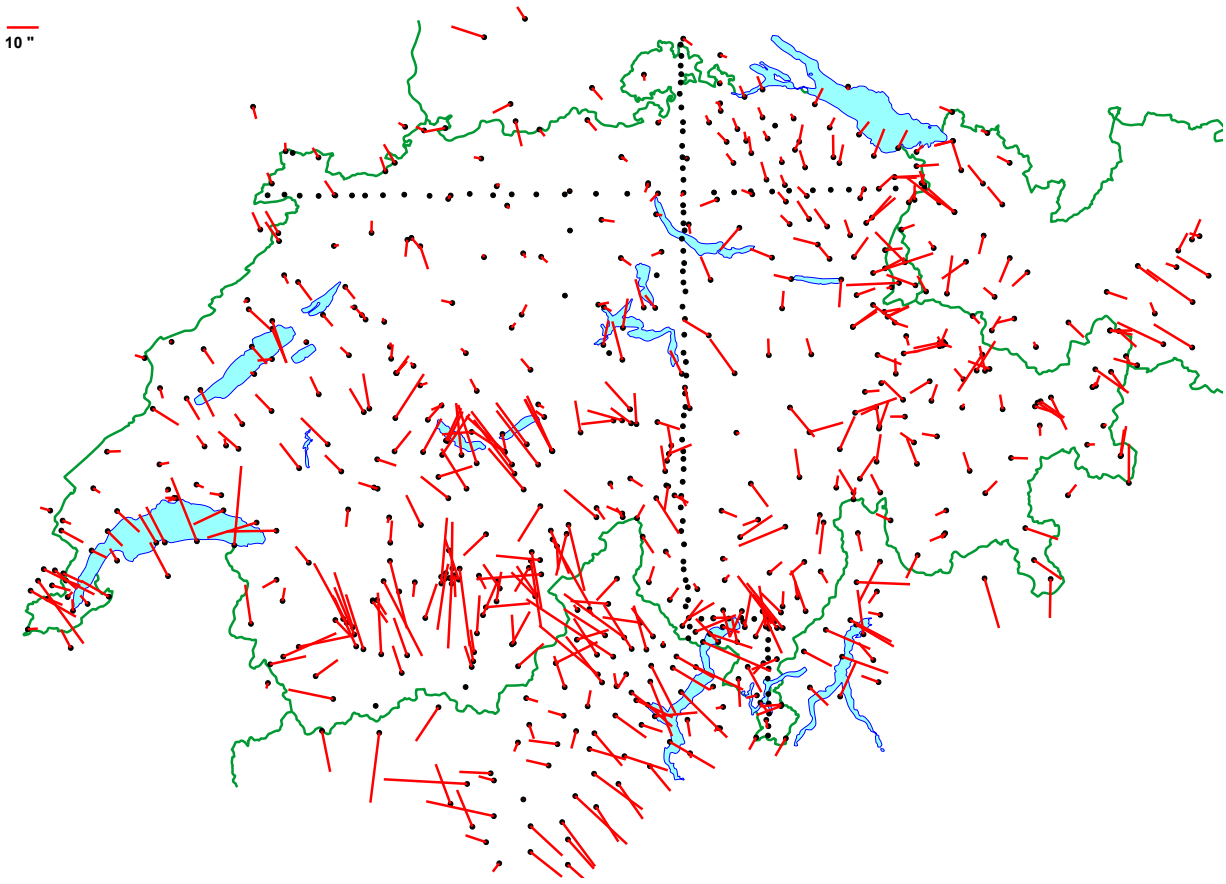


Figure 4-2: Déviations de la verticale réduites d'EGM96

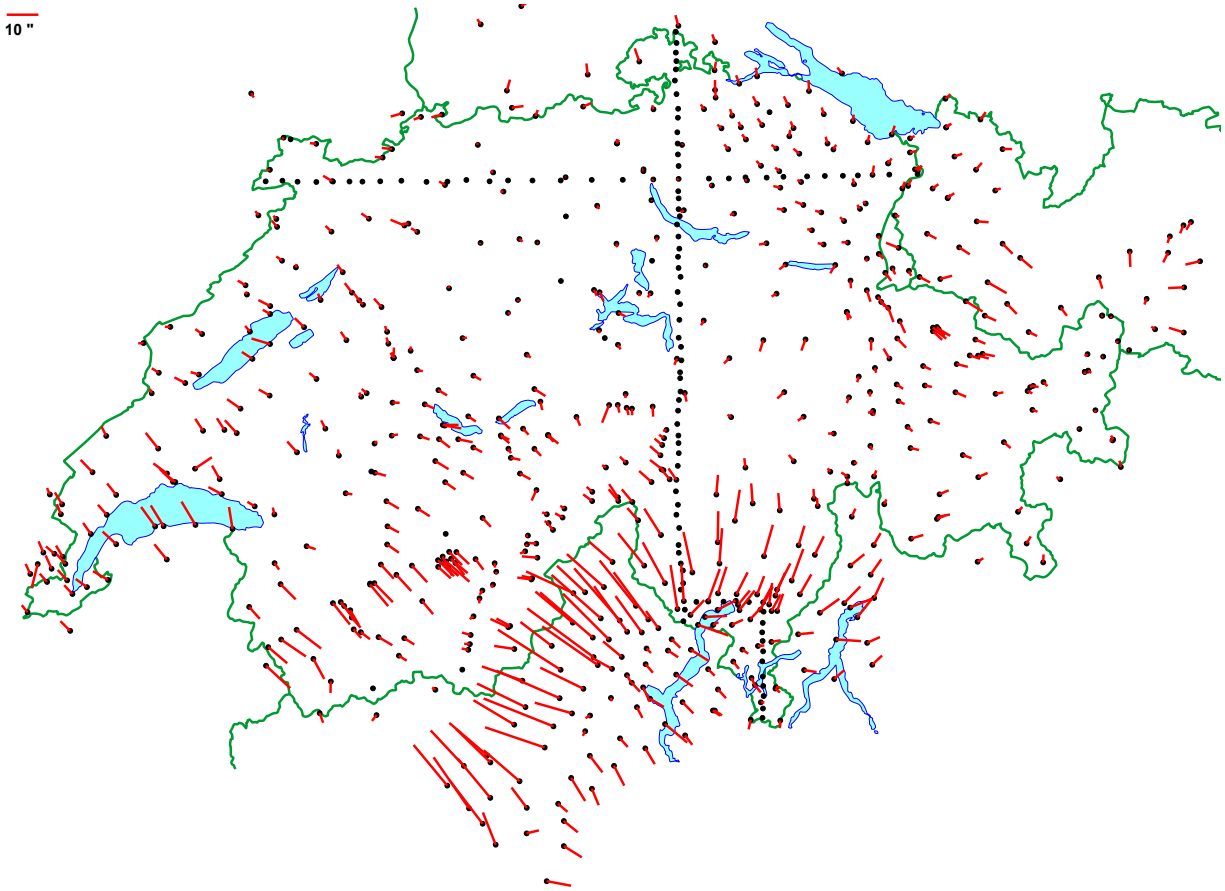


Figure 4-3: Déviations de la verticale réduites d'EGM96 et de la topographie

4.7 Réduction des données GPS-nivellement

Les données GPS-nivellement ont été réduites de manière analogue aux déviations de la verticale et sont représentées sur les figures suivantes. La réduction du modèle global a provoqué une diminution bien plus forte des valeurs absolues que dans le cas des déviations de la verticale, et l'influence de la topographie ne contient pas d'éléments à très haute fréquence. Il convient encore de noter que les côtes du géoïde observées (Figure 4-4) sont représentées dans le système de référence CH1903+, les valeurs effectivement utilisées pour le calcul, en ETRS89, n'étant pas très appropriées pour une représentation à cette échelle (autour de 50 m).

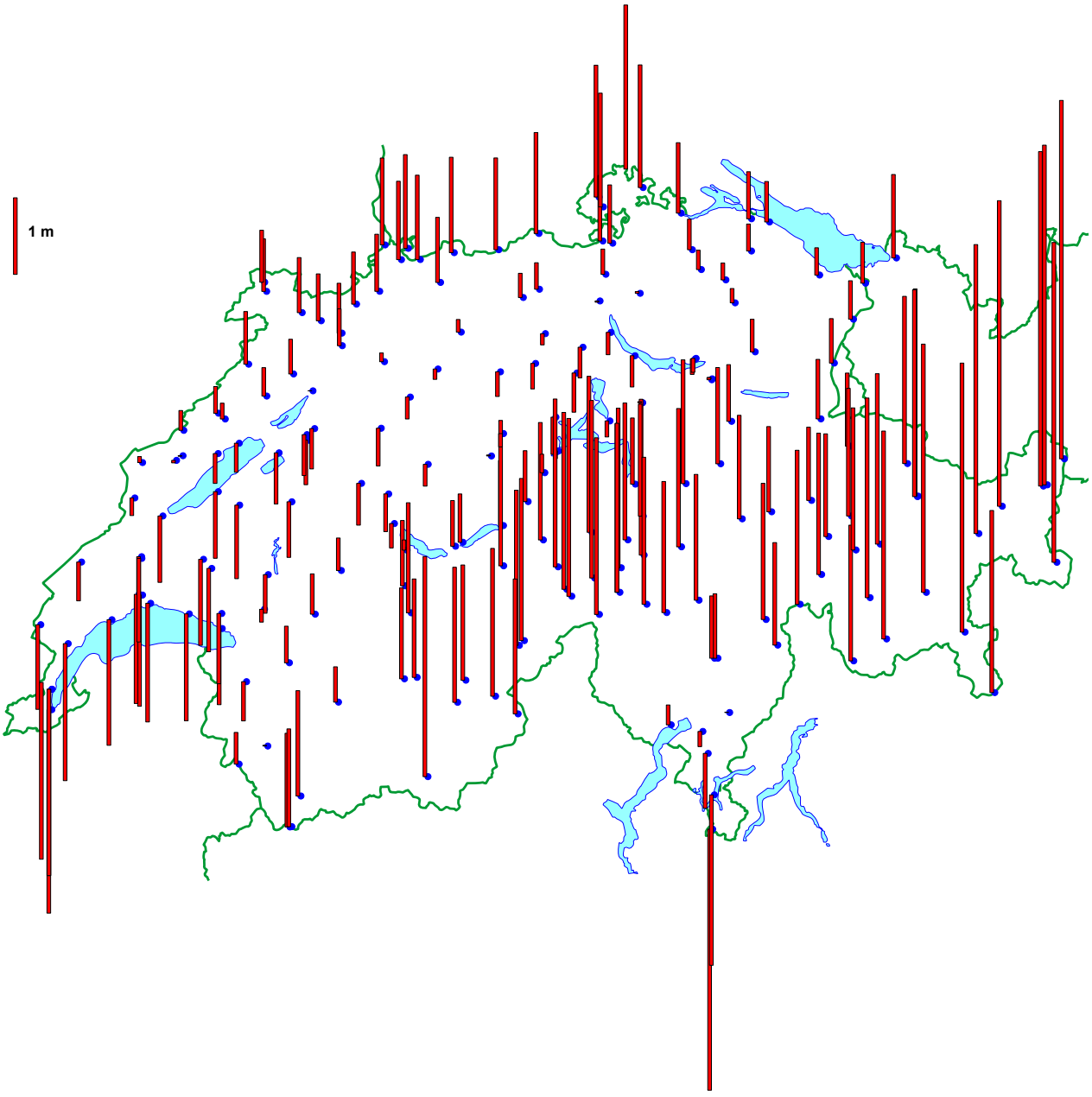


Figure 4-4: Côtes du géoïde observées (GPS-nivellement, dans le système CH1903+)

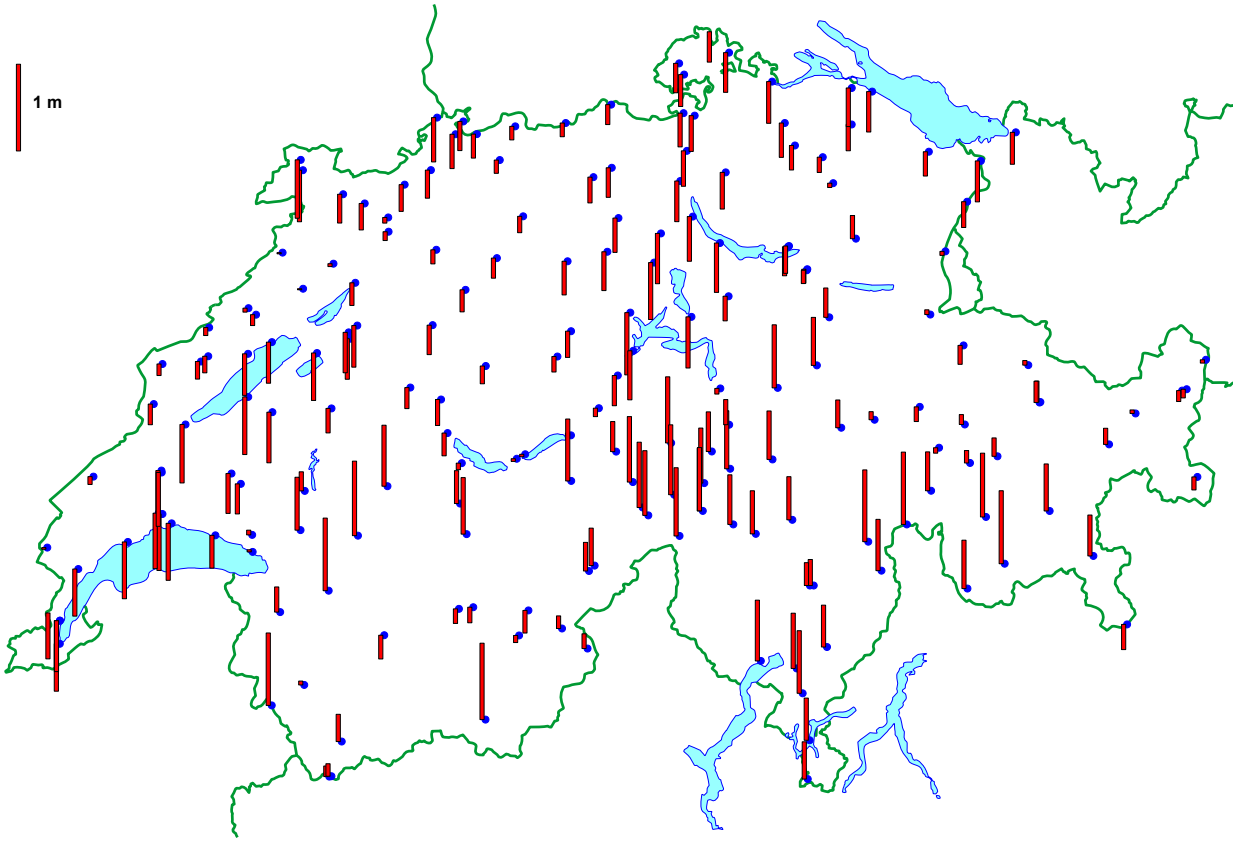


Figure 4-5: Côtes du géoïde réduites d'EGM96

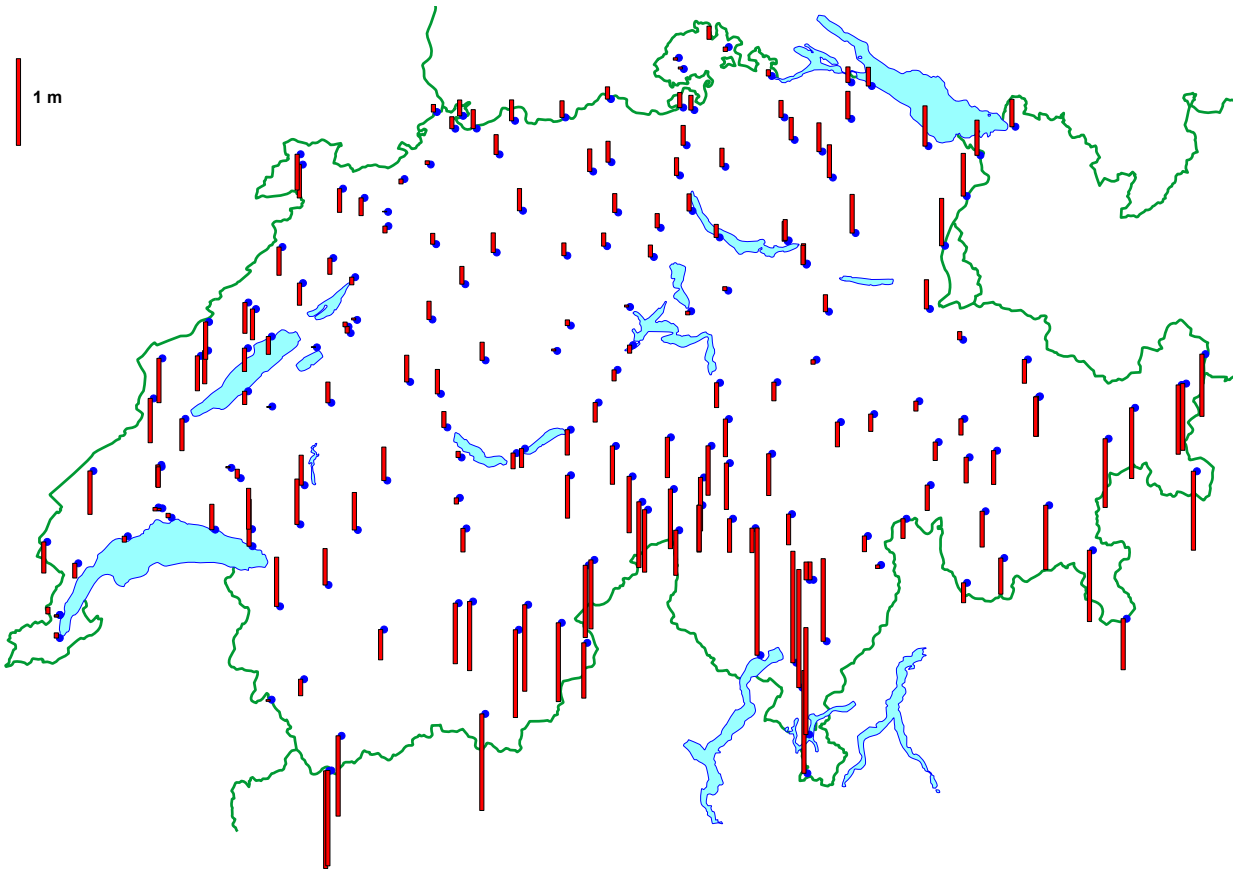


Figure 4-6: Côtes du géoïde réduites d'EGM96 et de la topographie

4.8 Réduction des données gravimétriques

Afin d'être parfaitement exhaustif, le jeu des données gravimétriques réduit est représenté sur la Figure 4-7. Il s'agit là d'anomalies résiduelles, subsistant après la réduction du modèle de référence global EGM96, de l'influence de la topographie et des autres modèles décrits dans les paragraphes précédents. Il ne s'agit donc pas d'anomalies de Bouguer. On distingue deux influences encore comprises dans les résidus : celle du corps d'Ivrea y apparait clairement, et celle due à la modélisation insuffisante des remplissages quaternaires en partie (notamment dans la vallée du Rhône inférieur).

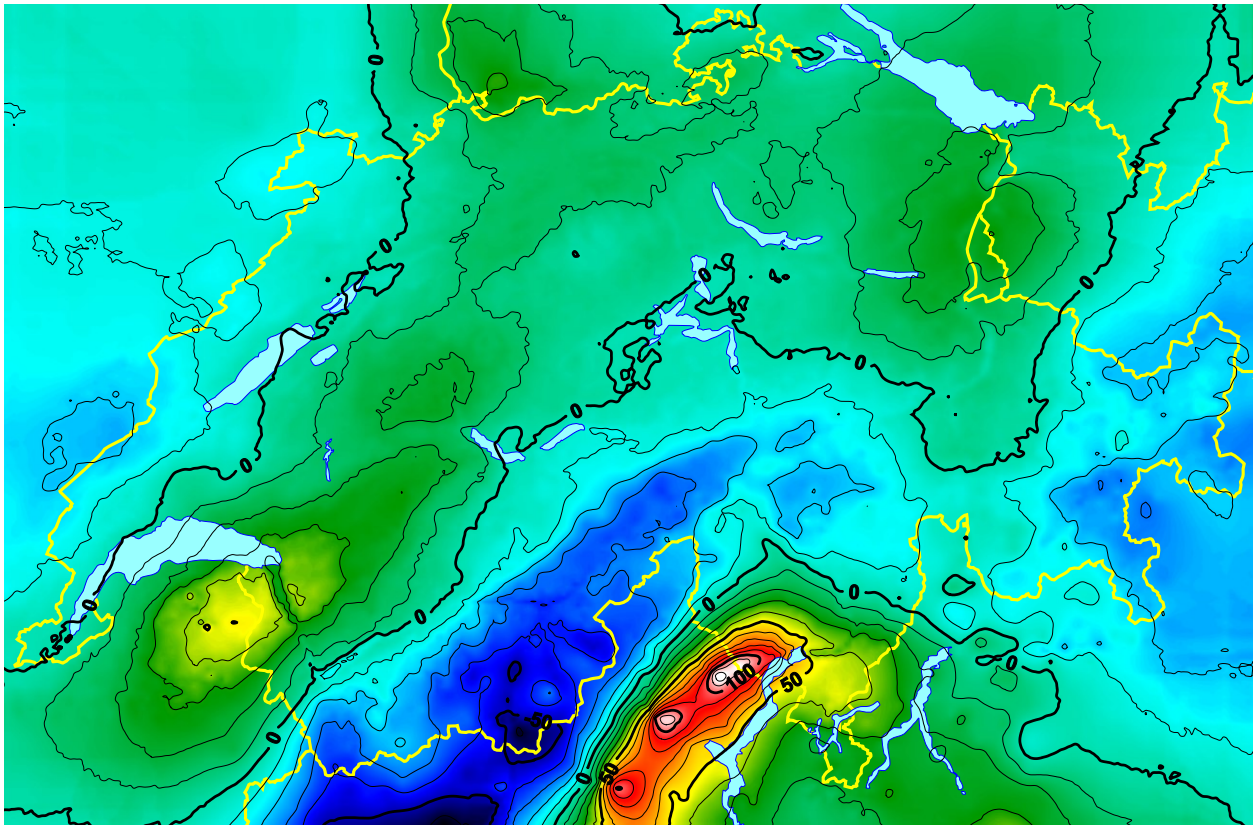


Figure 4-7: Données gravimétriques réduites (équidistance des isolignes: 10 mGal)

5 Prédiction du cogéoïde

5.1 Méthode de calcul

La méthode utilisée pour le calcul de CHGeo98 a été conservée. Cette technique de retrait – calcul – restauration (remove-compute-restore) est décrite plus en détail dans [Marti, 1997]. Le calcul du géoïde comprend donc trois étapes principales, à savoir : 1. Réduction des données brutes de l'influence des modèles de masse connus ; 2. Interpolation du champ résiduel via une collocation par la méthode des moindres carrés et enfin 3. Ajout de l'effet des modèles de masse préalablement réduites au niveau de la mer afin d'obtenir le modèle du géoïde, et à l'altitude des stations pour obtenir le quasi-géoïde, compatible avec les altitudes normales.

Au vu des expériences réalisées dans le cadre du calcul pour CHGeo98, le modèle de covariance utilisé pour la collocation n'a pas été réexaminé, son influence étant minime. Le modèle de Markov 2D du troisième ordre a été réutilisé. Seuls les paramètres de la fonction de covariance (d_0 et σ_0) ont dû être redéterminés, puisque d'autres données, réduites différemment, ont été utilisées. Ils ont été déterminés de manière empirique avec le programme D0SIG0.

Toutes les variantes de l'estimation des paramètres ont fourni des valeurs similaires. La distance caractéristique d_0 était toujours proche de 40 km et le signal moyen d'une composante de la déviation de la verticale σ_0 oscillait autour de 5 secondes d'arc. Il s'agit là de valeurs bien supérieures à ce qu'elles étaient pour CHGeo98, mais elles s'expliquent par les réductions différentes et les signaux plus élevés dans CHGeo2004. Ces valeurs ont été introduites ainsi pour la plupart des variantes calculées et pour la solution définitive. Des tests réalisés avec des valeurs différentes pour d_0 (par exemple 30 km) ont montré que les côtes du géoïde calculées sur le territoire suisse variaient de moins d'un centimètre.

C'est le programme HITCOL qui a servi pour la prédiction elle-même, fournissant les résultats suivants : vecteur de corrélation, valeurs prédites (déviations de la verticale, valeurs gravimétriques et côtes du cogéoïde) sur les points d'appui et écart-type relatif d'une côte du cogéoïde par rapport à un point de référence (nous avons choisi la géostation de Zimmerwald) sur les points d'appui et selon une grille régulière. De plus, contrairement au calcul de CHGeo98, le programme a été complété afin que la matrice de variance/covariance complète entre les points de GPS-nivellement soit exportée.

5.2 Calculs des variantes

Différentes variantes du géoïde ont été calculées. Elles se distinguent notamment les unes des autres par le type et le nombre de mesures utilisées et par la pondération de ces données. Quelques essais ont aussi été réalisés en faisant varier les paramètres de collocation.

Les solutions suivantes ont notamment été calculées :

- gravimétrie seule
- déviations de la verticale seules
- uniquement GPS-nivellement
- déviations de la verticale et gravimétrie
- déviations de la verticale et GPS-nivellement
- gravimétrie et GPS-nivellement
- toutes les données disponibles en variant la pondération des mesures de GPS-nivellement (contraintes, écart-type de 1 cm, écart-type de 3 cm)
- toutes les données disponibles, mais en omettant la moitié des points de GPS-nivellement.

Ces calculs ont livré les résultats suivants :

- le vecteur de corrélation pour une utilisation ultérieure (prédiction sur des points quelconques)
- les valeurs prédites (gravimétrie, déviations de la verticale, côtes du cogéoïde sur tous les points d'appui ainsi que les résidus sur les mesures), de même que l'écart-type de la côte du cogéoïde par rapport à Zimmerwald
- les côtes du cogéoïde selon une grille régulière de 1x1 km
- l'écart-type de la côte du cogéoïde par rapport à Zimmerwald sur une grille régulière (il n'a pas été calculé pour toutes les variantes)
- la matrice de variance/covariance complète entre les points de GPS-nivellement (elle n'a pas été calculée pour toutes les variantes).

A titre d'exemples de variantes calculées, les figures suivantes présentent le cogéoïde d'une solution intégrant toutes les observations (Figure 5-1) et celui résultant de la gravimétrie et des déviations de la verticale (Figure 5-2).

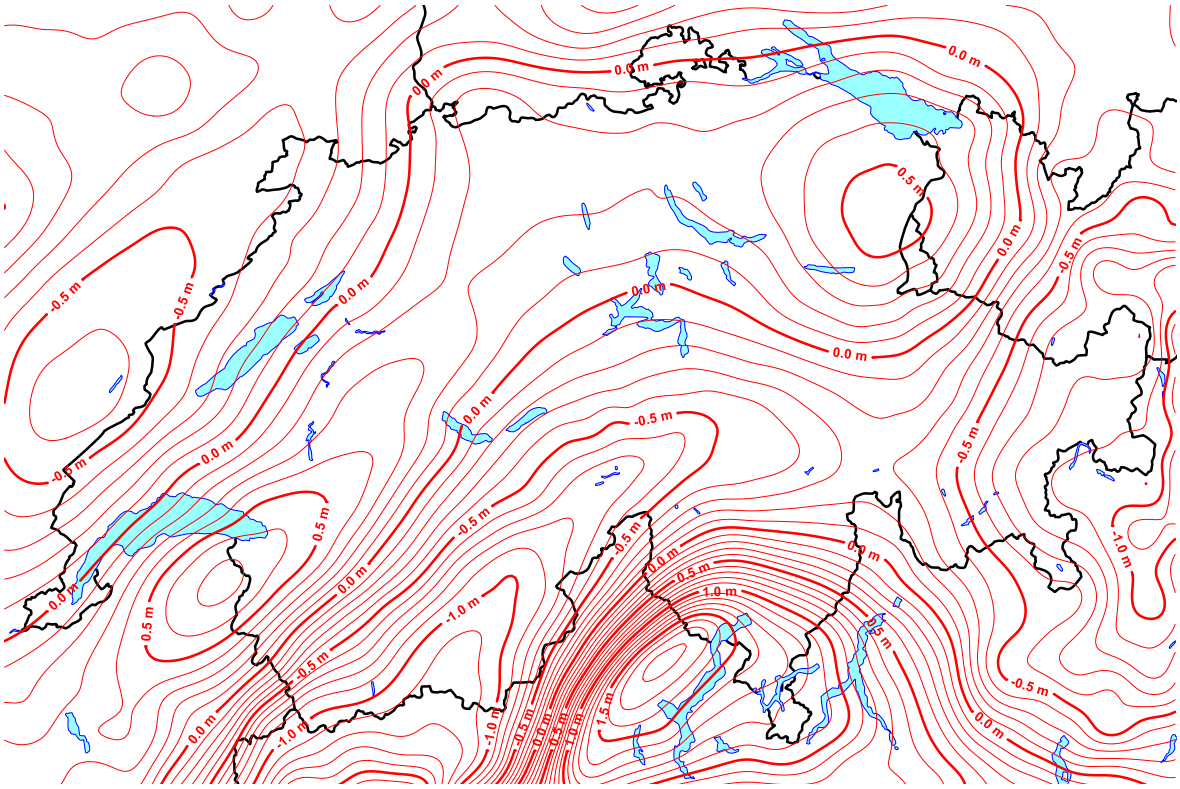


Figure 5-1: Cogéoïde issu de la gravimétrie, des déviations de la verticale et du GPS-nivellement

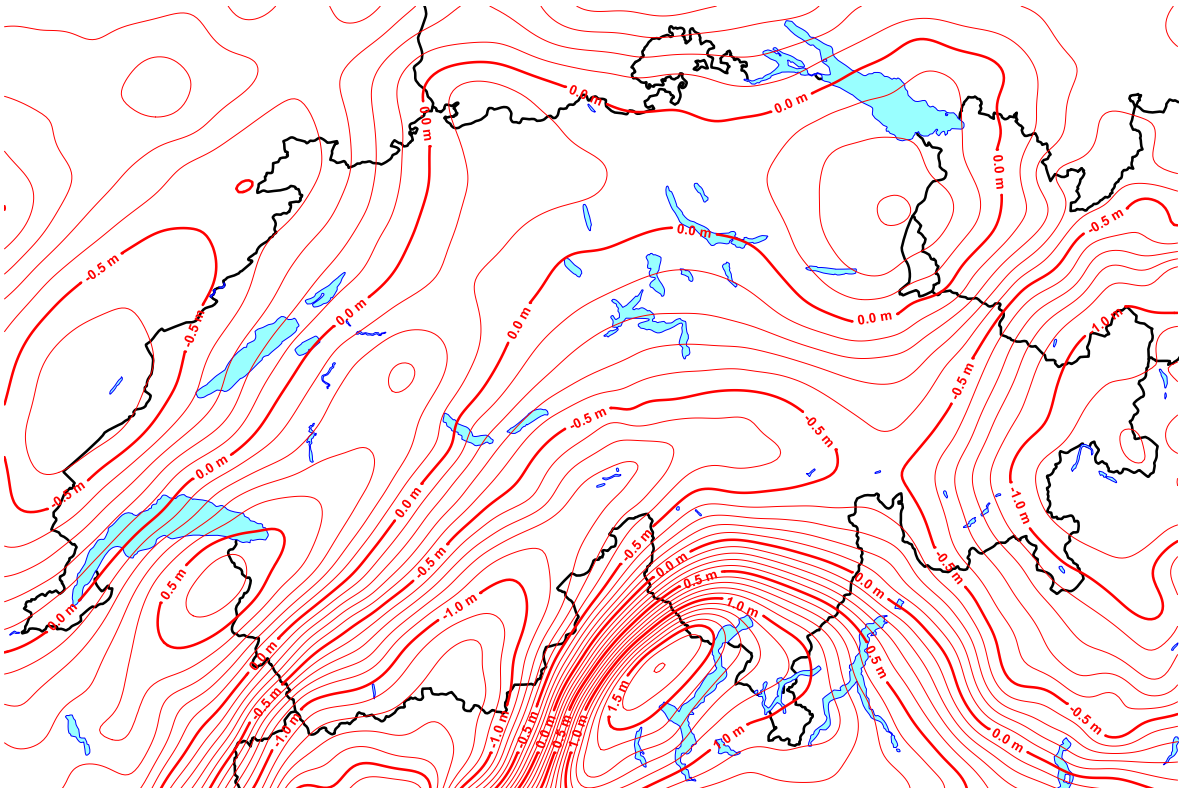


Figure 5-2: Cogéoïde issu de la gravimétrie et des déviations de la verticale

Les deux solutions semblent relativement proches à première vue et présentent les caractéristiques principales suivantes : les côtes du cogéoïde évoluent entre -1,3 m dans le sud du Valais ou dans le Val

Müstair (minimum) et 1,5 m à l'ouest de Locarno (maximum). On trouve aussi des maximas locaux au sud du lac Léman et en Suisse orientale, tandis qu'un minimum local est relevé dans le Jura. Le signal est fort dans le nord de l'Italie et au Tessin parce que le corps d'Ivrea n'a pas été réduit avant la collocation. L'image générale est très fortement corrélée avec les valeurs gravimétriques réduites présentées sur la Figure 4-7. La Figure 5-3 indique les écarts entre les deux solutions, faisant apparaître quelques grandes différences. Elles sont nulles à Zimmerwald (c'est aussi un point de positionnement pour la solution «astro+gravimétrie») et le redeviennent lorsqu'on s'éloigne de la frontière Suisse, les mesures de GPS-nivellement synthétiques (cf. § 2.4) ayant été conservées dans le calcul des deux variantes, afin d'éviter une dérive de la solution. Cela reste toutefois sans conséquence sur le territoire suisse.
Toutes les autres différences sont positives et croissent systématiquement vers l'est pour dépasser 20 cm. Elles augmentent aussi en direction du Valais où elles dépassent 10 cm. Cela montre que des écarts systématiques persistent entre les mesures de GPS-nivellement d'une part et celles issues de la gravimétrie et des déviations de la verticale d'autre part. Ces écarts ne peuvent pas s'expliquer de manière simple. Ils pourraient déjà être dus aux mesures elles-mêmes, mais rien ne l'indique pour l'instant. Ils pourraient également provenir d'une réduction incohérente des données (due par exemple à une extension insuffisante du modèle topographique), mais là non plus, il n'y a pas d'indices concrets.
La cause de ces inhomogénéités n'a pas pu être décelée lors du calcul de CHGeo2004. Une solution s'appuyant très largement sur les mesures GPS-nivellement a cependant été retenue pour la publication du géoïde, afin de minimiser les résidus sur ces points et de rester cohérent avec le système altimétrique RAN95.

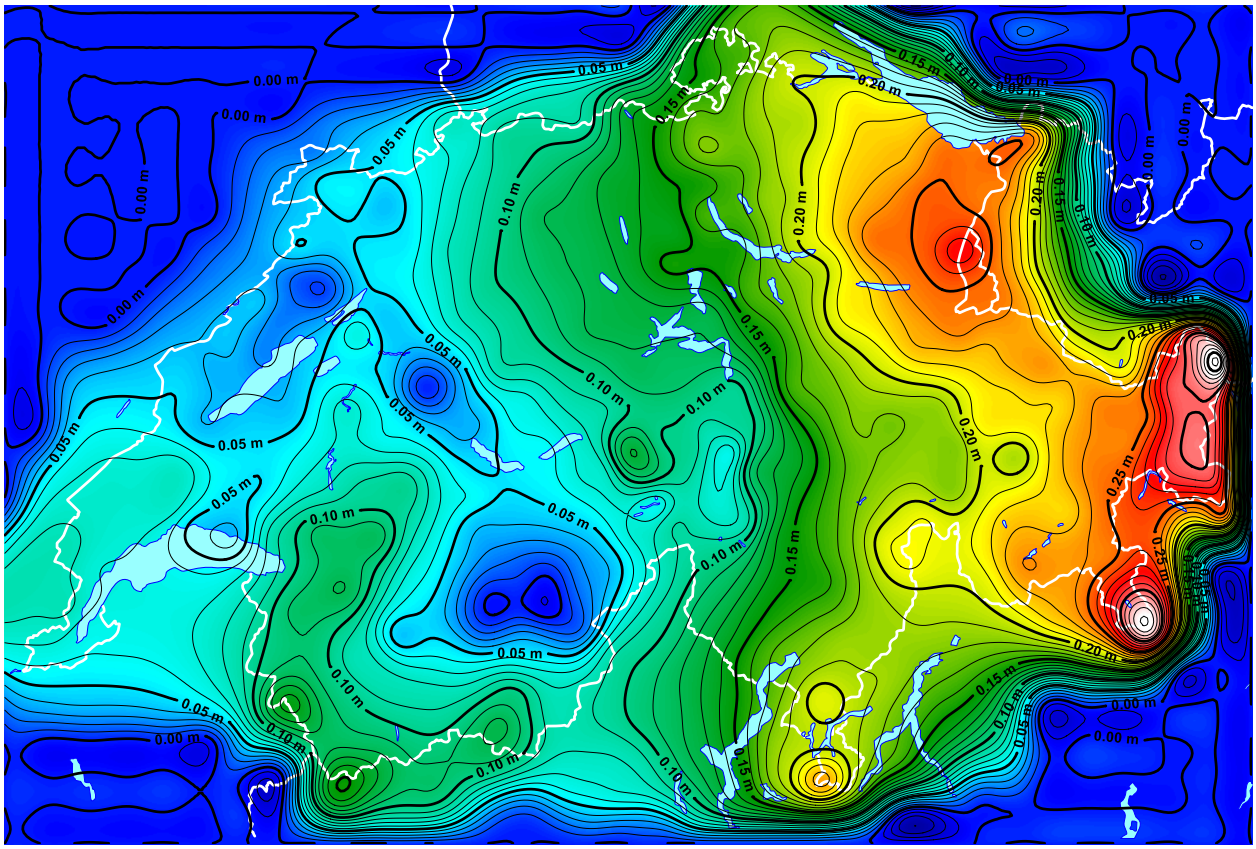


Figure 5-3: Différence entre la solution intégrant toutes les mesures («solution combinée») et celle résultant uniquement de la gravimétrie et des déviations de la verticale

Les figures suivantes présentent quelques autres comparaisons de variantes de solutions. La Figure 5-4 présente les écarts entre la solution combinée et une solution purement gravimétrique (positionnée sur Zimmerwald). L'image générale correspond plus ou moins à celle de la Figure 5-3. Les différences croissent cependant de manière un peu moins prononcée vers l'est. Ici aussi, on retrouve les mêmes grands écarts en Basse-Engadine et dans le Val Poschiavo. Les fortes différences dans la zone d'Ivrea résultent du très faible nombre de mesures gravimétriques qui y sont disponibles, si bien que le géoïde tire l'essentiel de sa forme des déviations de la verticale.

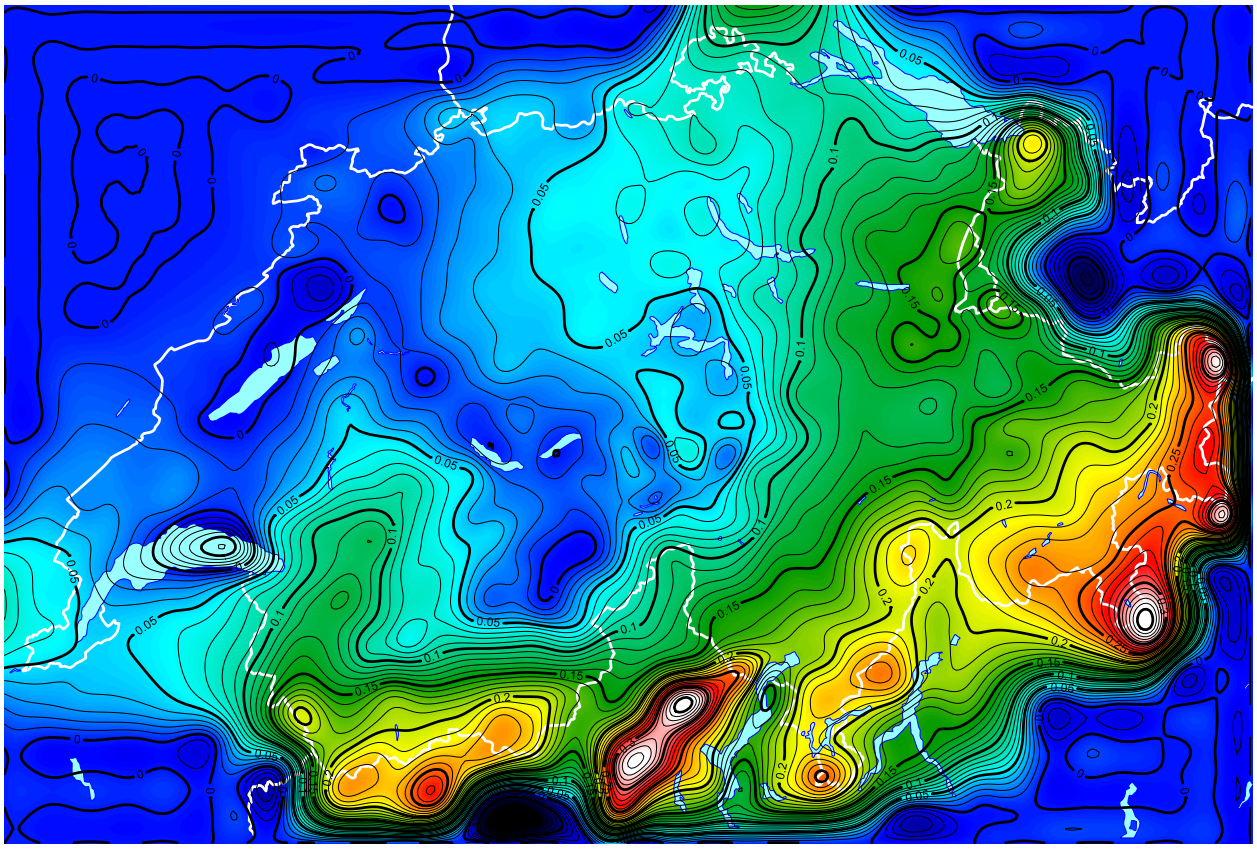


Figure 5-4: Différence entre la solution combinée et celle purement gravimétrique

Les écarts entre la solution combinée et celle purement astro-géodésique (Figure 5-5) présentent une fois encore la même image d'ensemble, à savoir une hausse des différences, essentiellement vers l'est. Les valeurs sont cependant plus élevées que dans les variantes décrites précédemment. En Basse-Engadine, elles dépassent 30 cm. La responsabilité du maximum local à Innertkirchen a pu être attribuée ultérieurement à une mesure de déviation de la verticale problématique à Gadmen.

La Figure 5-6 présente les écarts entre la solution combinée et un calcul purement basé sur le GPS-nivellement. Sur le sol suisse, les différences sont nettement plus faibles ici que dans les comparaisons précédentes. Cela montre à quel point ces mesures conditionnent la forme générale de la solution combinée. Des écarts plus importants n'apparaissent que dans des zones dépourvues de mesures GPS-nivellement. En Suisse, il s'agit surtout de la région de la Jungfrau, de certaines vallées transversales au sud du Valais ou du Valle Maggia et de la vallée des Centovalli. Il n'y a pas non plus de ligne du nivellement fédéral dans ces différents secteurs. Il serait par conséquent important de disposer d'un nombre suffisant d'autres mesures dans de tels secteurs pour la détermination du géoïde, ce qui n'est cependant pas le cas en règle générale. Les maximas et les minimas locaux indiquent également où il pourrait être judicieux de déterminer des points GPS-nivellement supplémentaires (si cela est possible du point de vue des lignes du nivellement fédéral). Il pourrait par exemple en être ainsi aux alentours de Schüpfen (entre Berne et Bienne), à proximité de Saint-Brais (dans les Franches-Montagnes), près de Saint-Gingolph (extrémité sud-est du lac Léman) et entre Ponte Tresa et Monteggio.

La Figure 5-7 présente les écarts entre deux solutions combinées : valeurs GPS-nivellement maintenues fixes dans un cas, associées à un écart-type de 3 cm dans l'autre. Ici aussi, les deux solutions divergent à mesure que l'on se dirige vers l'est, mais de façon nettement moins prononcée, évidemment. Ces différences coïncident très bien avec les résidus du GPS-nivellement de CHGeo98, déterminé avec la même stratégie de rattachement libre-ajusté. Les écarts supérieurs à 20 cm enregistrés en Basse-Engadine ne peuvent pas être compensés par l'introduction d'une légère contrainte sur les mesures de GPS-nivellement.

La Figure 5-8 présente enfin les différences entre deux solutions combinées : toutes les données sont utilisées dans un cas et seule la moitié environ des points GPS-nivellement l'est dans l'autre. Les écarts sont généralement inférieurs à 1 cm. Cela signifie que nous disposons globalement en Suisse d'une densité suffisante de points GPS-nivellement.

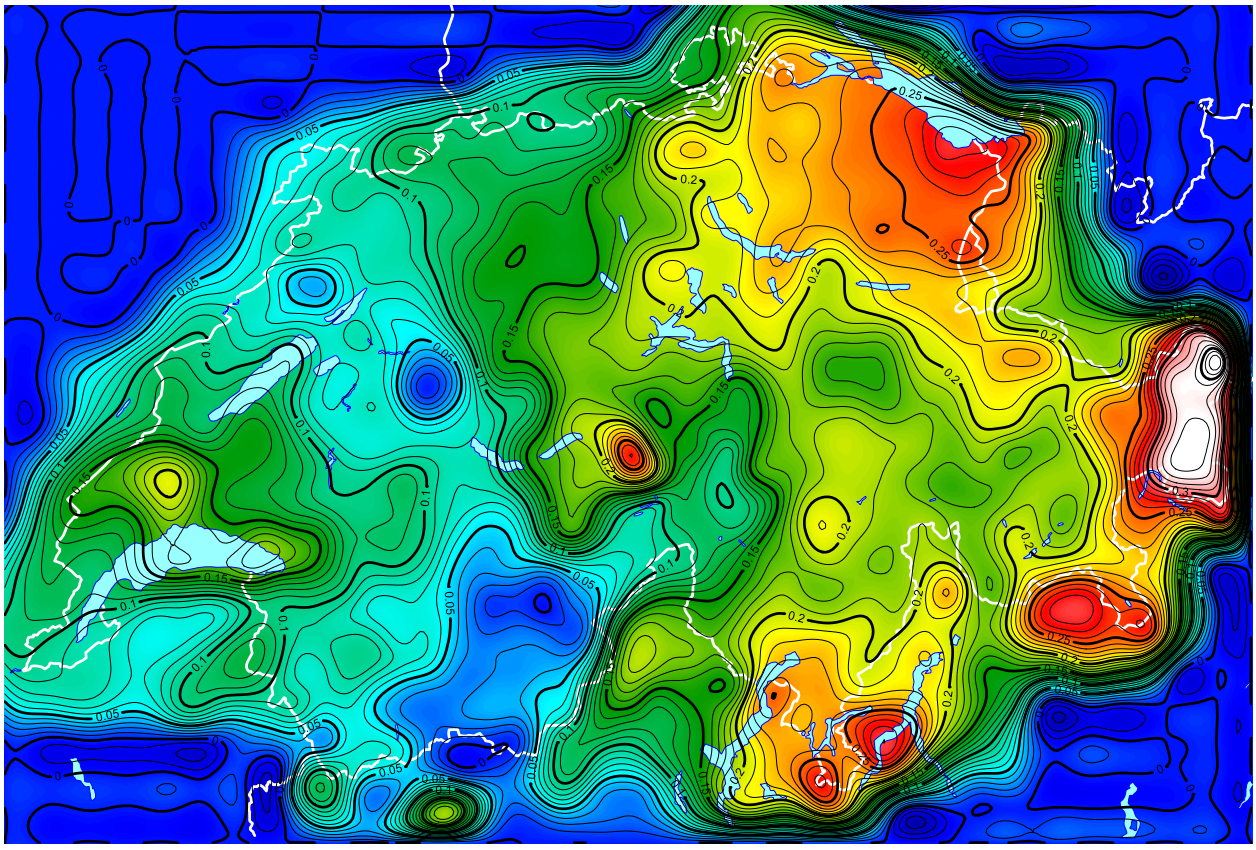


Figure 5-5: Différence entre la solution combinée et une autre purement astro-géodésique

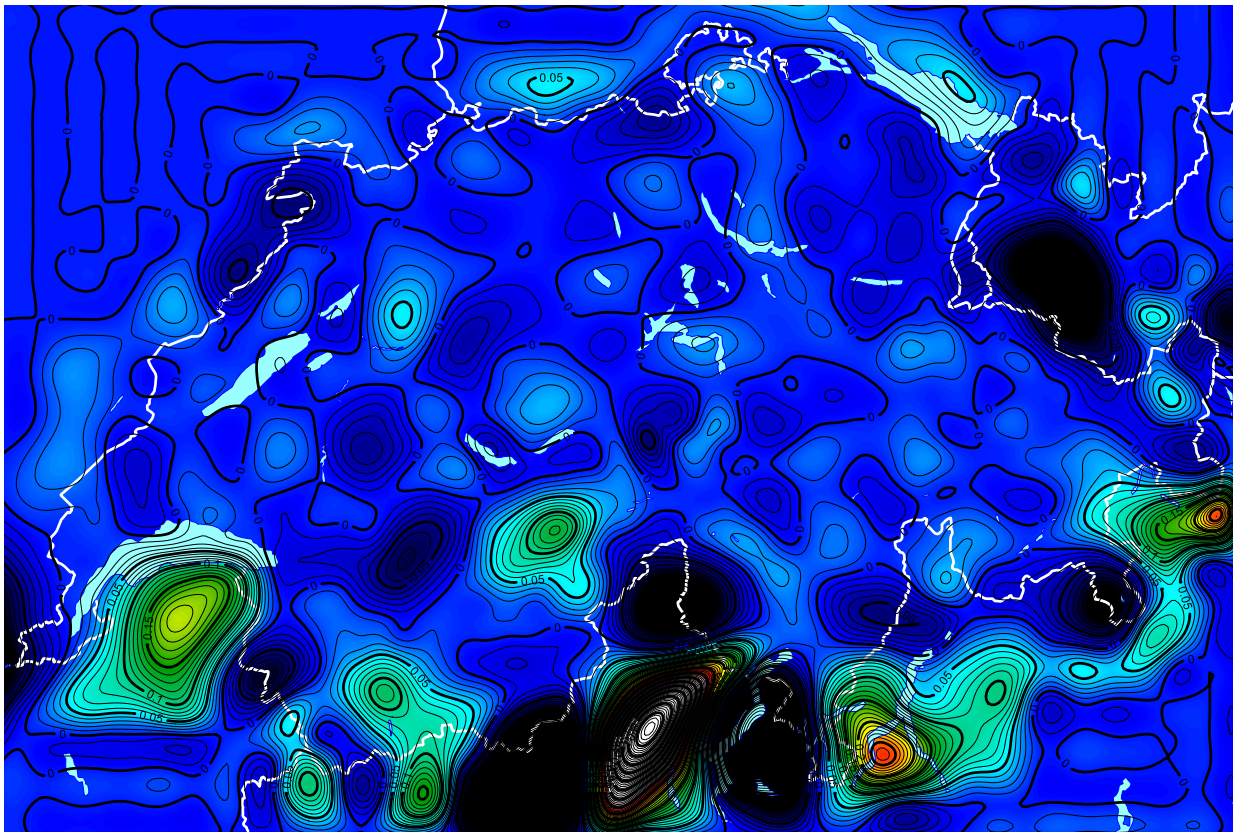


Figure 5-6: Différence entre la solution combinée et une autre purement «GPS-nivellement»

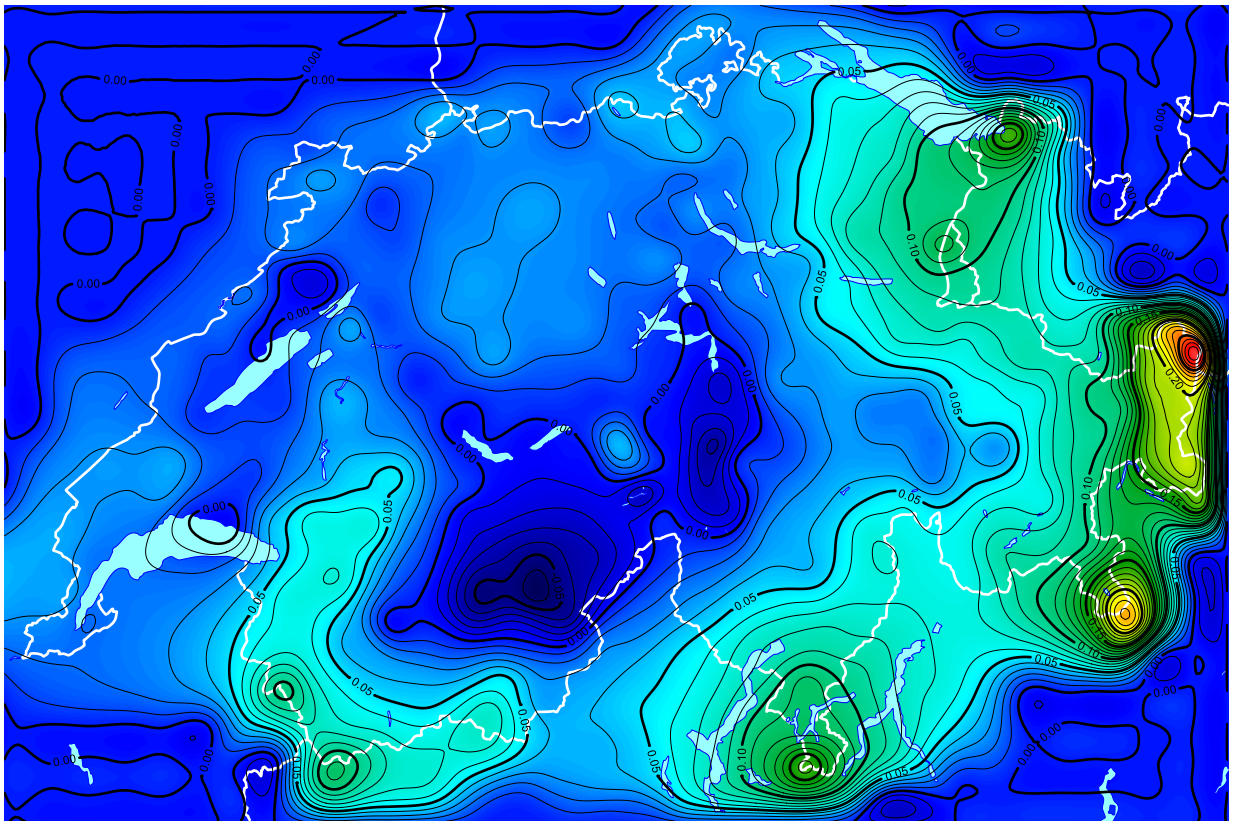


Figure 5-7: Différence entre deux solutions combinées : mesures GPS-nivellement maintenues fixes dans un cas, mesures GPS-nivellement avec un écart-type de 3 cm dans l'autre

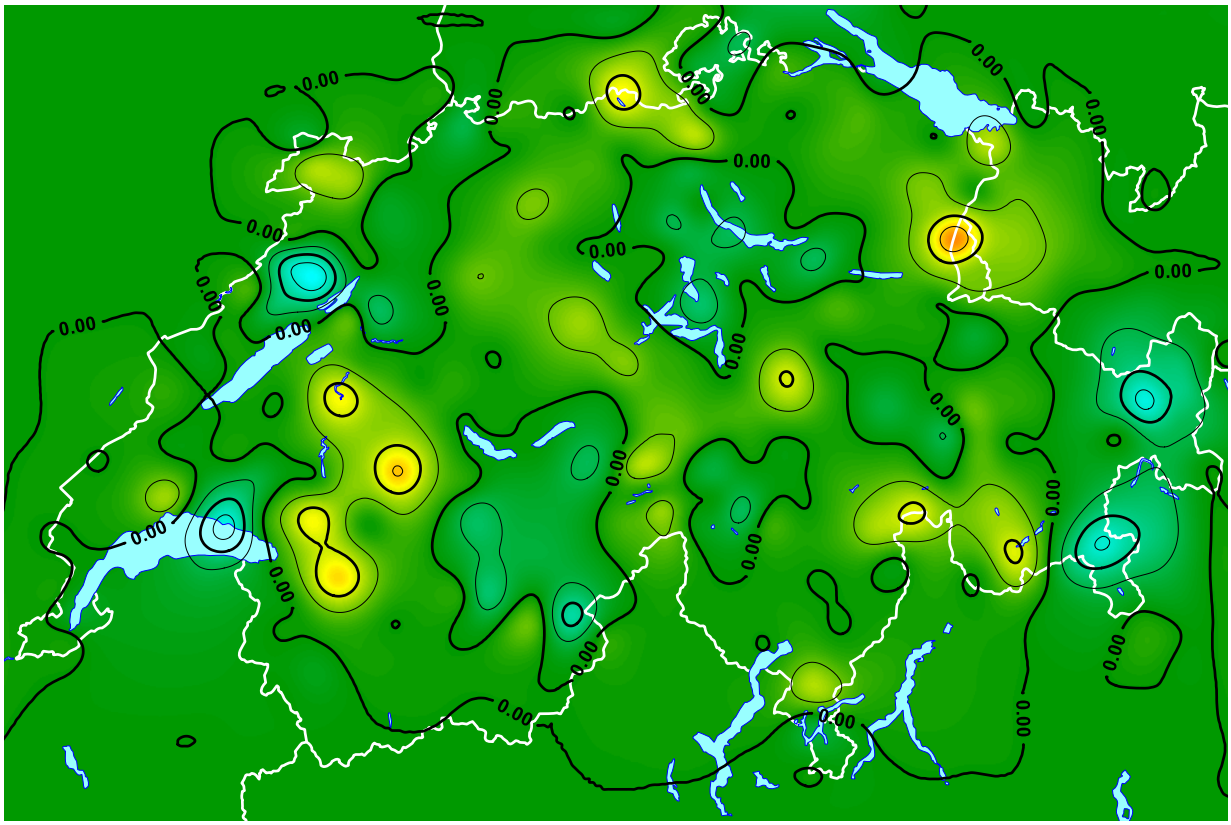


Figure 5-8: Différence entre deux solutions combinées : mesures GPS-nivellement maintenues fixes dans un cas et moitié seulement des données GPS-nivellement utilisée dans l'autre (équidistance des isolignes: 5 mm)

5.3 Précision des solutions prédites

La collocation par la méthode des moindres carrés permet aussi de déterminer la précision d'une valeur prédite. La précision relative des côtes du géoïde par rapport à Zimmerwald a donc été calculée selon une grille régulière pour chacune des variantes envisagées. Toutefois, les précisions ainsi obtenues sont généralement très optimistes car les incohérences systématiques entre les différents jeux de données n'y sont pas prises en compte. En effet, des trends à grande échelle peuvent par exemple être masqués par des résidus très faibles sur les déviations de la verticale mais cependant à caractère systématique.

Les précisions relatives calculées pour une solution combinée avec les mesures GPS-nivellement pratiquement fixes sont représentées sur la Figure 5-9. En effet, la précision descend pratiquement à 0 sur chaque point GPS-nivellement. L'écart-type croît de quelques millimètres entre eux, mais atteint rarement 5 mm. Les secteurs où les écarts-types sont les plus élevés sont majoritairement situés à l'écart du nivellement fédéral (région de la Jungfrau, Napf, vallée de Vals, …). Les zones où des points GPS-nivellement pourraient éventuellement améliorer la situation sont très peu nombreuses. Il s'agit pour l'essentiel de celles déjà citées au paragraphe précédent (Franches-Montagnes, Saint-Gingolph, Valle Maggia, …). Selon cette figure, le seul endroit vers lequel une station GPS-nivellement supplémentaire serait utile est sans doute l'extrémité nord du lac de la Gruyère. De plus, l'introduction des points de GPS-nivellement synthétiques hors du territoire suisse explique le modèle régulier marqué qu'on y constate.

Ces mesures de GPS-nivellement exemptes de toute erreur ne sont naturellement pas réalistes. C'est pourquoi les erreurs relatives d'une solution combinée avec un positionnement non contraint (écart-type de 3 cm) sont présentées sur la Figure 5-10. Les points synthétiques à l'étranger ont également été omis. On note alors que la précision croît relativement vite autour de Zimmerwald pour atteindre 5 mm. Elle reste pratiquement constante sur l'ensemble du territoire (toute la Suisse est dans une fourchette de ±1 cm), mais décline très vite dès que l'on quitte les régions avec une densité d'observations non-négligeable. Cependant, la précision ainsi définie reste bien trop optimiste en raison des systématismes présents dans les mesures, comme le montrent les écarts effectifs entre les solutions présentées au paragraphe précédent.

Enfin, la précision d'une solution purement astro-géodésique est présentée sur la Figure 5-11. Elle indique qu'une détermination purement astro-géodésique du géoïde avec les mesures disponibles en Suisse est possible avec une précision de l'ordre de 3 cm. Cette valeur est nettement inférieure à celle fournie dans [Marti, 1997]. Elle s'explique par la grande précision des déviations de la verticale mesurées en 2003 avec les caméras zénithales numériques.

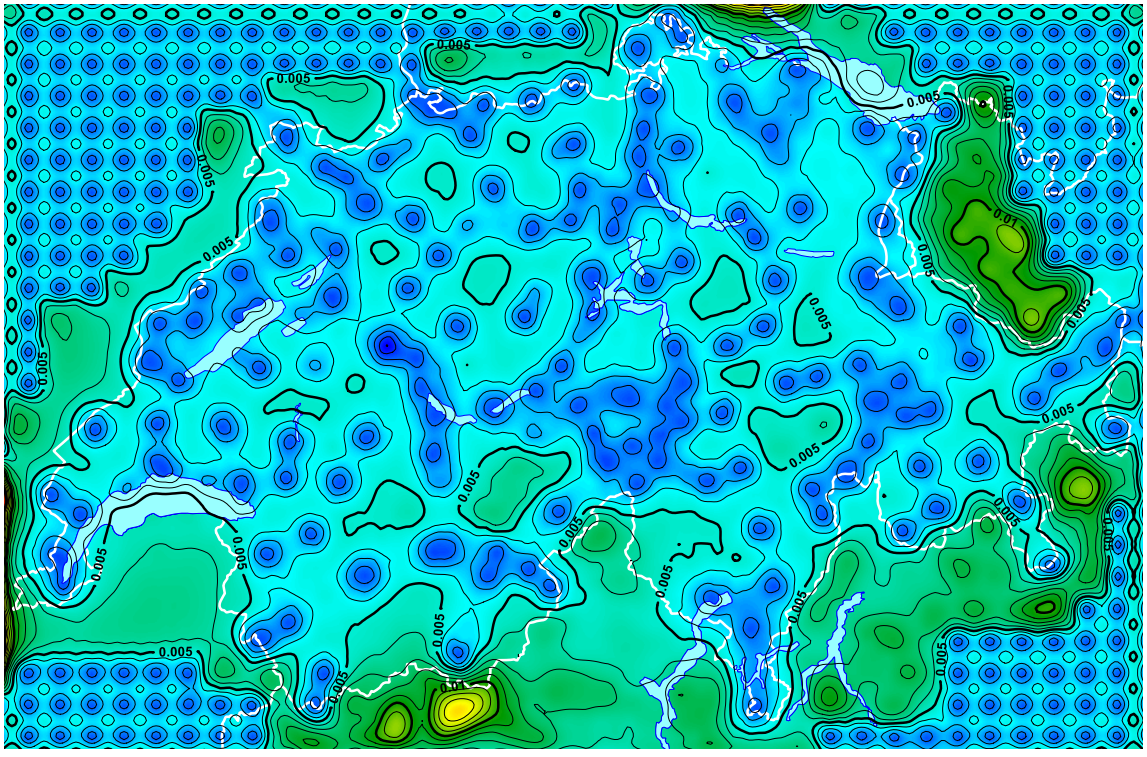


Figure 5-9: Erreur relative de la solution combinée avec les points GPS-nivellement contraints (équidistance des isolignes: 1 mm)

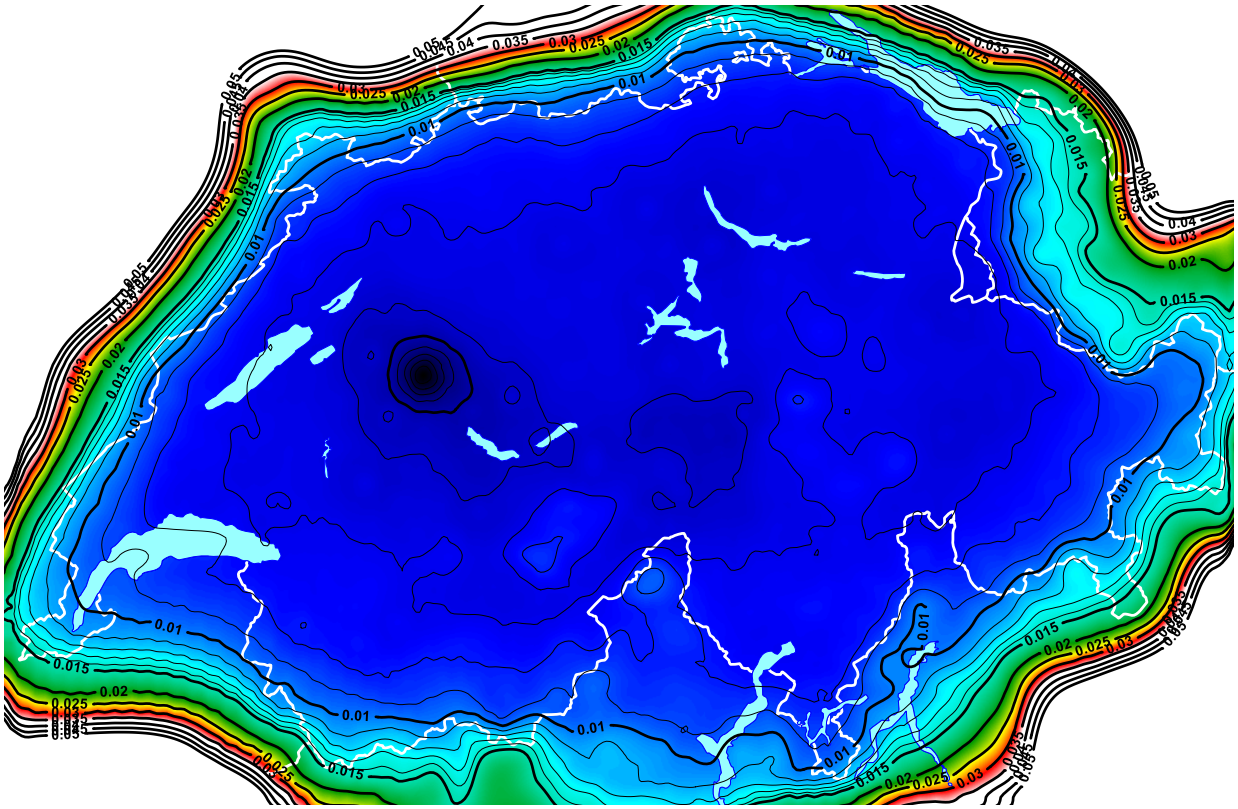


Figure 5-10: Erreur relative d'une solution combinée avec un écart-type de 3 cm sur les points GPS-nivellement (équidistance des isolignes: 1 mm)

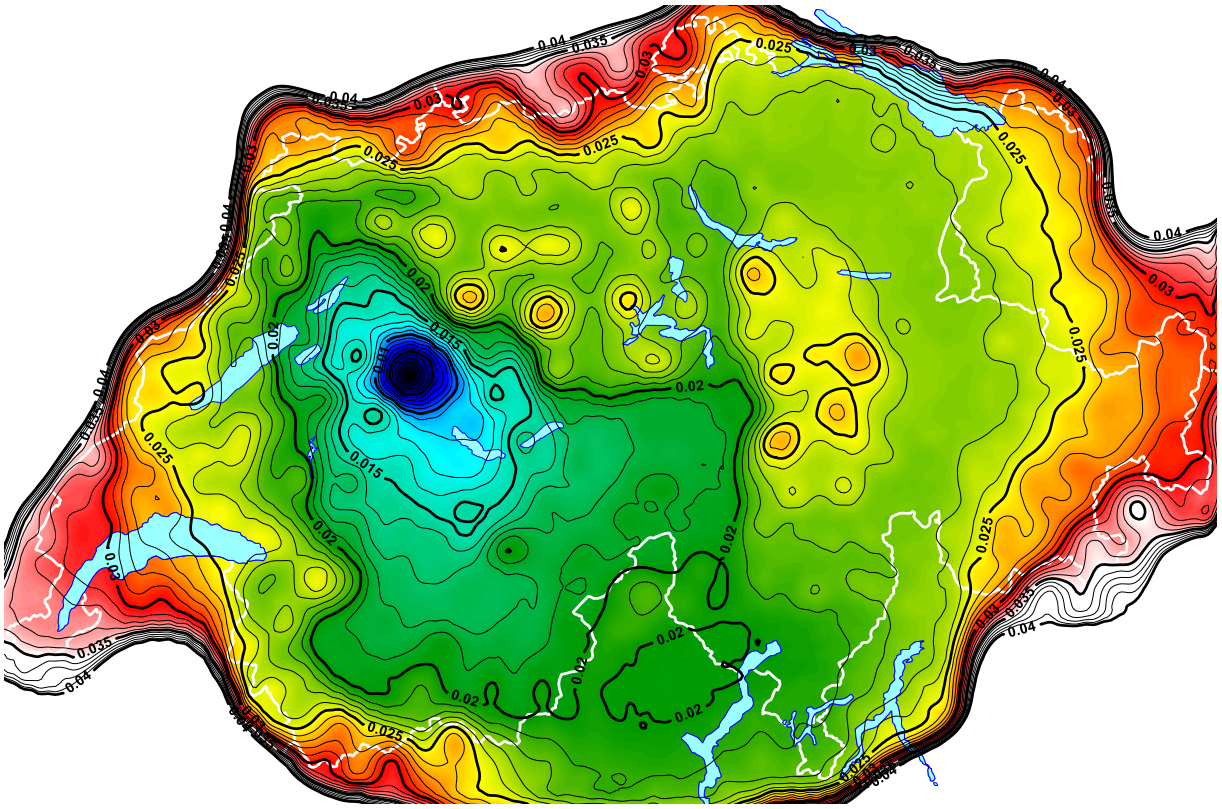


Figure 5-11: Erreur relative de la solution purement astro-géodésique (équidistance des isolignes: 5 mm)

5.4 La solution définitive retenue pour le cogéoïde

Pour que le modèle de géoïde puisse être utilisé par tout un chacun, il a fallu sélectionner une des variantes calculées et la publier en qualité de solution définitive. Le critère principal de cette sélection a été de tenir compte du bénéfice retiré par l'utilisateur final désireux de déterminer des altitudes à l'aide de mesures GNSS. Ce type d'utilisateurs a besoin d'un système altimétrique cohérent, pour lequel la différence entre l'altitude ellipsoïdale et la côte du géoïde correspond exactement à l'altitude orthométrique. Le choix s'est donc porté sur la solution contrainte sur les mesures GPS-nivellement jugées bonnes.

5.5 Les résidus des observations

Les résidus subsistant après la collocation sont présentés sur les figures suivantes. La Figure 5-12 concerne les déviations de la verticale. Elle permet de constater l'excellente qualité des erreurs résiduelles (les résidus sont généralement inférieurs à une seconde d'arc). On note cependant quelques fautes grossières. A cette échelle, aucun systématisme ne peut être identifié dans les résidus. C'est pourquoi la même information a été présentée sur la Figure 5-13 en l'agrandissant cinq fois. Les résidus les plus faibles apparaissent aussi plus clairement. A première vue, on ne décèle aucun systématisme majeur, mais tous les résidus pointent dans la même direction dans certaines zones. A titre d'exemple, on citera ici le sud du lac de Zurich avec un basculement systématique de l'ordre de 0.6" (nord-sud). Une tendance peut aussi être identifiée dans la zone comprise entre Sierre et Zweisimmen. Le basculement ouest-est apparaissant dans les calculs des variantes ne s'explique cependant pas avec ces résidus.

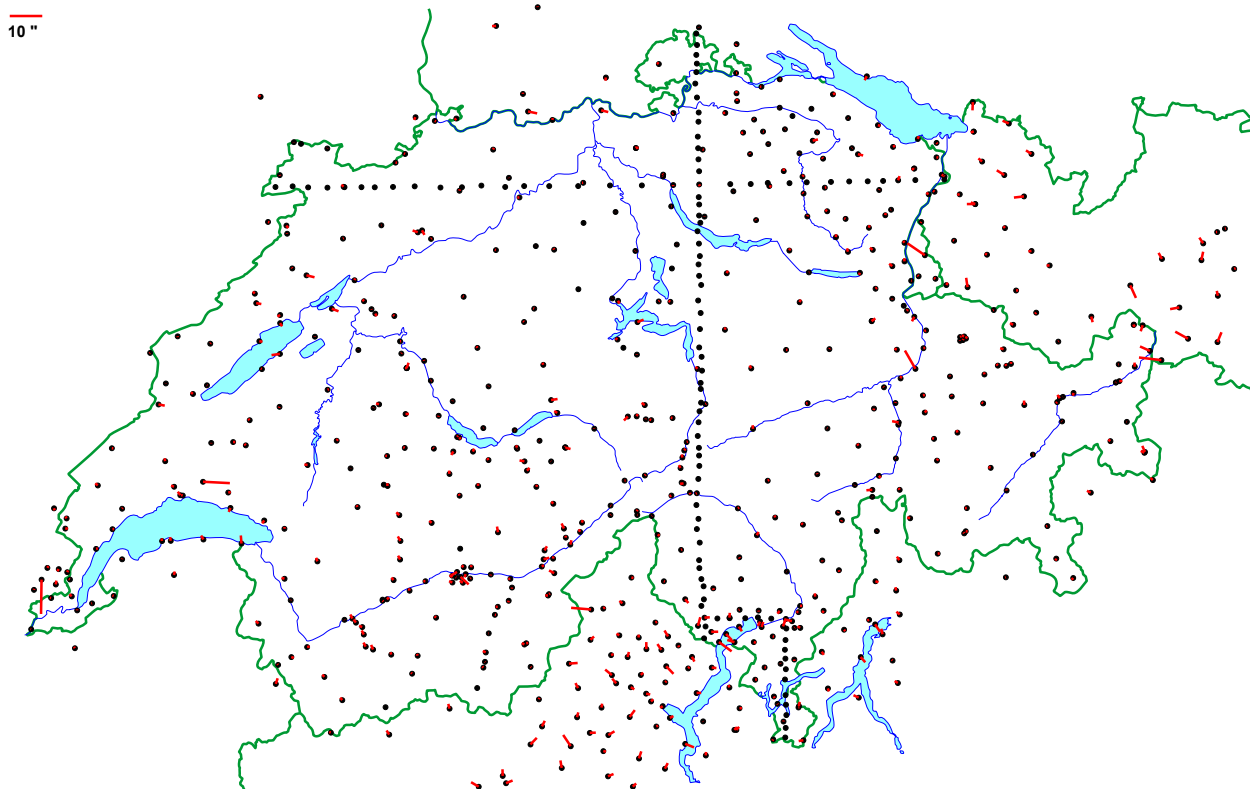


Figure 5-12: Résidus des déviations de la verticale de la solution combinée

Les résidus des mesures GPS-nivellement présentés sur la Figure 5-14 font surtout apparaître le niveau de contrainte de la solution en ces points. Tous les points possédant des altitudes GPS bien déterminées ont été maintenus fixes et les résidus y sont pratiquement nuls. Des résidus de quelques millimètres n'apparaissent que sur des points très proches les uns des autres. Les résidus d'une certaine ampleur concernent tous des points où les altitudes GPS sont plutôt mal déterminées. Dans la plupart des cas, il s'agit de rattachements excentriques du nivellement aux points principaux MN95, uniquement observés avec des récepteurs L1 lors de sessions GPS courtes. Même en ces points, les résidus restants dépassent rarement 1 ou 2 cm, ce que l'on peut clairement considérer comme un résultat satisfaisant.

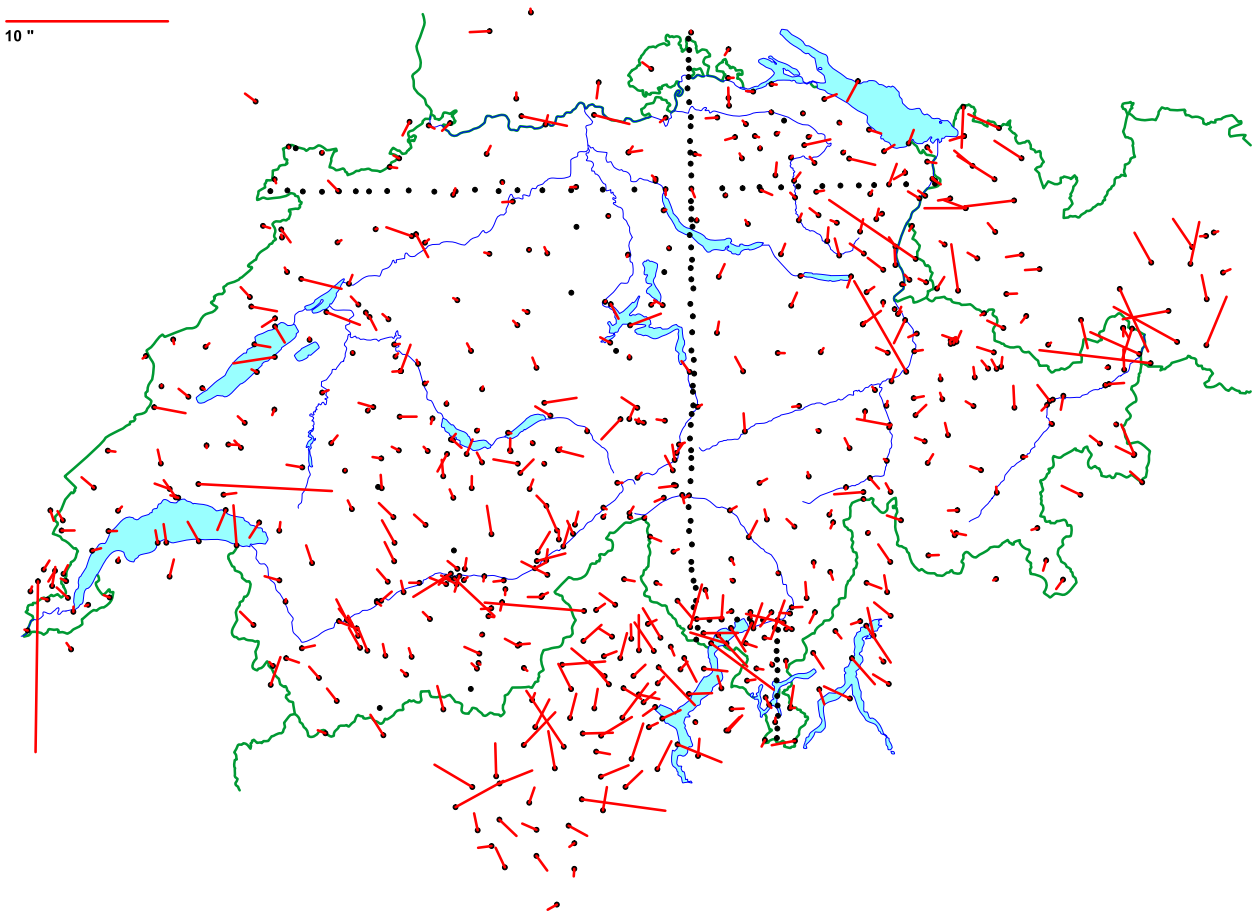


Figure 5-13: Représentation agrandie des résidus des déviations de la verticale

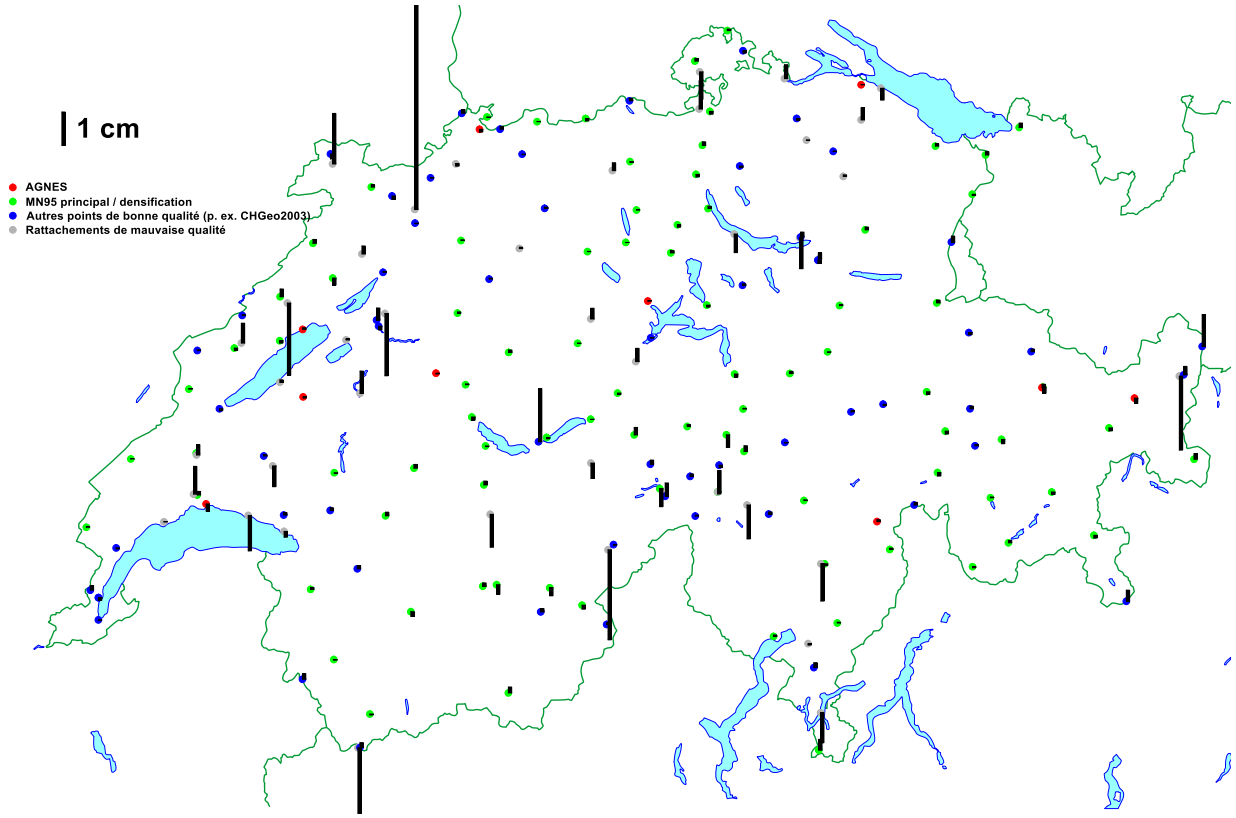


Figure 5-14: Résidus des points GPS-nivellement de la solution combinée

La Figure 5-15 présente enfin les résidus sur les valeurs gravimétriques réduites. Ils s'élèvent au plus à ±1 mGal (ou ± 2 mGal si l'on veut être parfaitement rigoureux) sur la majeure partie du Plateau et dans le Jura, ce qui constitue assurément une approximation de qualité suffisante. Dans les régions alpines et en bordure du périmètre, les résidus atteignent toutefois des valeurs bien supérieures pouvant légèrement excéder 20 mGal. Leur répartition n'est pas non plus aléatoire, puisque des valeurs négatives ou positives dominent dans certaines zones. Les données gravimétriques ne sont donc pas représentées avec une précision très élevée par CHGeo2004 dans l'espace alpin. C'est pourquoi CHGeo2004 n'est pas non plus utilisé pour une interpolation gravimétrique précise. En fait, un programme séparé utilisant directement les valeurs gravimétriques réduites sur les points de mesure y est préféré. Ce module intégré dans QUAWIRK permet de procéder à des interpolations gravimétriques avec une précision de 1 à 2 mGal également dans l'espace alpin.

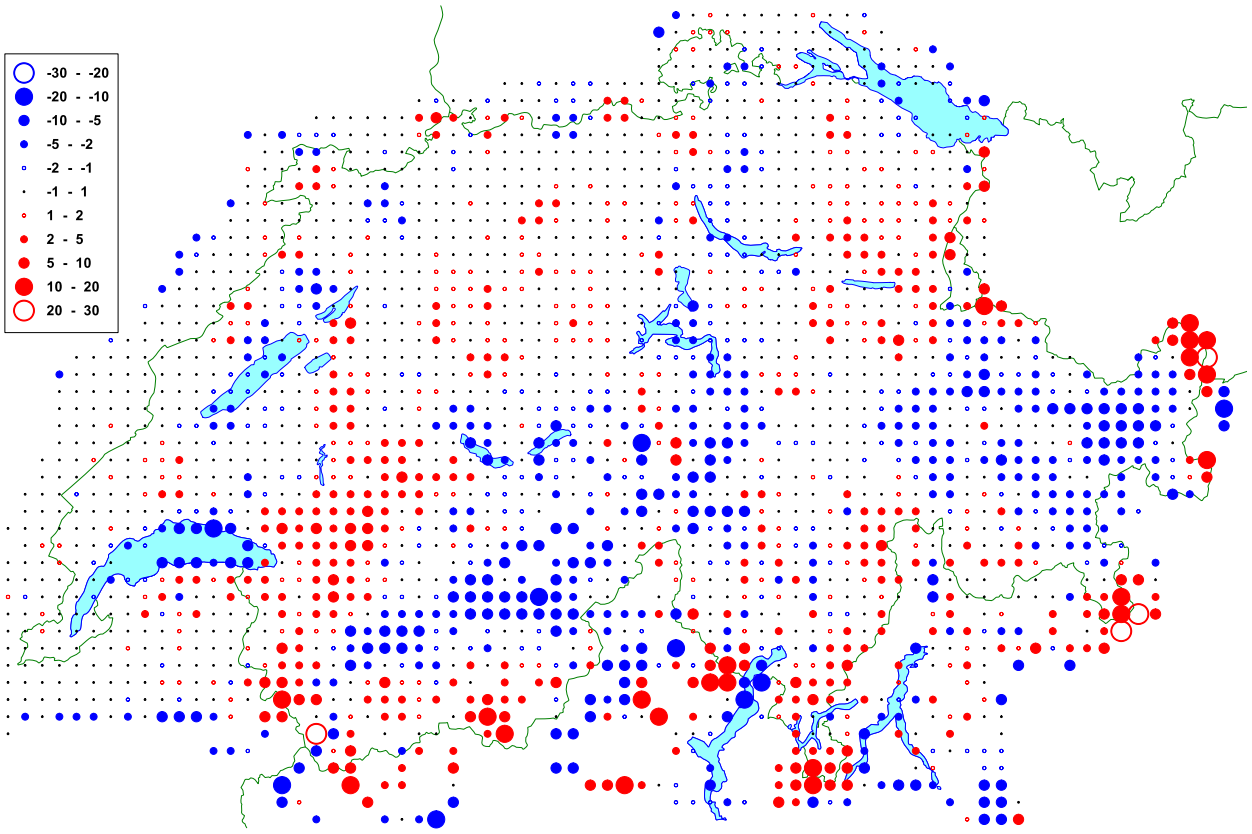


Figure 5-15: Résidus gravimétriques (en mGal)

6 Calcul du géoïde et du quasi-géoïde

Après le calcul du cogéoïde du champ résiduel par collocation, le géoïde et le quasi-géoïde sont obtenus en additionnant à nouveau les effets des modèles de masse qui avaient été préalablement réduits.

Ces calculs ont été exécutés sur une grille régulière de 1x1 km en MN95 et simultanément sur une grille de 30x30“ en ETRS89. Plusieurs informations sont donc requises pour tous ces points : les valeurs prédites issues de la collocation, les composantes calculées du géoïde provenant du modèle global et l’effet des différents modèles de masse.

Pour le calcul du géoïde, seuls les effets d’EGM96 et de la topographie résiduelle (calcul au niveau de la mer) doivent encore être ajoutés au cogéoïde. La Figure 6-1 suivante illustre cela et montre une nouvelle fois que la forme générale provient du modèle global, les longueurs d’ondes moyennes de la prédiction et les structures fines du modèle de la topographie.

En Suisse, l’effet d’EGM96 varie entre -6 et +5 m (par rapport à l’ellipsoïde de référence Bessel 1841) ; la prédiction fournit des valeurs comprises entre -1,8 et +1,8 m et l’effet de la topographie oscille entre -1 et +2 m.

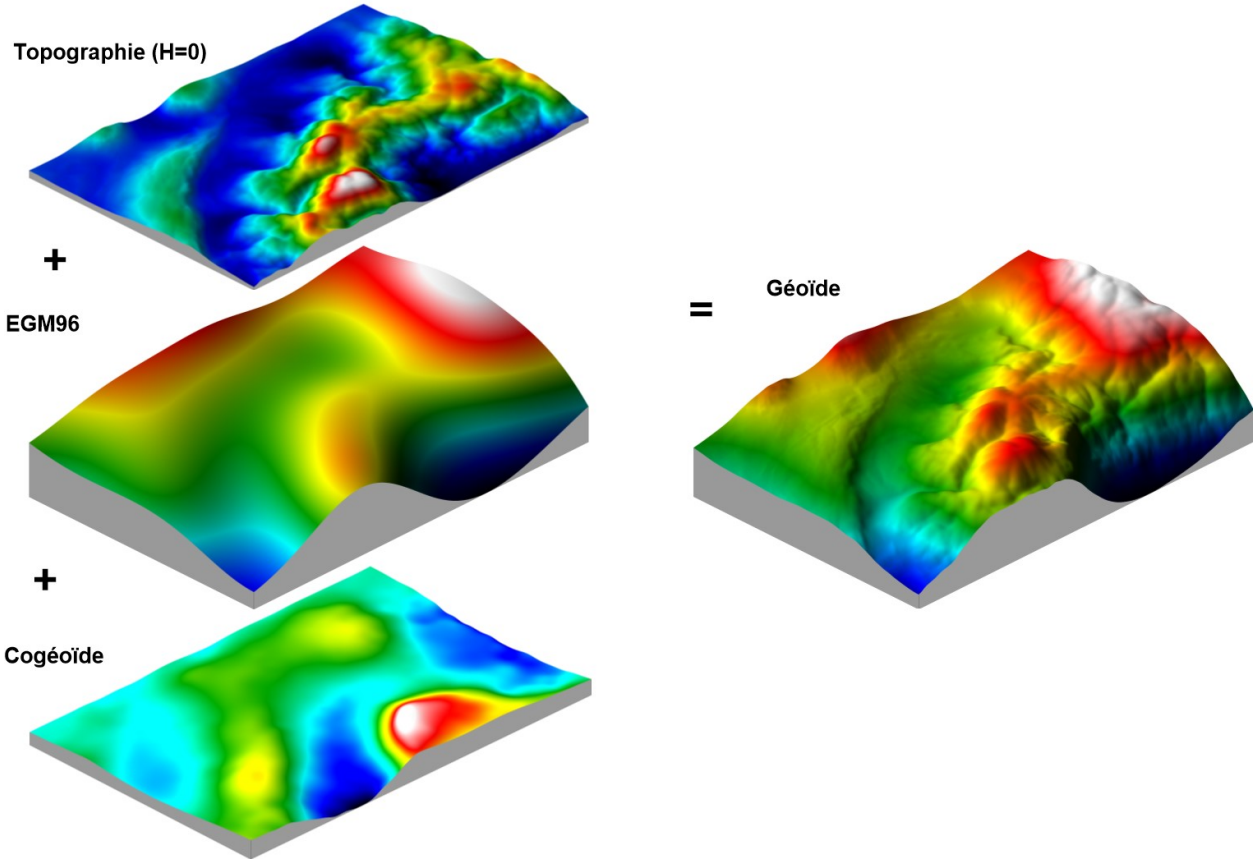


Figure 6-1: Restauration (restore) du géoïde

Pour le calcul du quasi-géoïde ou d’anomalies d’altitude (Figure 6-2) compatibles avec des altitudes normales, le calcul diffère légèrement de celui effectué pour le géoïde, puisque l’effet de la topographie résiduelle à la côte du terrain doit d’abord être calculé. Les valeurs qui en découlent sont à peu près comparables à celles résultant du calcul du géoïde, mais le nombre d’éléments à haute fréquence est nettement plus élevé. A cela viennent encore s’ajouter les composantes des autres modèles de masse comme différence des effets à la côte du terrain et au niveau de la mer (de -14 à +60 cm) et la composante citée au paragraphe 4.5, à savoir la pesanteur résiduelle multipliée par l’altitude (plage de -20 à +30 cm), la corrélation avec la topographie étant très forte dans les deux cas.

Il est bien évidemment possible de calculer des déviations de la verticale et des valeurs gravimétriques en n’importe quel point. Il suffit simplement de rajouter les effets d’EGM96 et des modèles de masse préalablement réduits aux valeurs prédites issues de la collocation.

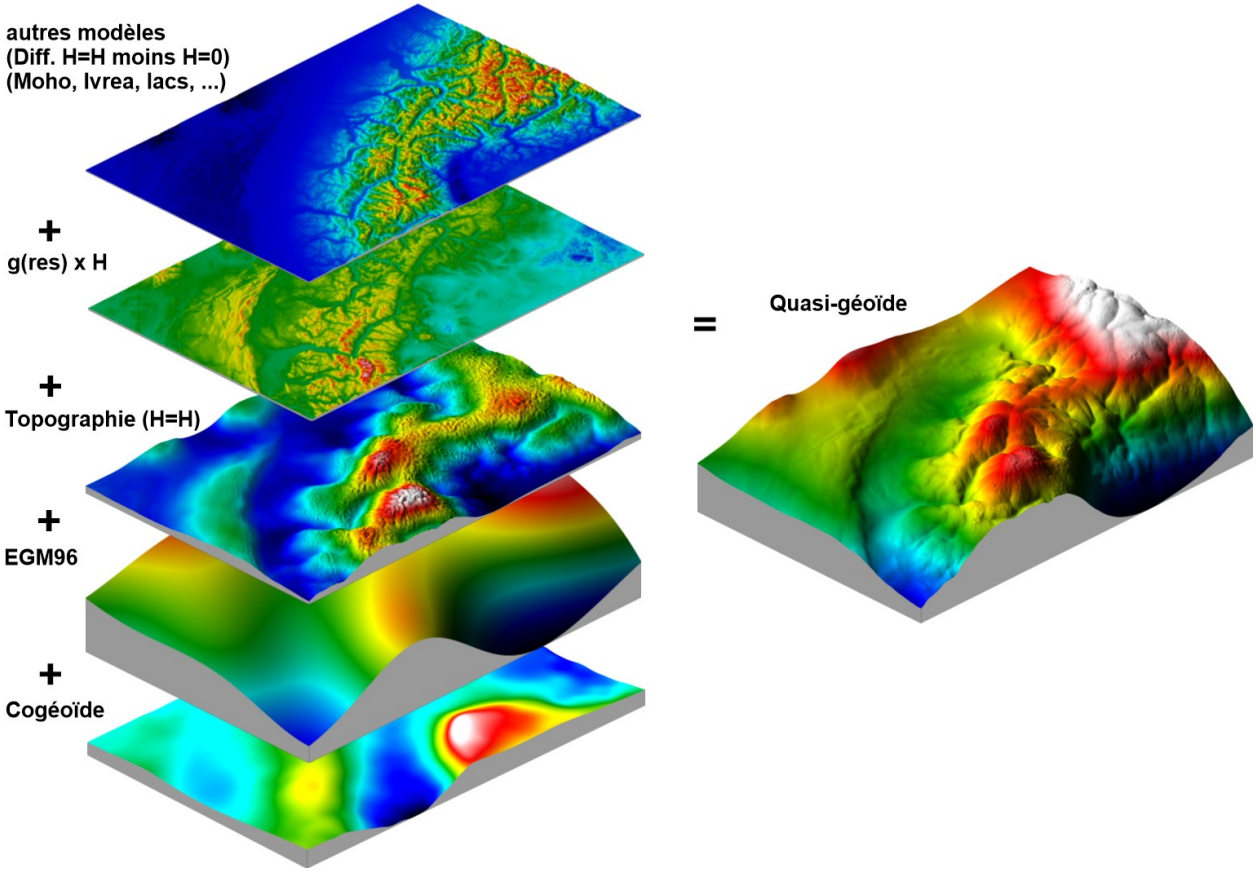


Figure 6-2: Restauration (restore) du quasi-géoïde

Les côtes du géoïde et du quasi-géoïde en ETRS89 et en CH1903+ sont présentées sur les figures suivantes. Il n'est pas judicieux d'opérer une distinction entre MN03 et MN95. La grille du géoïde avec une résolution de 1 km peut simplement être convertie d'un système à l'autre par translation des coordonnées (2 millions / 1 million). Certains clients ont tout autant besoin du modèle en CH1903+ que de celui en ETRS89. L'un ou l'autre modèle doit en effet être retenu selon le stade auquel on fait intervenir le géoïde dans la transformation des coordonnées.

Si c'est d'abord un décalage de l'ordre de 50 m qui résulte du choix du système de référence CH1903+ ou ETRS89, il provoque aussi un basculement général. Le géoïde en CH1903+ (Figure 6-3) croît continuellement du lac Léman au lac de Constance, tandis que les côtes du géoïde en ETRS89 (Figure 6-4) diminuent. En comparant la Figure 6-5 à la Figure 6-4, on constate que le quasi-géoïde est nettement plus influencé par la topographie que le géoïde, de sorte que son interpolation est bien plus délicate.

La différence entre le quasi-géoïde et le géoïde est représentée sur la Figure 6-6. Les écarts vont de valeurs légèrement négatives (-12 cm) dans la zone d'Ivrea à des valeurs clairement positives (+55 cm au maximum) dans les Alpes valaisannes et grisonnes. Ils sont principalement dus à la topographie et aux anomalies gravimétriques. Une bonne approximation de ce calcul est de multiplier l'altitude par l'anomalie de Bouguer, si l'hypothèse d'une densité constante de la topographie est considérée. C'est pourquoi le corps d'Ivrea est si visible sur cette figure (seule zone où les anomalies de Bouguer sont positives).

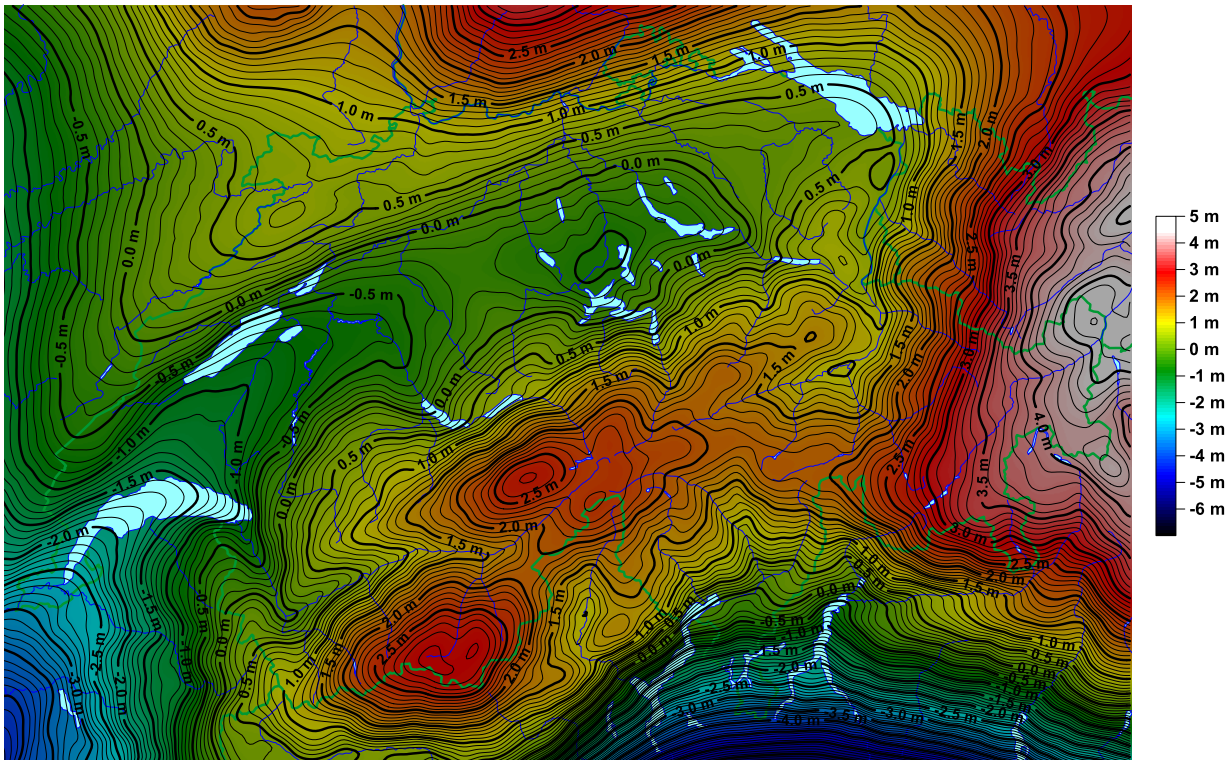


Figure 6-3: Modèle du géoïde CHGeo2004 dans le système de référence suisse CH1903+

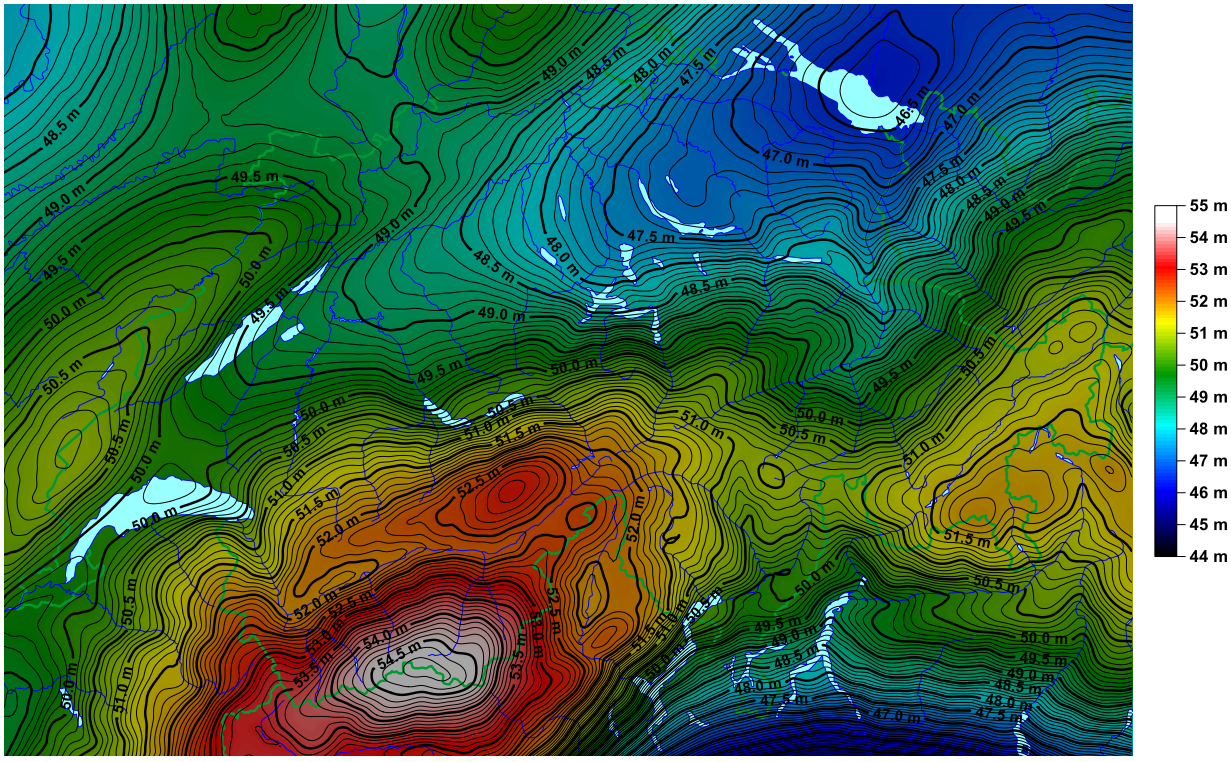


Figure 6-4: Modèle du géoïde CHGeo2004 dans le système de référence ETRS89 = CHTRS95

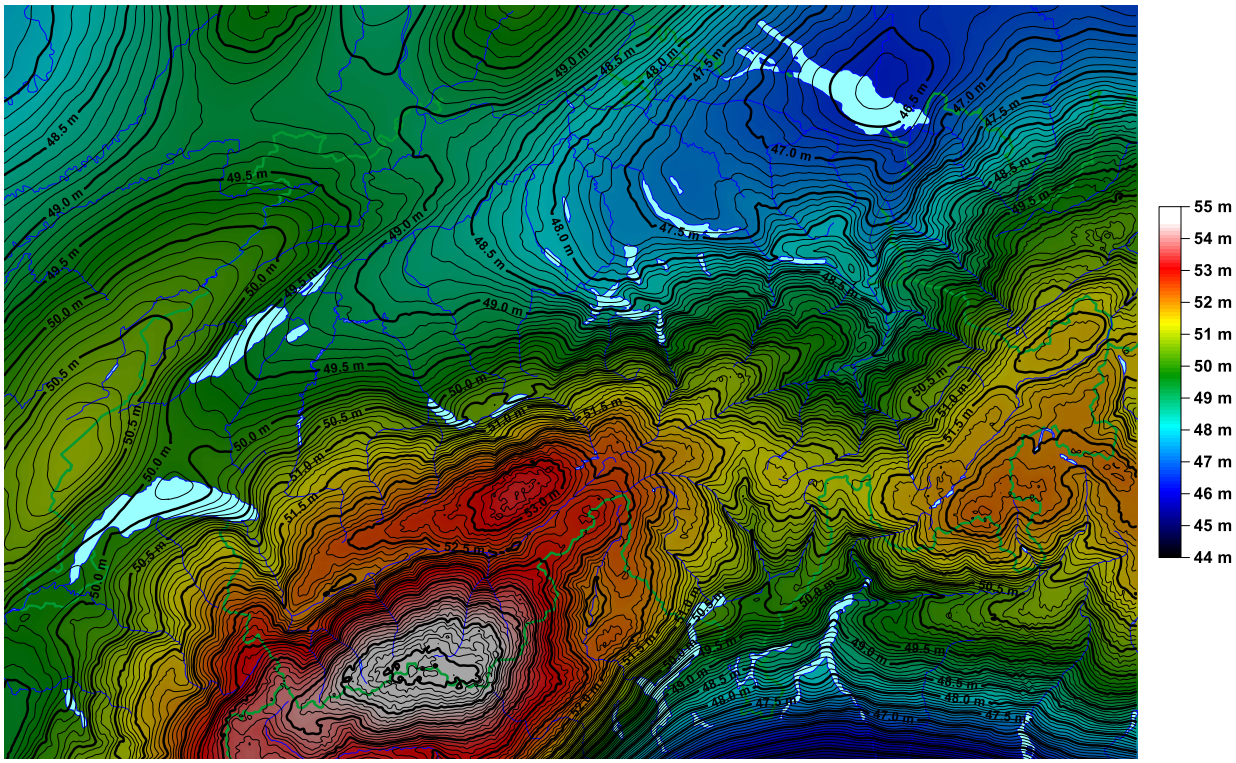


Figure 6-5: Quasi-géoïde CHGeo2004 en ETRS89

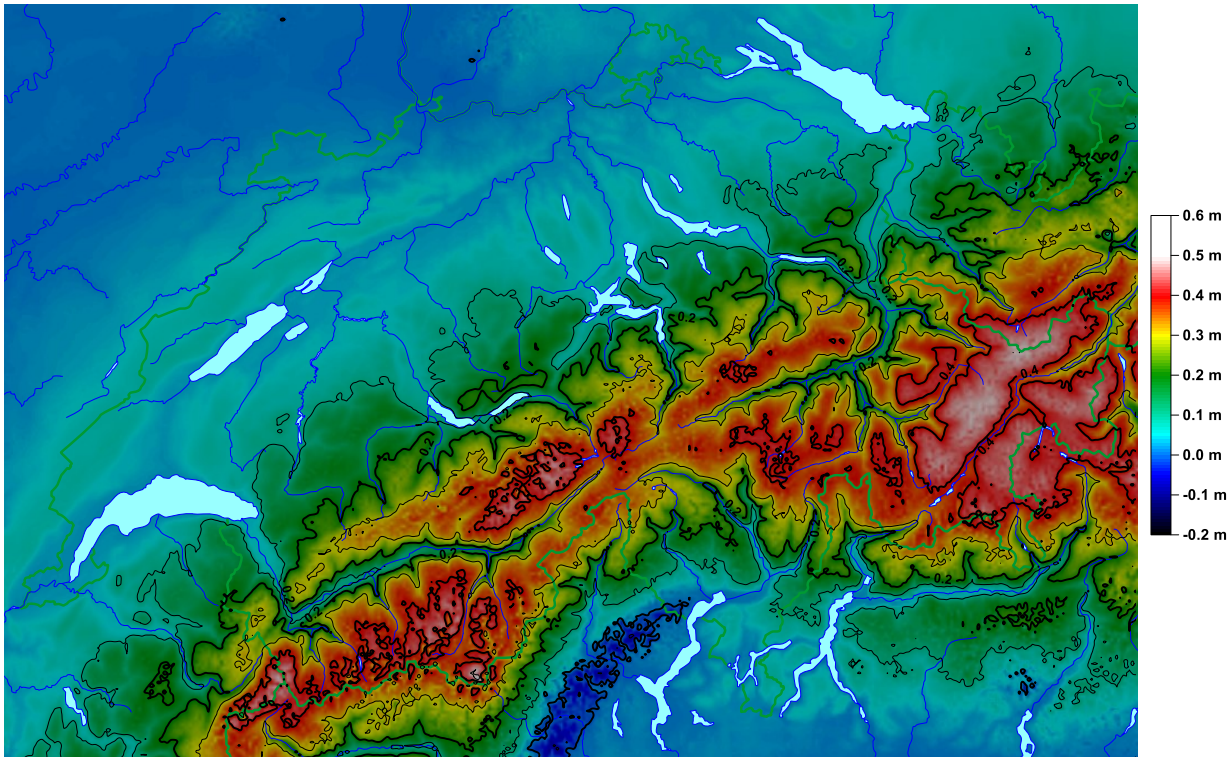


Figure 6-6: Différence quasi-géoïde moins géoïde

7 Comparaison avec CHGeo98

Les différences entre les modèles de géoïde CHGeo98 et CHGeo2004 sont représentées sur la Figure 7-1. Ils divergent au plus de 4 cm sur la majeure partie du Plateau. Les écarts ne dépassent que 10 cm dans certains secteurs tels que la région de la Jungfrau, le Val Poschiavo ou l'extrême sud du Valais. La différence la plus marquée (environ 25 cm) est enregistrée en Basse-Engadine. Hors de la Suisse, les écarts croissent très vite pour atteindre des valeurs de l'ordre du mètre. Ils sont dus à l'absence d'observations d'appui dans CHGeo98.

Les écarts constatés ont plusieurs causes. Les principales d'entre elles proviennent du fait que les mesures GPS-nivellement ont été contraintes dans CHGeo2004, des nouvelles mesures de déviation de la verticale, mais aussi des modèles de masse modifiés et de la méthode de réduction des mesures au niveau de la mer.

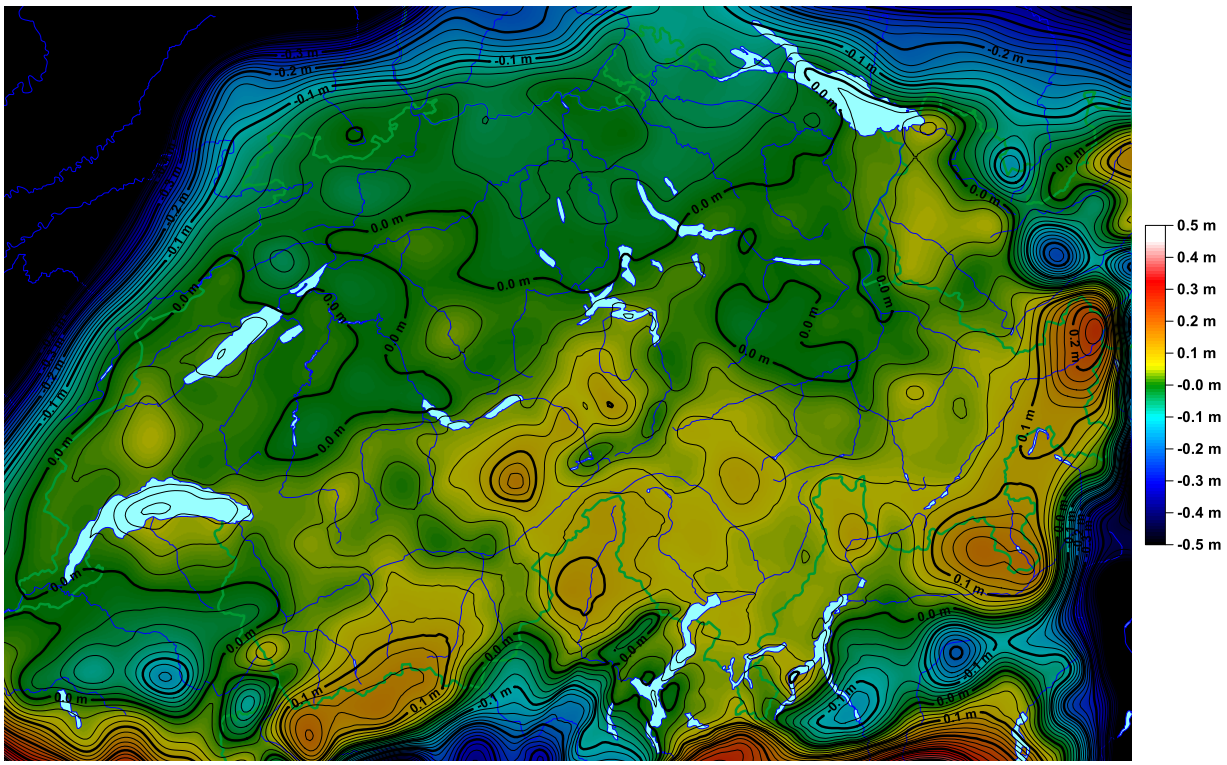


Figure 7-1: Différence CHGeo2004 moins CHGeo98 (équidistance des isolignes: 2 cm)

8 Les résidus GPS-nivellement

L'objectif principal du calcul de CHGeo2004 était d'obtenir un système altimétrique cohérent, pour lequel l'altitude orthométrique résulte exactement de la différence entre la hauteur ellipsoïdale et la côte du géoïde. C'est pourquoi les mesures GPS-nivellement ont été contraintes de manière rigoureuse dans la solution publiée.

L'idée initiale était cependant de répartir de façon pondérée les résidus du GPS-nivellement sur les trois jeux de données (GPS, nivellement et modèle de géoïde) et de produire une solution dite «C» (autrement dit combinée) pour laquelle les résidus devraient être répartis ainsi sur les différents jeux de données :

$res_{tot} = v_{GPS} + v_{niv} + v_{géoïde}$

où res_{tot} est le résidu GPS-nivellement «observé» (mesure GPS-nivellement moins modèle du géoïde), les trois termes «v» correspondant aux composantes propres à chacun des jeux de données. La solution la plus simple (utiliser l'écart-type des jeux de données sur les points considérés pour la pondération) ne fonctionne cependant pas de manière satisfaisante, en raison de la corrélation élevée entre points voisins, non seulement pour le nivellement, mais aussi pour le modèle de géoïde. C'est pourquoi les matrices de variance-covariance complètes (matrices Qxx) doivent être introduites. Elles sont disponibles pour les trois jeux de données. Pour le géoïde, elle est calculée dans HITCOL. La matrice Q des mesures GPS peut être extraite du fichier SINEX. Concrètement, l'information pour les points de GPS-nivellement est extraite d'un fichier .COVLB de la solution globale à l'aide du programme ext_qxxgps et transformée dans le système de référence local. Pour la matrice Qxx du nivellement, la matrice de covariance complète peut être produite par le programme KINEPOT. L'information sur les points GPS-nivellement est alors extraite à partir d'elle à l'aide du programme ext_qxxniv.

Si les trois jeux de données sont indépendants les uns des autres, sont exempts de toute erreur systématique et se rapportent au même système de référence, les résidus GPS-nivellement se laissent répartir ainsi :

$$v_{GPS} = Q_{GPS} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{géoïde})^{-1} \cdot res_{tot}$$
$$v_{niv} = -Q_{niv} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{géoïde})^{-1} \cdot res_{tot}$$
$$v_{géoïde} = -Q_{géoïde} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{géoïde})^{-1} \cdot res_{tot}$$

L'obtention de ces formules est exposée dans [Schlatter, 2007, chapitre 10].

Cette répartition pondérée est mise en œuvre dans le programme vber. Un fichier avec les résidus GPS-nivellement est requis à cette fin en entrée, au même titre que les trois matrices Qxx. Un tableau avec les composantes des résidus propres aux trois types d'observations est généré en sortie. Ces composantes doivent être soustraites des données pour obtenir des «observations» compensées. Le programme vertobln sert à représenter ces résultats graphiquement.

Des mesures GPS-nivellement ont toutefois été utilisées pour la solution officielle du géoïde CHGeo2004, de sorte que les jeux de données ne sont pas indépendants les uns des autres. Il n'existe cependant aucune approche adaptée pour modéliser ces corrélations croisées. C'est pourquoi la méthode a d'abord été appliquée à une solution du géoïde déterminée sans recourir aux mesures GPS-nivellement (gravimétrie et déviations de la verticale seules). Les résidus à répartir de cette solution du géoïde, dépassant 20 cm pour certains, sont présentés sur la Figure 8-1.

Si nous répartissons maintenant les résidus de manière pondérée, nous obtenons les résultats de la Figure 8-2. On y constate que la plus grande partie des résidus est interprétée comme une correction du modèle de géoïde. Seules des corrections systématiques de faible ampleur (1 cm au plus) sont apportées au nivellement. Les corrections restantes, généralement faibles et irrégulières, sont affectées au GPS. Les corrections apportées au GPS n'ont une ampleur supérieure que dans des cas exceptionnels et uniquement en des points où nous savons que la solution GPS n'est pas optimale. Il convient encore de noter ici que les covariances des mesures GPS ont dû être atténuées d'un facteur empirique de 30, afin qu'une petite partie au moins des résidus puisse être affectée au GPS.

La plus grande partie des résidus allant à la correction du modèle de géoïde pour cette répartition, il n'est pas réellement judicieux d'utiliser cette méthode ainsi. On peut tout aussi bien calculer une solution contrainte sur les points GPS-nivellement qui conduira pratiquement aux mêmes résultats en s'épargnant cette répartition bien compliquée. Les petites corrections qu'il conviendrait encore d'apporter au GPS et au nivellement sont négligées. C'est pourquoi la solution définitive publiée de CHGeo2004 est une solution contrainte sur les points GPS-nivellement bien déterminés.

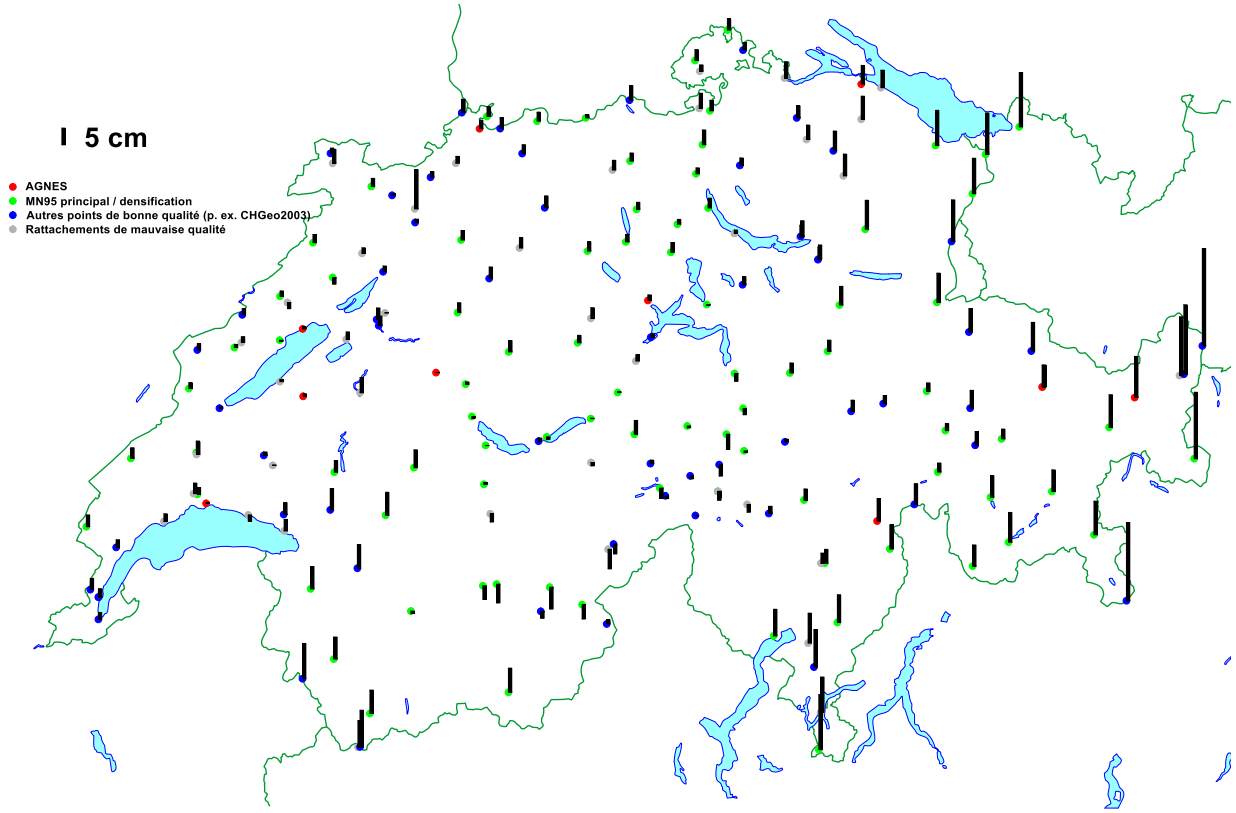


Figure 8-1: Résidus GPS-nivellement d'une solution du géoïde uniquement basée sur les déviations de la verticale et la gravimétrie

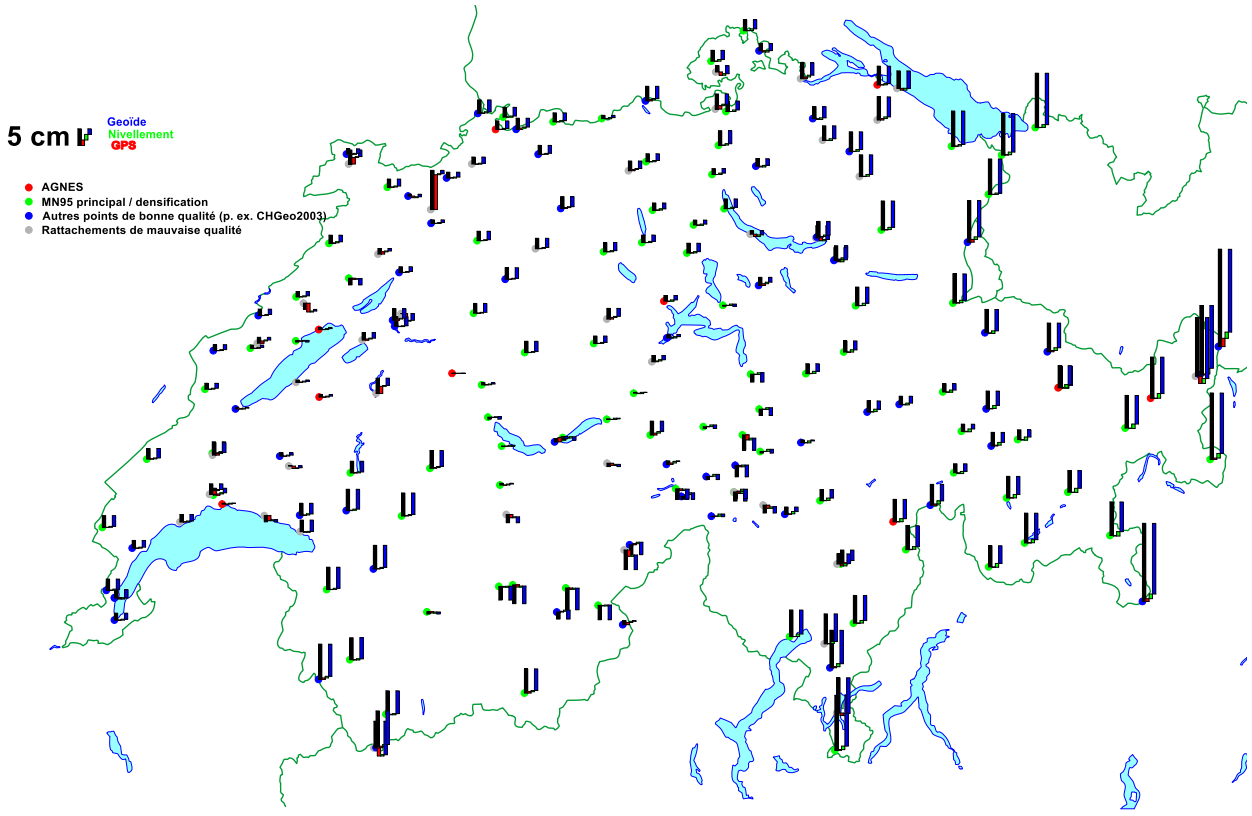


Figure 8-2: répartition pondérée des résidus GPS-nivellement d'une solution astro-gravimétrique

Même dans le cas d'une solution pratiquement contrainte sur les bons points GPS-nivellement, de faibles résidus sont encore à déplorer, surtout sur les points GPS-nivellement de moindre qualité, et il serait judicieux de les répartir. C'est pourquoi nous avons également procédé au même calcul pour la répartition dans le cas de la solution définitive de CHGeo2004. Si ce n'est pas tout à fait correct en raison de la non-prise en compte des corrélations croisées, des résultats satisfaisant en découlent cependant. Ils sont présentés sur la Figure 8-3.

On constate d'abord que les résidus restants sont très faibles. Il suffit de consulter l'échelle (adaptée par rapport à la Figure 8-2) pour s'en convaincre. Les résidus sur les bons points GPS-nivellement sont presque tous inférieurs au millimètre. La valeur la plus élevée est à déplorer sur le point MN95 Grimsel (environ 5 mm). Il est par ailleurs réjouissant de constater que les résidus sont généralement inférieurs à 2 cm sur les points mal déterminés (mesures sur L1 et sessions courtes).

La répartition des résidus restants diffère complètement de celle de la Figure 8-2. Les résidus sont presque intégralement affectés aux hauteurs ellipsoïdales issues du GPS. Le nivellement ne se voit attribuer que des corrections systématiques minimales (inférieures au millimètre) et le modèle de géoïde reste généralement inchangé. Les résidus éventuellement restants, extrêmement faibles, ne sont affectés au nivellement qu'aux stations AGNES, en raison du poids élevé accordé aux mesures GPS.

Pour cette solution aussi, la répartition des résidus sur les différents jeux de données ne se révèle pas judicieuse. Nous les attribuons intégralement à la hauteur ellipsoïdale. Aucune correction n'est donc apportée au nivellement et au modèle de géoïde.

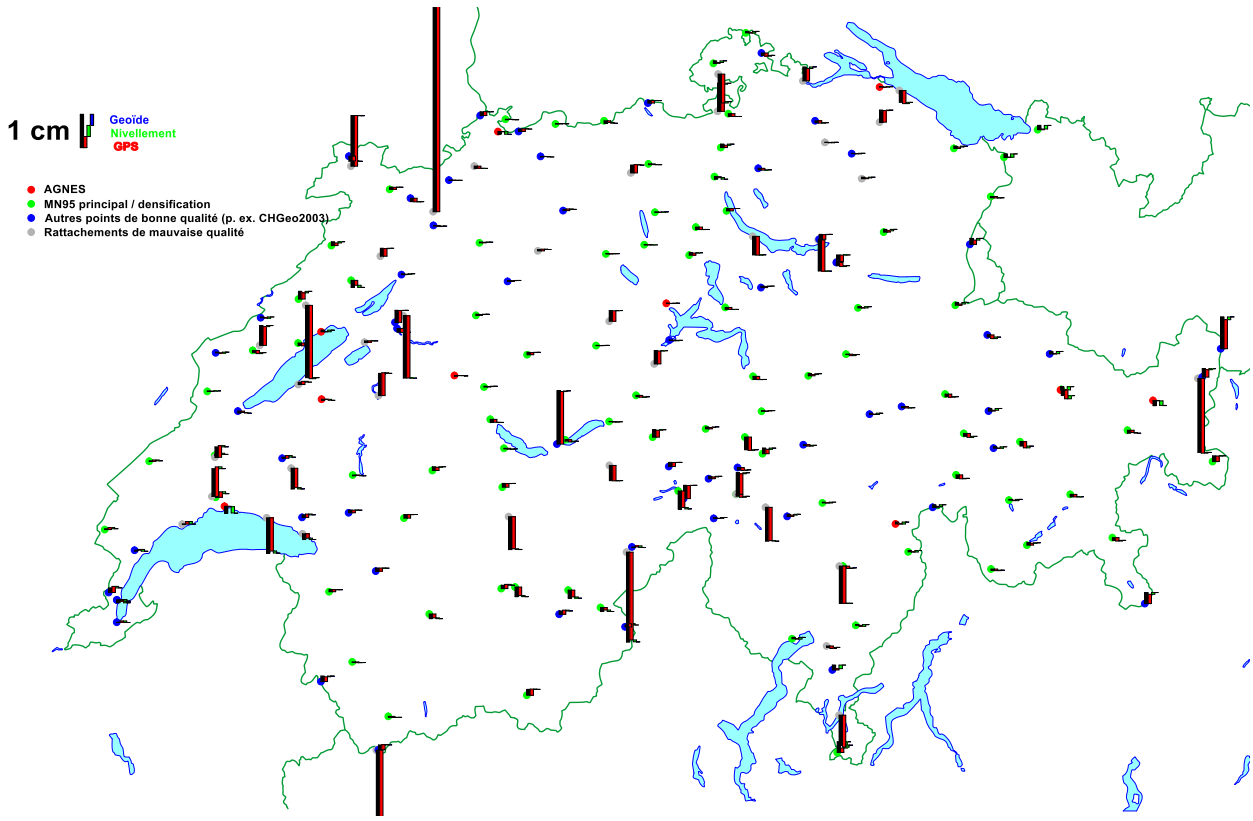


Figure 8-3: répartition des résidus de la solution combinée pour le géoïde avec points GPS-nivellement contraints et non contraints (mal déterminés)

Le calcul d'un modèle de géoïde fixé par le GPS-nivellement et l'attribution des résidus restants définissent par voie de conséquence le système altimétrique RAN95 qui est compatible avec CHGeo2004. Il est principalement déterminé par les mesures de nivellement (état à fin 2004, corrigées par les mesures gravimétriques). Pour les points GPS rattachés au nivellement, c'est donc l'altitude issue du nivellement et de la gravimétrie qui prime. Pour tous les autres points, la différence entre la hauteur ellipsoïdale et CHGeo2004 fournit normalement une altitude orthométrique d'une précision de niveau centimétrique.

La cohérence (de niveau centimétrique) entre GPS, nivellement et géoïde est ainsi atteinte sur les points GPS-nivellement, si bien que l'objectif principal de CH-CGN l'est également.

9 La surface de conversion altimétrique HTRANS

9.1 Description succincte

CHGeo2004 sert à convertir des hauteurs ellipsoïdales issues du GPS en altitudes orthométriques RAN95 ou à obtenir les différences entre les hauteurs ellipsoïdales et les altitudes normales si le quasi-géoïde est utilisé. En Suisse, c'est toutefois NF02 (nivellement fédéral de 1902) qui est le système altimétrique officiel de la mensuration officielle. Ces altitudes usuelles (dépourvues de toute correction gravimétrique) peuvent s'écarter de plusieurs décimètres des altitudes orthométriques (Figure 9-1). En règle générale, l'utilisateur du GPS doit donc calculer des altitudes NF02, ce qui n'est pas directement possible avec CHGeo2004. C'est pourquoi une méthode de transformation altimétrique, baptisée HTRANS, a été développée. Les bases de cette méthode et les tests poussés qu'elle a subis ont déjà été décrits à maintes reprises, par exemple dans [Marti 2002b], [Marti 2003] ou de manière détaillée dans [Schlatter 2007, chapitre 12]. On se contentera donc de rappeler les résultats principaux dans la suite.

Les différences entre RAN95 et NF02 se composent de plusieurs parties qu'il n'est pas aisé de séparer les unes des autres. Il s'agit des déformations dans NF02, des mouvements verticaux et de l'influence du champ de pesanteur. Face aux difficultés inhérentes à une telle séparation, il a été décidé de recourir à une approche pragmatique pour la modélisation. Elle prévoit une subdivision en trois parties. La première correspond aux différences entre NF02 et les altitudes normales. Elles varient entre -20 cm tout au nord, à hauteur de Schaffhouse, et +10 cm au Tessin et peuvent être interpolées de façon relativement simple. Elles sont stockées selon une grille de 1x1 km et dépendent de la position du point considéré. La partie principale des différences entre les altitudes normales et les altitudes orthométriques est due aux anomalies gravimétriques et leur effet est comparable à une échelle altimétrique locale. Les anomalies de Bouguer constituent une excellente approximation ici. Elles sont également stockées selon une grille régulière de 1x1 km et dépendent de l'altitude. La troisième et dernière partie résulte essentiellement des inhomogénéités de masse dans la croûte et le manteau terrestres. Elle aussi dépendrait surtout des altitudes, mais a été modélisée comme une surface de correction dépendant uniquement de la position. Le lecteur voudra bien se reporter à [Schlatter 2007] pour plus d'informations concernant la méthode et les études relatives à la précision. On peut résumer les indications de précision ainsi pour HTRANS : à proximité des lignes du nivellement fédéral, une précision inférieure à 1 cm peut être atteindre ; sur le Plateau, à l'écart des lignes du nivellement fédéral, la précision oscille entre 1 et 2 cm ; dans les Alpes, on peut enregistrer des différences supérieures à 10 cm entre les altitudes officielles NF02 et celles transformées via HTRANS.

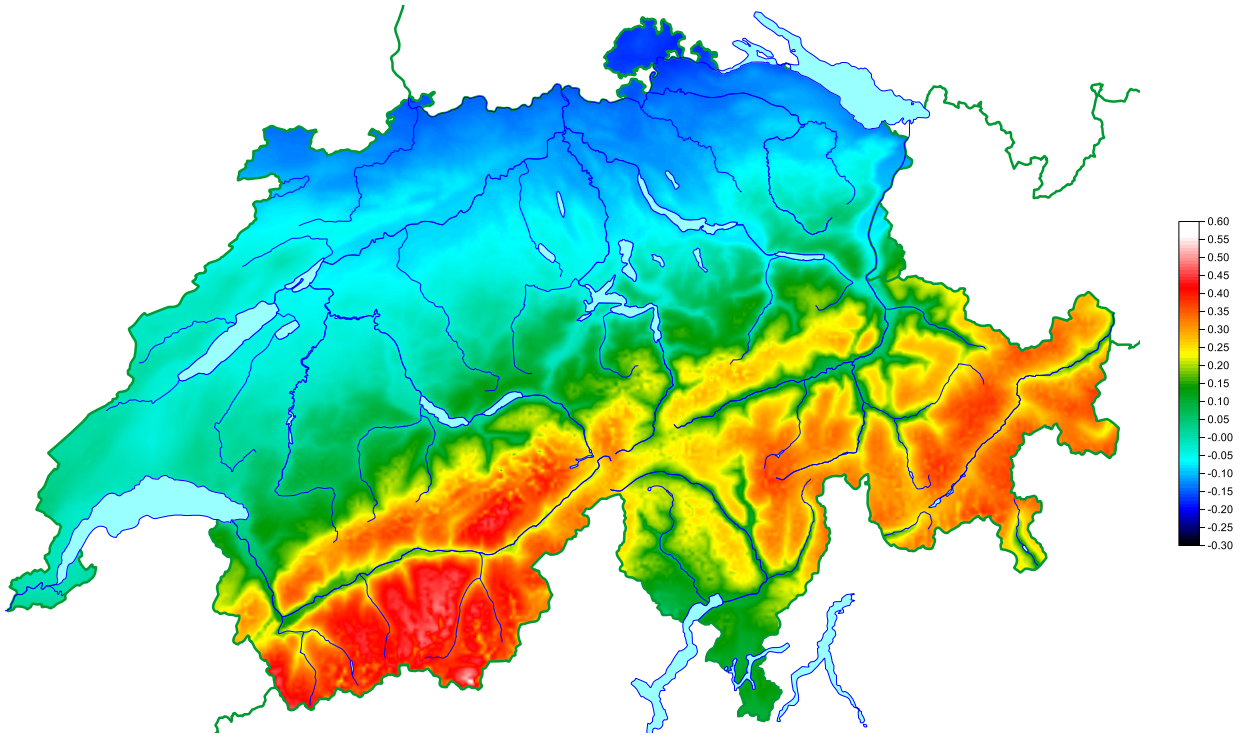


Figure 9-1: Altitudes orthométriques RAN95 moins NF02 (en mètres)

9.2 CHGeo2004/HTRANS

La conversion entre RAN95 et NF02 s'appuie donc sur trois grilles d'une résolution chacune de 1x1 km. Il ne s'agit toutefois pas d'une méthode acceptée en standard par la plupart des récepteurs GPS ou des logiciels de SIG. C'est pourquoi un souhait a très vite été exprimé : effectuer un calcul approché sur la base d'une seule surface de conversion. Il n'a pas été difficile à exaucer, puisqu'il suffit d'additionner les trois grilles. Pour ce qui concerne l'échelle altimétrique, il faut encore multiplier l'anomalie de Bouguer par une altitude interpolée à partir d'un modèle numérique de terrain. Cela signifie du reste que cette grille ne peut pas être utilisée en sous-sol (dans des tunnels par exemple). Sur la surface terrestre, là où la transformation de mesures GPS est utilisée d'ordinaire, le calcul à partir d'une seule grille fonctionne de manière à peu près satisfaisante, même si les résultats sont d'une qualité bien inférieure à ce qu'ils sont avec trois grilles partielles, en raison de la dépendance altimétrique et de la résolution utilisée jusqu'alors de 1x1 km. A ce sujet aussi, on trouve des développements détaillés dans [Schlatter 2007].

Une telle conversion d'un système altimétrique vers un autre reste cependant impossible pour la plupart des applications commerciales. Habituellement, une conversion altimétrique emprunte toujours le détour passant par les hauteurs ellipsoïdales. C'est pourquoi il a été nécessaire de calculer non seulement une surface de conversion entre RAN95 et NF02, mais également entre NF02 et les hauteurs ellipsoïdales, donc une surface de conversion similaire au géoïde, comprenant les deux composantes du géoïde et de HTRANS. Cette surface reproduite sur la Figure 9-2 présente pour l'essentiel les caractéristiques de CHGeo2004, mais avec une légère modification due à la composante HTRANS. La précision correspond bien évidemment à peu de choses près à celle de HTRANS. Elle est plus élevée à proximité des lignes du nivellement fédéral et sur le Plateau que dans les Alpes.

Ce modèle, que nous avons baptisé CHGeo2004/HTRANS, a été calculé selon une grille d'une résolution de 1x1 km et est fourni tel quel à notre clientèle. Suivant la voie empruntée pour le traitement, il est requis dans le système de projection suisse ou en ETRS89 (résolution de 30x30").

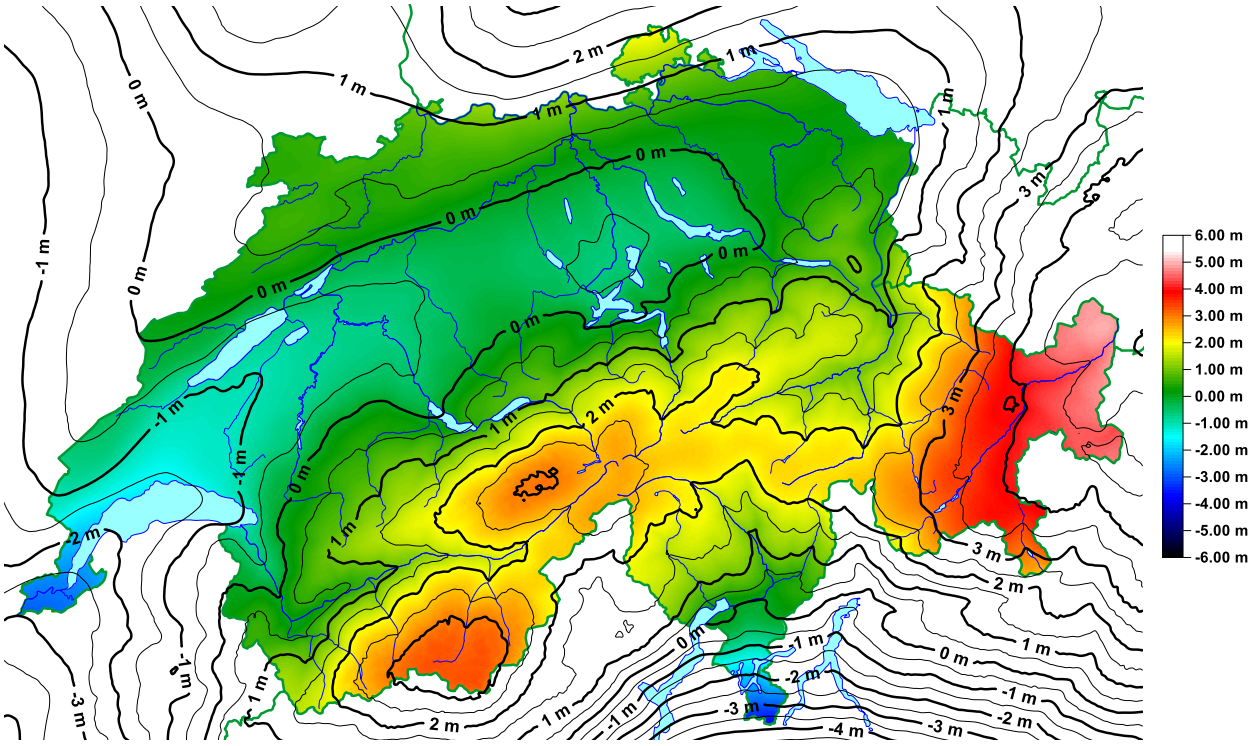


Figure 9-2: Surface de conversion CHGeo2004/HTRANS dans le système de référence CH1903+

10 Comparaison de CHGeo2004 avec d'autres modèles

D'autres modèles, calculés de manière indépendante, peuvent servir de validation externe au modèle de géoïde CHGeo2004. Il s'agit surtout des modèles globaux, des modèles européens et dans certaines zones, des modèles de géoïde des pays voisins. Ces derniers ne sont toutefois pas présentés ici.

10.1 Comparaison avec le modèle de géoïde européen

Différents modèles de géoïde européen ont été calculés au cours des dernières années. Ils portent tous le même nom (EGG pour European Gravimetric Geoid) et se différencient les uns des autres par l'indication de l'année qui leur correspond. Ces modèles ont tous été déterminés à l'Université de Hannover (Institut für Erdmessung, IfE) par H. Denker. Il s'agit de solutions purement gravimétriques intégrant des données de satellites (surtout GRACE) depuis qu'elles sont disponibles. Le GPS-nivellement sert uniquement à la vérification (indication officielle), sauf dans quelques versions de test. Le géoïde est déterminé via une transformation de Fourier rapide (Fast Fourier Transformation, FFT).

Le jeu de données gravimétriques national a été utilisé pour la Suisse dans les solutions initiales, puisqu'il était alors disponible au sein du BGI (Bureau gravimétrique international). Il s'agissait notamment des données utilisées pour la carte gravimétrique de 1980 (plus quelques projets locaux plus anciens). A partir de 2004, l'IfE a disposé du jeu de données pour l'atlas gravimétrique au 1:100'000. C'est aussi la date à partir de laquelle le MNT25 a été utilisé comme modèle de terrain. En règle générale, les modèles EGG fournissent un quasi-géoïde. Il a parfois donné lieu à des modèles de géoïde, calculés en employant une méthode simple basée sur des anomalies gravimétriques. CHGeo2004 a été comparé aux modèles EGG1996, EGG1997, EGG2007, EGG2008 et EGG2015 (Figure 10-1). Les résultats ne sont pas tous présentés ici. Les modèles EGG ont été publiés avec une résolution de 1x1.5 minute d'arc pour les plus anciens et de 1x1 minute d'arc pour les plus récents. EVRF2007 a servi de cadre altimétrique aux modèles les plus récents.

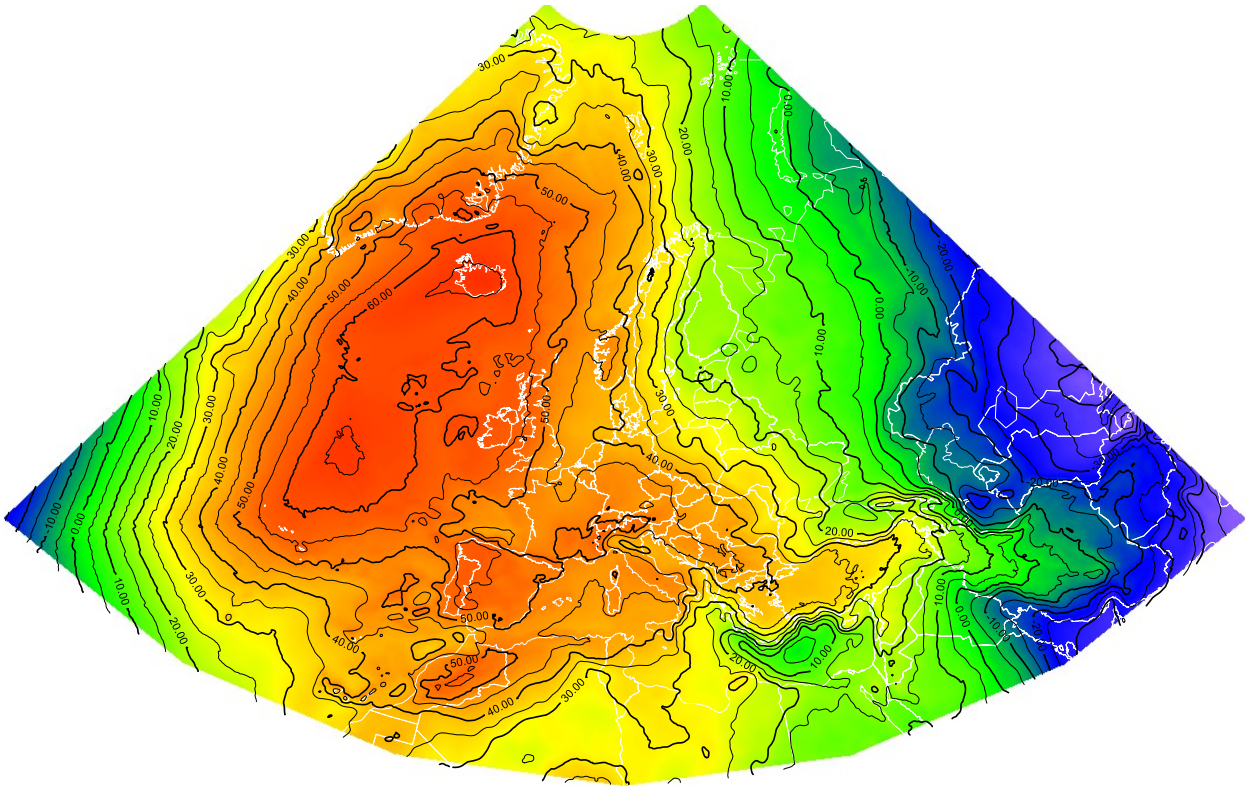


Figure 10-1: Le modèle de géoïde européen EGG2015 (équidistance des isolignes: 5 m)

Si nous zoomons sur l'espace alpin dans EGG2015, nous reconnaissons sa résolution spatiale élevée et découvrons la richesse de ses détails (Figure 10-2).

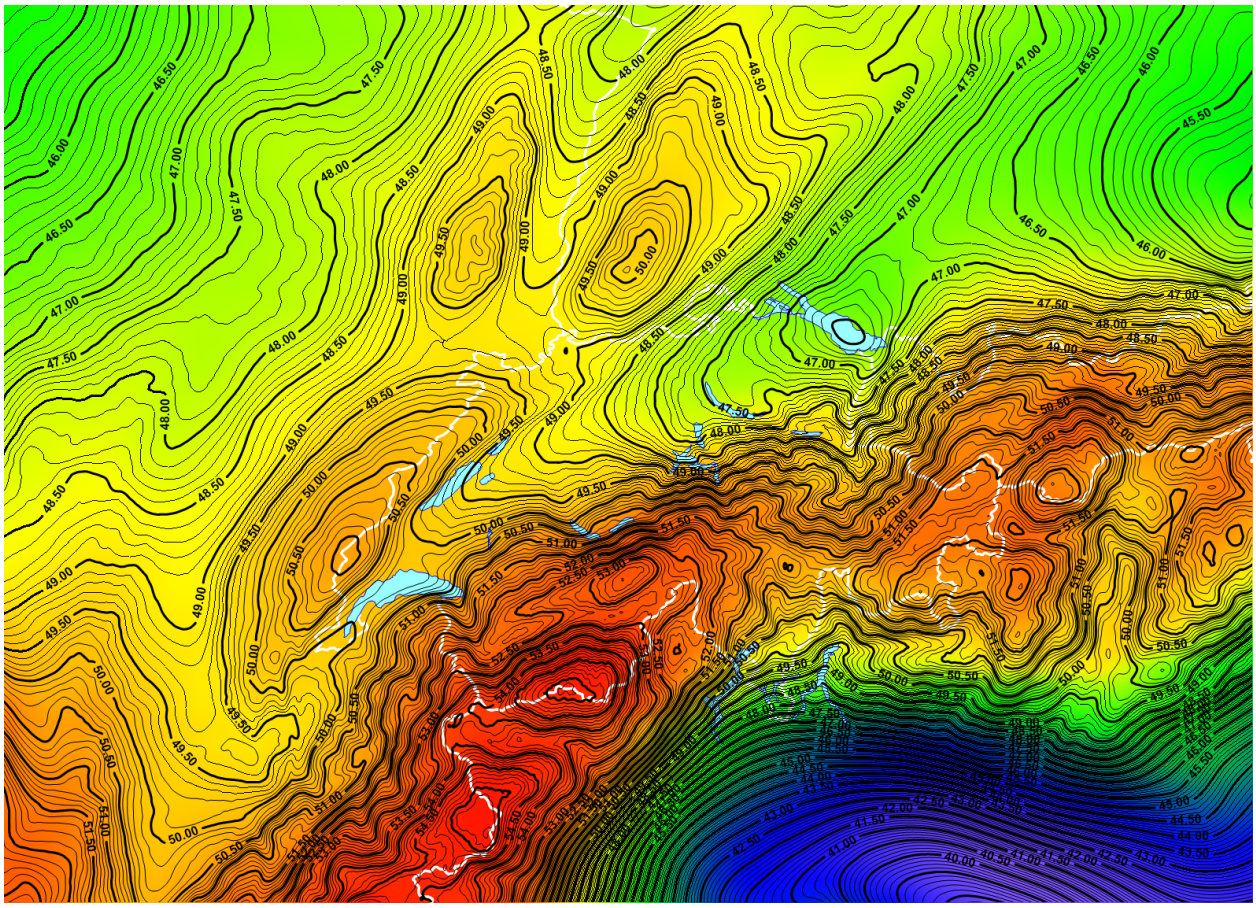


Figure 10-2: Quasi-géoïde EGG2015 dans l'espace alpin

Les écarts entre EGG2008 et CHGeo2004 sont présentés sur la Figure 10-3. Les deux modèles coïncident très bien sur le Plateau (ils divergent au plus de quelques centimètres). Un décalage général d'environ -10 cm est en parfait accord avec la différence entre les systèmes altimétriques. Dans les Alpes, les écarts croissent en Valais et dans les Grisons pour y dépasser +5 cm. La tendance qu'expriment ces différences correspond aussi à celle dévoilée par la solution purement gravimétrique de CHGeo2004 (cf. Figure 5-4).

On est également frappé par les écarts marqués qui subsistent dans les vallées alpines. Ils résultent des approches utilisées pour le calcul (collocation ou FFT), des méthodes de réduction et de la résolution spatiale (le quasi-géoïde EGG est plus fortement lissé). On observe également des différences d'une certaine ampleur dans les zones frontalières des pays limitrophes, bien que CHGeo2004 y soit fixé sur la solution EGG97. Des irrégularités plus prononcées sont aussi notées en Italie et en Autriche, dans des zones où les données gravimétriques (tout au moins celles utilisées pour CHGeo2004) ne sont pas de très bonne qualité.

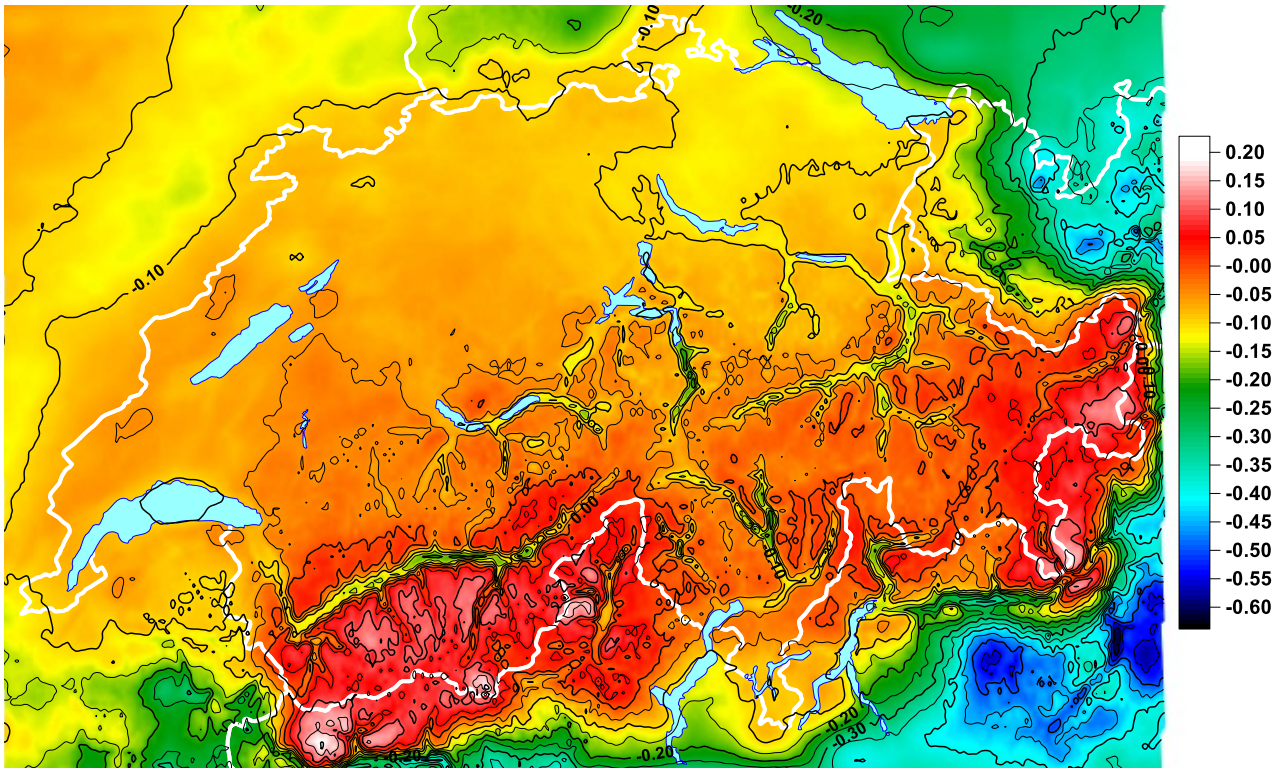


Figure 10-3: Différence CHGeo2004 (quasi-géoïde) moins EGG2008 (équidistance des isolignes: 5 cm)

10.2 Comparaison avec le modèle de géoïde global EGM2008

Le modèle global EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008, modélisation en harmoniques sphériques) [Pavlis et al. 2012] a succédé à EGM96 utilisé dans CHGeo2004. Il a été calculé à partir de divers types de données : orbites de satellites (mission GRACE, mais d'autres aussi), altimétrie satellitaire et gravimétrie terrestre. Il est d'abord disponible sous forme de développement en harmoniques sphériques jusqu'aux degré et ordre 2190. Cela correspond à peu de choses près à une résolution spatiale de 5 km, ce qui est extrêmement élevé pour un modèle global. EGM2008 est disponible à la fois sous forme de géoïde et de quasi-géoïde.

Les points gravimétriques de l'atlas au 1:100'000 ont été utilisés sous forme d'anomalies à l'air libre pour la Suisse. Les points GPS-nivellement ont uniquement servi à titre de contrôle.

L'extrait d'EGM2008 présenté sur la Figure 10-4 est le même que celui d'EGG2015 reproduit sur la Figure 10-2. Si la résolution spatiale est légèrement inférieure, de très nombreux détails sont similaires. C'est la première fois que l'influence des vallées alpines principales est visible sur un modèle global.

Les écarts entre les quasi-géoïdes EGM2008 et EGG2015 sont présentés sur la Figure 10-5. Si l'on fait abstraction du décalage général d'environ -30 cm dû au choix du système altimétrique, la coïncidence est très bonne lorsque le relief est peu accidenté (France, Allemagne, plaine du Po). Dans l'espace alpin en revanche, les écarts deviennent très irréguliers et atteignent des valeurs comprises entre -84 et +8 cm. Une grande partie de cette composante résulte de la résolution spatiale plus faible d'EGM2008. Dans l'espace alpin, il existe encore des composantes considérables façonnant le géoïde qui dépassent la plage de fréquences couverte par EGM2008. Le modèle de géoïde régional EurAlpGM2011 (European Alpine Gravity Model 2011) [Hirt et al. 2010] l'a aussi mis en évidence. Par rapport à EGM2008, il tient compte en plus de l'influence de la topographie résiduelle. Dans les Alpes, les composantes résultantes sont de l'ordre de ± 20 cm (cf. Figure 10-6). Cette raison n'explique toutefois pas les écarts constatés à elle seule. La méthode employée et les données utilisées jouent elles aussi un grand rôle.

La différence entre EGM2008 et CHGeo2004 est enfin présentée sur la Figure 10-7. Ici aussi, la coïncidence est relativement bonne lorsque le relief est peu accidenté et la problématique des zones montagneuses apparaît à nouveau. L'écart moyen d'EGM2008 sur les points de GPS-nivellement suisses s'élève à environ 6,7 cm, déduction faite d'un décalage altimétrique, ce qui constitue assurément un très bon résultat pour un modèle global.

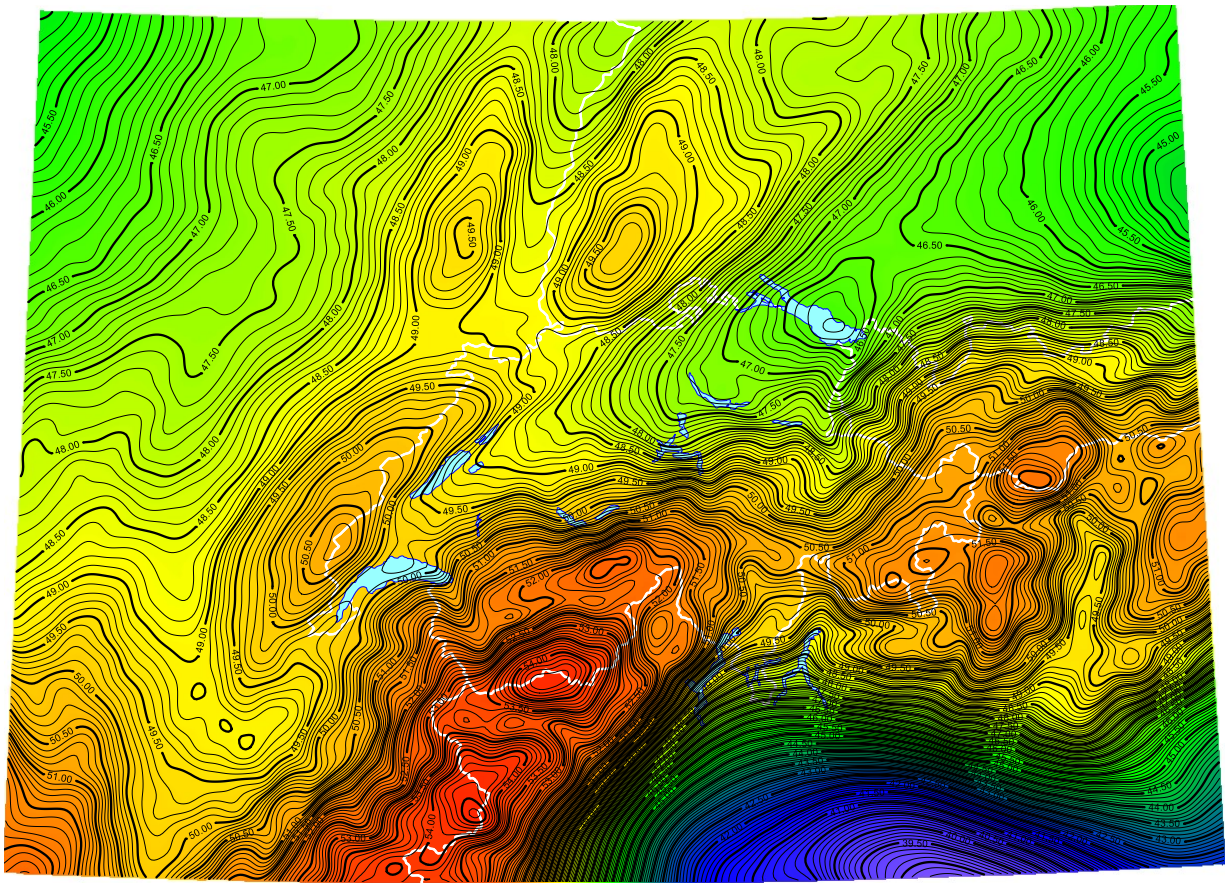


Figure 10-4: Modèle de géoïde EGM2008 dans l'espace alpin

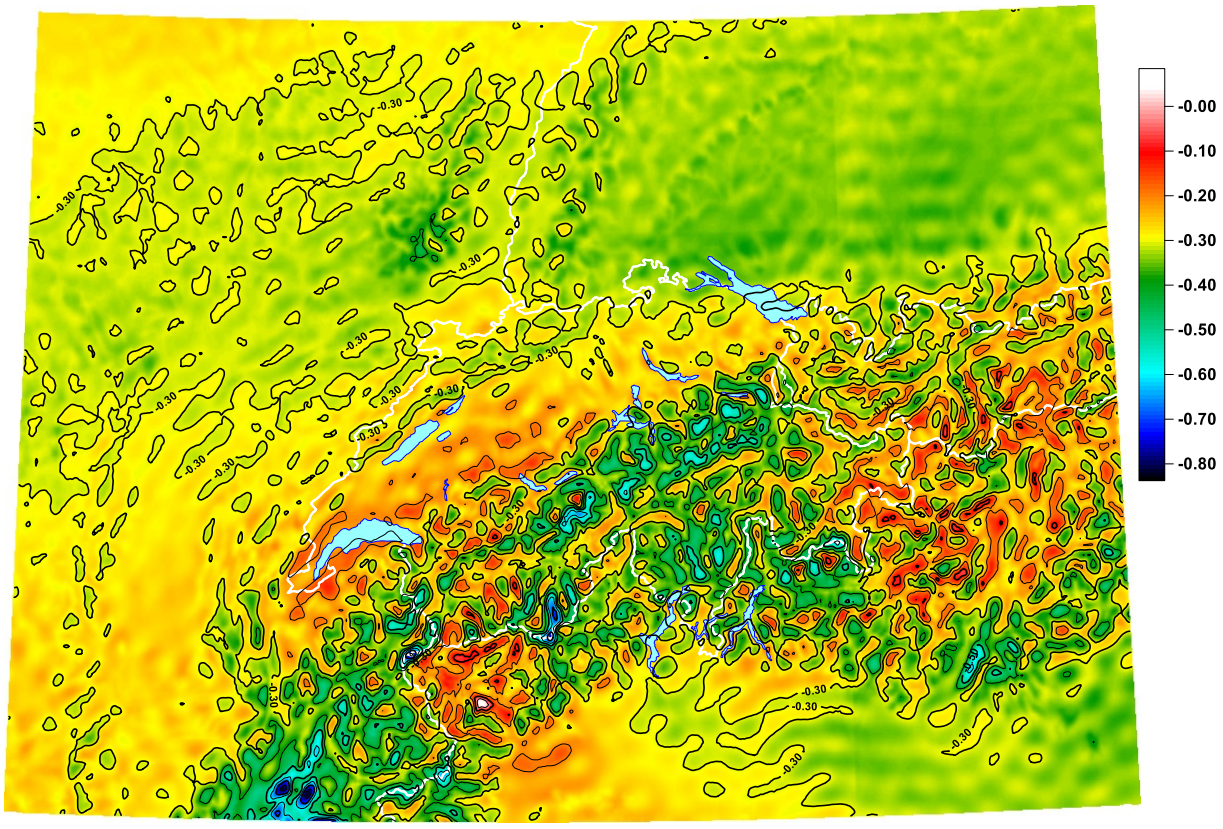


Figure 10-5: Différence EGM2008 moins EGG2015 (équidistance des isolignes: 10 cm)

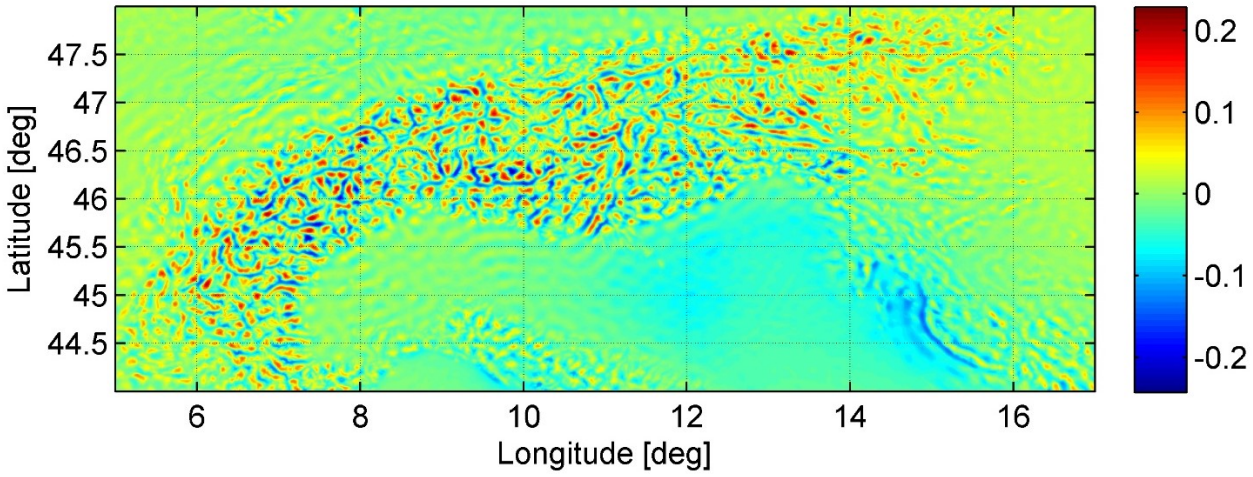


Figure 10-6: Part de l'effet de la topographie sur le quasi-géoïde dans l'espace alpin dans la plage de fréquences dépassant la résolution d'EGM2008 (représentation de C. Hirt, en [m])
https://geodesy.curtin.edu.au/research/resolution/eur-alp.cfm

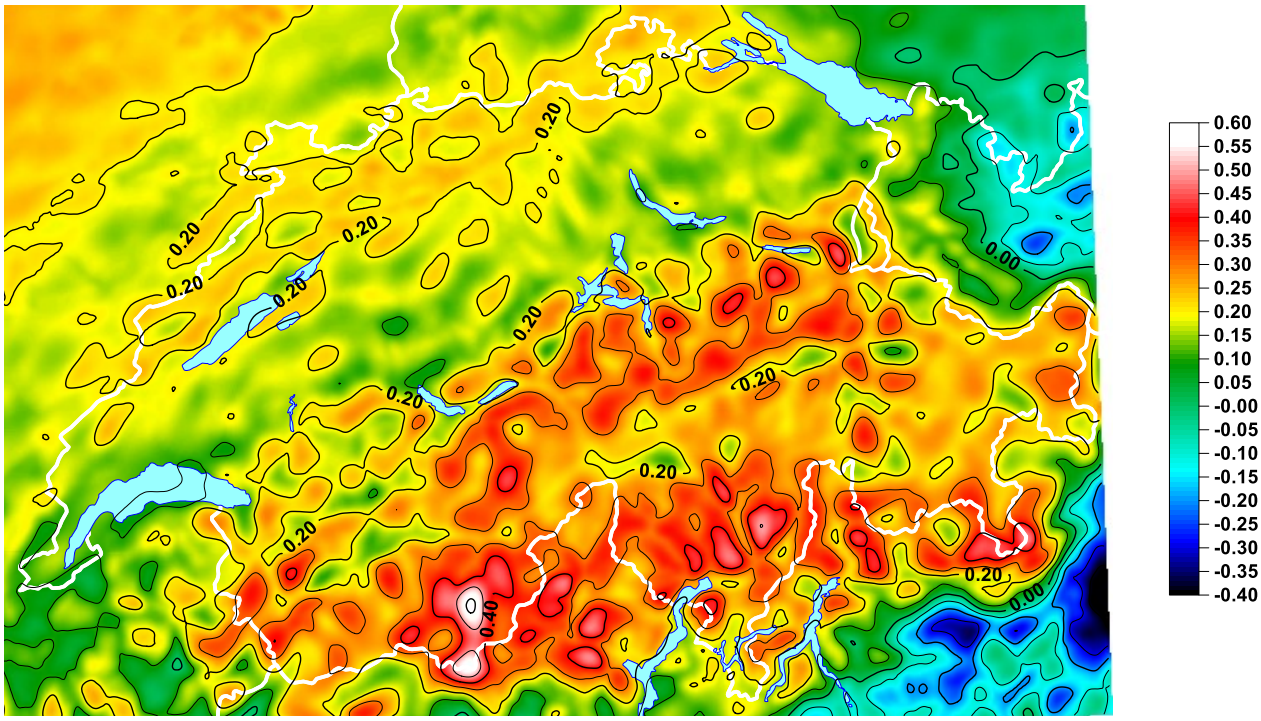


Figure 10-7: Différence CHGeo2004 moins EGM2008

11 Logiciels de calcul

Nous distinguons deux catégories de logiciels de calcul pour le géoïde. Il y a d'une part les programmes qui servent à déterminer le modèle de géoïde et d'autre part ceux diffusés aux utilisateurs finaux pour le calcul de côtes du géoïde et de déviations de la verticale.

11.1 Programmes pour le calcul du modèle de géoïde

Un nombre considérable de programmes est utilisé pour calculer un nouveau modèle de géoïde, chacun intervenant lors d'une étape donnée du processus. Ces programmes sont prévus pour être utilisés en interne, raison pour laquelle la convivialité n'est pas nécessairement leur caractéristique principale.

Le programme QUAWIRK sert surtout à calculer l'influence de modèles de masse sur les grandeurs relatives au champ de la pesanteur (déviation de la verticale, pesanteur et anomalie d'altitude). Un modèle particulier peut tout aussi bien être retenu ici qu'une combinaison de modèles. Le processus de calcul exact est piloté par un grand nombre de paramètres qui permettent de définir des distances limites pour l'approximation des masses par des pavés droits, des lignes ou des points de masse. QUAWIRK sert aussi à l'interpolation gravimétrique et au calcul de pesanteurs moyennes le long de la verticale. Le programme est utilisé à l'étape du retrait (remove) de la réduction des données brutes, puis à nouveau à celle de la restauration (restore) lors du calcul sur une grille régulière.

Le second programme central pour le calcul du géoïde s'intitule HITCOL (Harmonic Interpolation by Collocation ; version initiale de B. Wirth, [Wirth, 1990]). Il permet de calculer le vecteur de corrélation de la collocation à partir du champ des résidus des observations. Parmi les grandeurs sélectionnables, on citera d'abord le modèle de covariance et les paramètres qui lui sont associés. Le point de référence et la résolution de la grille peuvent en outre être sélectionnés pour le calcul des erreurs moyennes relatives. La sortie de la matrice Qxx complète peut aussi être réclamée pour un choix de points (en général les points de GPS-nivellement). Les paramètres du modèle de covariance sont obtenus de manière empirique à partir des observations réduites avec le programme D0SIG0.

Outre les deux programmes principaux QUAWIRK et HITCOL, d'autres programmes sont utilisés dans le cadre de tâches partielles. Les plus importants d'entre eux sont GEOPPT (calcul de l'influence d'une modélisation en harmoniques sphériques), LOTABW (calcul de déviations de la verticale à partir de coordonnées astronomiques et géodésiques), TOPOMOD (préparation des modèles numériques de terrain) et POTENZ (calcul de l'influence de polyèdres irréguliers).

Certains programmes ne sont pas mentionnés ici. Il s'agit de ceux qui servent à préparer les données brutes pour obtenir des valeurs "observées" (altitudes GPS ou de nivellement, coordonnées astronomiques). C'est notamment le cas de KINETZ et de programmes auxiliaires. Il y a enfin les programmes qui permettent la représentation graphique des résultats et les transformations de coordonnées.

11.2 Programmes pour les utilisateurs finaux

Le modèle de géoïde est diffusé sous la forme d'une grille régulière à la plupart des utilisateurs. Suivant le logiciel utilisé, la grille a une résolution de 1x1 km dans le système de projection suisse (CH1903/MN03 et CH1903+/MN95) ou de 0.5x0.5 minute d'arc en ETRS89. Une interpolation simple à partir des points de la grille est suffisante dans ce cadre. La méthode standard retenue est l'interpolation biquadratique à partir des 9 points de la grille qui sont les plus proches (cf. [Marti 1998]). Elle a initialement été réalisée au moyen du programme CHGeo-R de swisstopo. Ce dernier a été intégré par la suite au programme de transformation général REFRAME [Ray et Marti, 2007] et à GeoSuite [Ray, 2012]. Ces programmes permettent également de calculer la différence entre RAN95 et NF02 (via HTRANS) à l'aide d'une interpolation biquadratique. L'interpolation sur une grille est aussi incluse dans plusieurs logiciels développés par des producteurs externes.

L'interpolation sur une grille n'est pas particulièrement bien adaptée pour le calcul de déviations de la verticale. C'est pourquoi le programme GEOLOT04 a été développé pour les besoins propres à swisstopo. Si une interpolation sur une grille est également possible par son intermédiaire, il sert principalement à calculer directement des côtes du géoïde et des déviations de la verticale à partir des modèles de masse utilisés pour la modélisation, du modèle global et du vecteur de corrélation. Ce programme est surtout utilisé sur les serveurs Linux de swisstopo, mais une version fonctionnant sous Microsoft Windows existe aussi. Les options de GEOLOT04 visibles pour l'utilisateur ont volontairement été réduites au minimum (afin d'éviter les erreurs au maximum) et correspondent à celles du programme auquel il succède, à savoir

GEOLOT98 (cf. [Marti 2008]). Les paramètres d'entrée sont donc tous regroupés sur un seul écran (Figure 11-1).

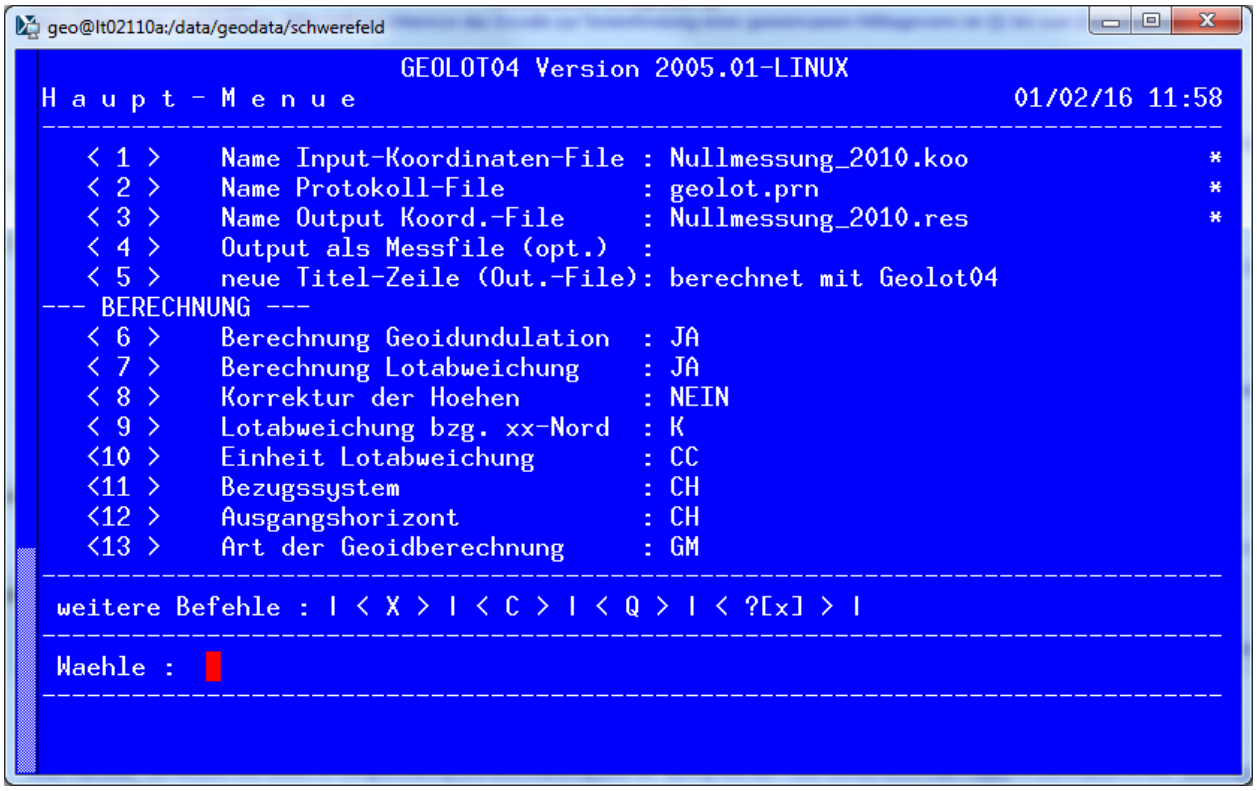


Figure 11-1: Ecran des options de GEOLOT04 (seulement disponible en allemand)

Le fichier d'entrée est sélectionné à l'option <1>. Seuls sont permis des fichiers aux formats LTOP PK (coordonnées nationales MN03 ou MN95 et altitudes orthométriques) et PE (hauteurs ellipsoïdales).

L'option <2> désigne le fichier de sortie comprenant le procès-verbal des calculs effectués.

L'option <3> est le fichier de sortie avec les grandeurs calculées au format LTOP PK ou PE.

L'option <4> permet de générer au besoin un fichier de mesures LTOP en sortie.

L'option <5> permet de saisir un titre qui apparaîtra dans tous les fichiers de sortie.

Les options <6> et <7> permettent d'indiquer le type de grandeurs calculées : déviations de la verticale, côtes du géoïde ou les deux à la fois.

L'option <8> permet de définir si les altitudes doivent être corrigées des côtes du géoïde dans le fichier des résultats. Le format du fichier des résultats (LTOP PK ou PE) s'en déduit.

L'option <9> permet d'indiquer si les déviations de la verticale calculées se rapportent au nord de la carte (K) ou au nord géographique (G). Il devrait toujours s'agir du nord de la carte pour des tâches de mensuration normales dans le système de projection suisse.

L'option <10> fixe les unités dans lesquelles les déviations de la verticale calculées sont présentées. Tous les programmes de swisstopo réclament les déviations de la verticale en secondes centésimales (CC). Toutefois, les secondes d'arc (") sont aussi possibles pour des applications particulières.

L'option <11> permet de sélectionner le système de référence des côtes du géoïde et des déviations de la verticale. Au choix : CH (il n'y a pas de distinction entre CH1903+ et CH1903) ou ETRS89.

L'option <12> désigne l'horizon de référence des altitudes. CH est normalement conservé. On obtient alors des côtes du géoïde dans le système suisse RAN95. Si ETRS89 est choisi, les altitudes sont exprimées dans le système européen EVRS. Le décalage altimétrique entre les deux est de 10,3 cm.

L'option <13> définit enfin le type de calcul du géoïde. Les entrées possibles sont GR (géoïde calculé à partir de la grille à 1 km), QR (calcul du quasi-géoïde à partir de la grille), GM (géoïde calculé à partir de modèles de masse) et QM (calcul du quasi-géoïde à partir de masses). Cette option est sans effet pour les déviations de la verticale. Elles sont toujours calculées à partir de masses.

Il s'agit là de la liste complète des options prévues pour des applications standard. Il est toutefois possible, pour des calculs spéciaux, d'adapter directement de très nombreux paramètres dans le fichier des options (nom par défaut : GEOLOT04.OPT). On peut ainsi calculer l'influence de certains modèles partiels ou accroître la précision des calculs (au détriment de leur vitesse d'exécution) en optant pour des paramètres de calcul plus précis. On peut également calculer l'effet produit par des corps perturbateurs que l'on a soi-même défini ou par d'autres modèles de terrain que la combinaison de MNT25 et de SRTM utilisée en standard (cf. § 3.1).

12 Travaux postérieurs à l'achèvement de CHGeo2004

D'autres grandeurs relatives au champ de pesanteur ont été mesurées après la publication du modèle de géoïde CHGeo2004. Si elles peuvent d'ores et déjà servir à contrôler CHGeo2004, elles se montreront également utiles lors d'une détermination future du géoïde. Il s'agit notamment de nouvelles stations GPS-nivellement accroissant encore la densité du réseau, mais aussi de nouvelles déviations de la verticale, mesurées pour des projets locaux ou pour vérifier le modèle de géoïde de manière ciblée. On citera en particulier ici le travail de diplôme de M. Ganz [Ganz, 2007] concernant une détermination locale du géoïde au col du Susten et le travail de master de B. Lindegger [Lindegger, 2011] relatif à l'amélioration du modèle de géoïde en Basse-Engadine. Il s'agit de deux zones identifiées comme posant problème lors du calcul de CHGeo2004. Les mesures effectuées sur 8 points du CERN ont en outre été répétées en 2009-2010 [Guillaume, 2015].

12.1 Extension du périmètre

Le souhait suivant a été exprimé en 2009 : étendre le périmètre de CHGeo2004 de manière qu'il couvre intégralement la zone utilisée par swisstopo dans les modèles numériques du paysage (MTP, modèle topographique du paysage). C'est pourquoi le périmètre initial (MN03, 480'000 – 840'000 en direction ouest-est et 60'000 – 302'000 en direction sud-nord) a été étendu afin de coïncider avec celui du MTP (460'000 – 868'000 et 42'000 – 322'000).

Il ne s'agissait pas d'une question de précision, mais uniquement de permettre l'exécution de transformations altimétriques dans ces zones marginales. C'est pourquoi cette extension a aussi été réalisée de manière relativement simple en recourant tout bonnement aux côtes du quasi-géoïde issues du modèle européen EGG97 dans ces secteurs. C'est évidemment incorrect en toute rigueur et cela provoque parfois des sauts de plus de 10 cm dus aux systèmes altimétriques différents et à la non-prise en compte de l'écart entre géoïde et quasi-géoïde. C'est toutefois suffisant pour les besoins du MTP.

Le périmètre des trois grilles partielles de HTRANS a aussi été étendu de manière similaire. Les anomalies de Bouguer (composante dépendante de l'altitude) ont été calculées à partir du jeu de données du BGI, la composante liée à la planimétrie a été extrapolée à partir des données suisses et la partie corrective a été négligée.

A partir de 2010, le fichier grille remis à tous les utilisateurs externes comportait le périmètre étendu.

12.2 Points GPS-nivellement supplémentaires

L'exécution de nouvelles mesures de nivellement offre souvent une possibilité relativement simple de créer de nouveaux points GPS-nivellement. Ces points peuvent alors servir à vérifier la précision du modèle de géoïde. Les lignes de nivellement concernées sont généralement des lignes cantonales ou des lignes mesurées pour le compte de l'OFEV. Les lignes considérées sont intégrées dans la compensation globale de RAN95 et des mesures gravimétriques sont effectuées. Les points GPS-nivellement résultent du rattachement de points MN95 au nivellement fédéral ou d'une campagne GPS de faible ampleur conduite sur des points créés tout spécialement.

Les points de GPS-nivellement ayant ainsi vu le jour entre 2005 et 2014 sont répertoriés sur le Tableau 12-1. Il suffit de consulter les résidus (altitude orthométrique issue de RAN95 moins altitude orthométrique provenant du GPS et de CHGeo2004) pour se faire une idée de la précision du modèle de géoïde et du degré de réalisation de l'objectif d'un cadre altimétrique cohérent. Le résidu restant moyen s'élève à 1,7 cm, ce qui est satisfaisant. La comparaison fournit d'excellents résultats dans certains secteurs difficiles tels que le Valle Maggia (points Maggia et Cavergno), l'Oberland bernois (Zweilütschinen, Grindelwald, Stechelberg) ou la Suisse centrale (Engelberg, Emmetten, Muotathal). Les résultats sont également satisfaisants en Basse-Engadine et au col de la Flüela. Au col de l'Ofen, deux points ont été déterminés indépendamment l'un de l'autre et présentent tous deux des résidus supérieurs à 3 cm, indiquant une imprécision dans le modèle de géoïde. L'écart avec le cadre altimétrique atteint près de 7 cm au point de densification MN95 de Monteggio. Le géoïde s'y appuie surtout sur des mesures de déviation de la verticale effectuées à Bedigliora et à Luino. Il serait certainement judicieux de vérifier ces mesures à l'occasion. Le résidu de 2 cm sur la station AGNES du col de l'Oberalp se révèle également décevant, le point MN25 Oberalp tout proche (distant d'environ 250 m) ayant servi de point d'appui pour la détermination du géoïde. Cette différence doit aussi faire l'objet d'investigations plus poussées.

Ces points récents n'ont pas encore été intégrés de façon rigoureuse dans une compensation globale du réseau GPS ou du nivellement fédéral. Des résultats légèrement différents sont obtenus en fonction de l'exploitation effectuée (par exemple le modèle d'antennes utilisé). La prise en compte des mouvements

verticaux constitue une autre source d'erreur. RAN95 est toujours ramené, par calcul, à l'époque 1993 avec le modèle de vitesses, tandis que les résultats GPS utilisés ont toujours été considérés comme statiques – validité limitée à l'époque des mesures – jusqu'à présent. Des divergences de plusieurs centimètres peuvent en résulter. Le modèle de géoïde a aussi été considéré comme statique jusqu'à présent. Il va de soi que ce n'est pas entièrement vrai.

Il faut signaler ici que de nouvelles altitudes ont été attribuées à tous les autres points GPS-nivellement utilisés dans CHGeo2004, à la suite de nouvelles mesures de rattachement au nivellement et de la campagne GPS CHTRF2010. A de rares exceptions près, ces modifications altimétriques sont inférieures à 1 cm sur des points stables.

Tableau 12-1: Points GPS-nivellement mesurés après la publication de CHGeo2004 et résidus associés

Lieu	Pt. n° (niv.)	Résidus GPS-niv. [cm]	Provenance, remarques
Engelberg	OW 14s	**-1,0**	Nivellement fédéral 2005
Emmetten	NW 77	**2,5**	Nivellement fédéral 2005
Muotathal	SZ 16s	**-2,1**	Nivellement cant. / mandat OFEV 2005
Monteggio	TI 637	**-6,9**	Nivellement fédéral 2006
Maggia	TI 200s	**-1,3**	Nivellement cant. / mandat OFEV 2007
Cavergno	TI 201s	**-0,2**	Nivellement cant. / mandat OFEV 2007
Gaster	SG 690	**-0,8**	Nivelé en 2008
Montlingen	SG 657a	**-0,1**	Nivelé en 2009
Pass dal Fuorn	GR3 565	**3,9**	Nivelé en 2012
Einsiedeln	SZ 185	**-1,5**	Nivellement fédéral 2013
Schiers	GR2 353	**0,0**	Nivelé en 2014
Zweilütschinen	BEO 1047	**-1,2**	Mandat OFEV 2012-2014
Grindelwald	BEO 1094	**-0,7**	Mandat OFEV 2012-2014
Stechelberg	BEO 1159	**-0,1**	Mandat OFEV 2012-2014
Oberalp AGNES	GR1 578	**-2,1**	Rattachement station AGNES 2014
Col de la Flüela	GR3 273 exz	**-0,7**	Travail de master 2011
Sent	GR3 312 exz	**-0,2**	Travail de master 2011
Ramosch	GR3 318 exz	**-0,4**	Travail de master 2011
Sclamischot	GR3 326 exz	**3,7**	Travail de master 2011
Col de l'Ofen	GR3 357 exz	**3,5**	Travail de master 2011
Pfunds (A)	A 38610 exz		Travail de master 2011, reste à niveler

12.3 Travaux effectués pour le tunnel de base du Saint-Gothard

En 2005, quelques déviations de la verticale ont également été déterminées aux alentours des portails pour le réseau primordial du tunnel de base du Saint-Gothard (en plus de mesures gravimétriques et d'azimuts, cf. Bürki et al. 2005). Les deux systèmes numériques DIADEM de l'ETH Zurich et TZK2-D de l'Université de Hannover ont été utilisés sur 4 des 5 points des portails (Bodio, Faido, Amsteg et Erstfeld), seul celui de l'ETHZ ayant été mis en œuvre à Sedrun. La comparaison des résultats obtenus avec les deux caméras a montré que la précision était d'environ 0,1". La comparaison avec les déviations de la verticale calculées à partir de CHGeo2004 a fait apparaître un écart maximal de 1" à Sedrun (cf. Tableau 12-2).

Tableau 12-2: Déviations de la verticale interpolées à partir de CHGeo2004, mesurées et écarts entre elles

Différences déviations de la verticale (CHGeo2004) – DV observées (CH1903+, nord carte)						
	Modèle CHGeo2004		Mesure		Déviation du modèle CHGeo2004-mesure	
Stations	ξ calc. ["]	η calc. ["]	ξ obs. ["]	η obs. ["]	dξ	dη
Bodio	3,96	13,69	3,97	14,13	**-0,01**	**-0,44**
Faido	-7,75	7,86	-7,31	8,55	**-0,44**	**-0,69**
Erstfeld	16,87	10,25	16,74	10,88	**-0,13**	**-0,63**
Amsteg	18,62	-9,67	18,93	-9,03	**-0,31**	**-0,64**
Sedrun	1,04	4,43	2,05	4,47	**-1,01**	**-0,04**

12.4 Travaux réalisés au col du Susten

Le secteur du col du Susten a été identifié comme posant problème dès le calcul du modèle de géoïde CHGeo98, une contrainte d'environ 10 cm étant apparue entre les deux stations GPS-nivellement à Wassen et à Wyler. C'est pourquoi plusieurs points ont été mesurés dans cette zone lors de la campagne réalisée en 2003 avec une caméra zénithale [Marti et al. 2004]. Si le problème a pu être partiellement résolu ainsi (en conjonction avec la campagne GPS CHTRF2004), quelques questions sont toutefois restées en suspens. Un projet spécifique visant à améliorer le modèle de géoïde dans ce secteur a donc été mené en 2007, dans le cadre d'un travail de diplôme effectué à l'ETH Zurich [Ganz, 2007]. Il prévoyait de mesurer la déviation de la verticale avec la caméra zénithale numérique DIADEM en des points très proches les uns des autres, situés sur un profil franchissant le col. Un modèle de géoïde local devait être calculé à partir de là. En raison des mauvaises conditions météorologiques, les mesures prévues n'ont pas pu être exécutées en totalité, mais 22 nouvelles stations distantes de 1,5 km en moyenne sont venues s'y ajouter, de sorte que le projet a pu être conclu avec succès. Quatre des nouvelles stations étaient pratiquement identiques à des stations de la campagne CHGeo2003. Ces mesures répétées ont permis de confirmer la précision élevée du système DIADEM (de 0,1" à 0,2"). Une coordonnée géodésique erronée a cependant été détectée pour le point à Gadmen, entraînant des conséquences directes sur le modèle de géoïde CHGeo2004. Du fait de cette erreur, les côtes du géoïde ont été faussées dans ce secteur (écart maximal de 3 cm) et les altérations restent significatives jusqu'à une distance de 15 km de Gadmen. Les autres nouvelles stations de déviation de la verticale n'ont plus modifié le modèle de géoïde que dans une fourchette de ± 6 mm. En comparant une solution purement astro-géodésique à une autre fondée sur le GPS-nivellement, on s'est aperçu de l'absence presque totale de modifications sur le versant ouest entre Innertkirchen et le col, alors que des différences pouvant atteindre 20 mm sont apparues sur le versant est. On en a conclu que le point GPS-nivellement à Wassen ne présentait peut-être pas le niveau de qualité requis.

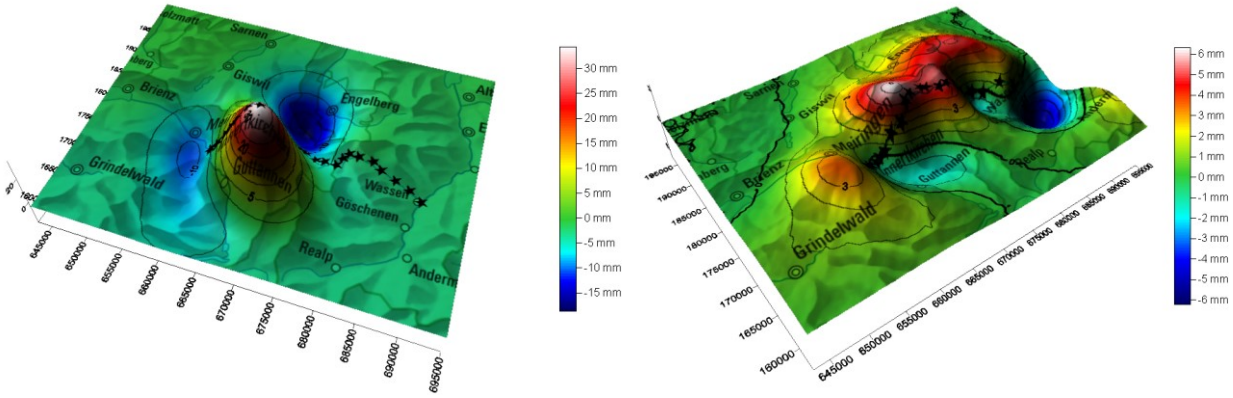


Figure 12-1: A gauche : effet produit sur le modèle de géoïde par la déviation de la verticale erronée à Gadmen **;** à droite: effet produit par les mesures de déviation de la verticale réalisées en 2007 sur le modèle de géoïde (issu de [Ganz, 2007])

12.5 Détermination du géoïde en Basse-Engadine

C'est en Basse-Engadine que l'on observe l'incertitude la plus grande pour le modèle de géoïde CHGeo2004 et les divergences les plus fortes entre déviations de la verticale et le GPS-nivellement. Une campagne a été menée en 2011, en collaboration avec l'ETHZ et l'Université de Zurich, pour analyser cette situation. Quelques nouvelles déviations de la verticale ont alors été mesurées avec DIADEM et des points GPS-nivellement supplémentaires ont aussi été déterminés. Les mesures et les résultats sont décrits dans [Lindegger, 2011].

Les mesures astronomiques ont été réalisées durant deux nuits en mai 2011. Elles ont concerné cinq stations en Basse-Engadine, mais également une en Autriche et trois en Italie. L'un des points (celui de Pradella) avait déjà été mesuré en 2003 avec DIADEM, ce qui a permis à ce système d'administrer la preuve de sa qualité, les différences enregistrées étant inférieures à 0,1". Les mesures effectuées en Suisse dans la partie supérieure (Ftan, Tarasp et Pradella) coïncident très bien avec le modèle, tandis que celles exécutées dans la partie inférieure (Plattamala, Sclamischot) présentent des écarts systématiques (cf. Tableau 12-3). On observe également des écarts systématiques entre les déviations de la verticale nouvellement mesurées en Italie et à Nauders et leurs valeurs prédites. Leur ordre de grandeur est de 10". Ces différences s'expliquent simplement par le fait que ces points se trouvent en dehors de la zone couverte par CHGeo2004. Les mesures ainsi réalisées seront toutefois très utiles lors d'une détermination future du géoïde. Les déviations de la verticale ont été traitées dans le cadre d'un nivellement astro-géodésique entre Zernez et Vinadi, intégrant aussi les mesures plus anciennes. Si la coïncidence est très bonne entre Zernez et Ramosch, des écarts systématiques apparaissent ensuite, dépassant 1" entre les déviations de la verticale mesurées et celles interpolées à partir de CHGeo2004. La contrainte existant toujours dans les données dans cette région est donc une nouvelle fois mise en évidence.

Trois nouveaux points GPS-nivellement (Ramosch, Sclamischot et Sent) sont venus s'ajouter à ceux déjà disponibles en Basse-Engadine. Deux points ont par ailleurs été mesurés au col de la Flüela et au col de l'Ofen. Un sixième point GPS à Pfunds (Autriche) n'a pas pu être utilisé, n'ayant pas encore été rattaché au nivellement. Ces points figurent sur le Tableau 12-1. Les différences entre les côtes du géoïde directement observées et les valeurs calculées en ces points à partir de CHGeo2004 sont généralement inférieures à 1 cm. Elles n'atteignent 3,5 cm environ sur les points situés à Sclamischot et au col de l'Ofen. Si un tel écart est parfaitement plausible au col de l'Ofen qui était dépourvu de tout point GPS-nivellement jusqu'alors, aucune raison expliquant l'intégralité de l'écart constaté à Sclamischot n'a pu être trouvée à ce stade. Une altitude GPS imprécise semblerait être la cause la plus probable.

Le travail effectué n'a pas permis d'expliquer complètement l'écart systématique existant entre les différents jeux de données. La présence d'une erreur grossière ou systématique dans les données GPS-nivellement a toutefois pu être exclue. De lourds soupçons pèsent sur la mesure astro-géodésique effectuée en 1992 sur le point MN95 à Ramosch. Elle pourrait être erronée et exercer une forte influence sur la solution en aval. Cette mesure devrait être vérifiée dès que l'occasion de le faire se présente.

Tableau 12-3: Déviations de la verticale mesurées en Basse-Engadine en 2011 et comparaison avec CHGeo2004

Différences déviations de la verticale (CHGeo2004) - DV observées (datum ETRS89)						
	Modèle CHGeo2004		**Mesure**		**Déviation du modèle CHGeo2004-mesure**	
Stations	**ξ calc. ["]**	**η calc. ["]**	**ξ obs. ["]**	**η obs. ["]**	**dξ**	**dη**
Ftan	-8,49	2,77	-8,31	2,54	**-0,18**	**0,23**
Tarasp	-0,22	0,02	0,07	0,04	**-0,29**	**-0,02**
Pradella	5,58	-2,97	5,70	-2,92	**-0,12**	**-0,05**
Plattamala	2,62	-3,10	3,77	-3,21	**-1,15**	**0,11**
Sclamischot	1,94	-0,41	4,09	-1,70	**-2,15**	**1,29**
Prato (I)	8,49	14,19	13,12	0,84	**-4,63**	**13,35**
Mals (I)	-4,23	8,08	-6,95	-1,67	**2,72**	**9,75**
Haidersee (I)	-4,03	7,1	-4,10	-2,29	**0,07**	**9,39**
Nauders (A)	5,15	-0,01	5,88	-8,12	**-0,73**	**8,11**

13 Résumé et perspectives

Le modèle de géoïde CHGeo2004 a été calculé en combinant des déviations de la verticale, des mesures gravimétriques et des observations GPS-nivellement. Toutes ont été réduites de l'influence de la topographie, du modèle de référence global EGM96 et d'autres masses locales. La collocation par la méthode des moindres carrés a été utilisée pour la prédiction. La solution définitive publiée se fonde sur les observations GPS-nivellement de bonne qualité, puisqu'elles y ont pratiquement été maintenues fixes. Il en résulte un système altimétrique cohérent entre les altitudes orthométriques issues du nivellement et celles provenant du GPS et du géoïde. La précision du modèle de géoïde est de l'ordre de 1 à 3 cm en moyenne dans l'ensemble de la Suisse. Les points GPS-nivellement mesurés après la publication du modèle ont permis de le vérifier, même si des résidus plus élevés apparaissent encore dans certaines zones. Les différences par rapport au modèle précédent (CHGeo98) sont généralement inférieures à 4 cm lorsque le relief est peu accidenté. Dans certaines zones montagneuses, on enregistre des écarts supérieurs à 10 cm et ils dépassent 20 cm en Basse-Engadine. La majeure partie de ces écarts est due au fait que CHGeo2004 est fortement contraint sur les points GPS-nivellement. On constate notamment des divergences systématiques par rapport aux déviations de la verticale en Basse-Engadine. Elles n'ont pas encore été totalement élucidées.

Le modèle de géoïde calculé CHGeo2004 est diffusé aux utilisateurs depuis 2005 sous la forme de grilles régulières (l'une d'une résolution de 1 km dans le système de projection suisse et l'autre d'une résolution de 30" en ETRS89) et a largement fait ses preuves en pratique depuis lors parmi les utilisateurs du GPS en Suisse. NF02 restant cependant le cadre altimétrique officiel de la mensuration officielle, la conversion altimétrique entre RAN95 et NF02 va rester nécessaire pendant un bon moment encore. C'est le programme HTRANS (aujourd'hui intégré dans REFRAME et GeoSuite) qui permet de l'effectuer, bien qu'il ne s'appuie que sur des points du nivellement fédéral jusqu'à présent. A proximité des lignes, la transformation est de bonne qualité (de l'ordre du centimètre). A l'écart des lignes, des différences supérieures à 10 cm peuvent apparaître. Il sera donc certainement judicieux de densifier le jeu de données utilisé dans HTRANS à l'avenir.

Le modèle CHGeo2004 présente une précision suffisante pour la plupart des applications en pratique, mais quelques faiblesses subsistent encore. Les points GPS-nivellement déterminés a posteriori ont permis de les mettre en lumière. Si les résidus se montent à 1.7 cm en moyenne, des écarts systématiques sont à déplorer dans certains endroits, par exemple à Malcantone (point Monteggio, presque 7 cm) ou au col de l'Ofen (plus de 3 cm).

Il est bien difficile de déterminer de nouveaux points GPS-nivellement judicieux en vue d'un futur modèle de géoïde amélioré, tant que l'on s'appuie uniquement sur les lignes du nivellement fédéral. Les écarts entre les hauteurs ellipsoïdales et les altitudes orthométriques sont très bien connus sur ces lignes. Peu de régions où de nouveaux points pourraient réellement se révéler opportuns ont été répertoriées durant le calcul de CHGeo2004 (on peut citer Schüpfen, les Franches-Montagnes, Saint-Gingolph, voire les secteurs de Meyrin ou de Moillesulaz dans le canton de Genève). Il serait plus judicieux de mettre en place de nouveaux points sur les nivellements cantonaux, mais ils devraient d'abord être introduits en RAN95, avec des altitudes réduites de la gravimétrie.

Le traitement différencié des mouvements verticaux dans le nivellement et le réseau GPS constitue aussi un point noir du calcul du géoïde tel qu'il a été réalisé jusqu'à maintenant. RAN95 a toujours été rapporté à l'époque 1993.0 jusqu'à présent, tandis que le réseau GPS MN95 fournit toujours des altitudes dont la validité est limitée au moment de la mesure. Si des vitesses sont aussi calculées depuis lors pour les points GPS, elles n'ont pas été prises en compte jusqu'alors dans le cadre du calcul du géoïde. Des divergences de quelques centimètres peuvent en résulter.

Une autre amélioration du modèle de géoïde, relativement simple à mettre en œuvre et peu onéreuse, peut être visée en procédant à de nouvelles mesures de déviation de la verticale. Les caméras zénithales numériques telles que DIADEM ou CODIAC, le système qui lui a succédé, atteignent des précisions de l'ordre de 0,1“ en assez peu de temps, de sorte qu'il est possible d'observer jusqu'à 10 stations par nuit. Un complément par de nouvelles déviations de la verticale serait pertinent dans des secteurs où des problèmes subsistent au niveau du modèle de géoïde (par exemple dans des vallées transversales au sud du Valais et dans le val d'Aoste ou dans certaines vallées au Tessin), là où seules de très anciennes mesures sont disponibles (par exemple dans la région de la Jungfrau, dans certaines parties des cantons de Lucerne et d'Argovie) ou dans des zones insuffisamment couvertes par des mesures gravimétriques (dans les cantons des Grisons, de Glaris et de Schwyz).

Le modèle global à haute résolution EGM2008 est par ailleurs disponible désormais. Il peut servir de référence et contient déjà la plus grande partie du signal du champ de pesanteur. Ainsi, il ne reste

pratiquement plus à se préoccuper que de petites perturbations locales lors d'une détermination régionale du géoïde. Un modèle de terrain de résolution plus élevée (comme swissAlti3D en lieu et place de MNT25) n'apporte pas d'amélioration décisive du calcul du géoïde. Il s'agirait en revanche d'une réelle avancée pour l'interpolation gravimétrique. L'introduction d'un modèle de densité amélioré, notamment pour les vallées quaternaires et l'utilisation des données bathymétriques les plus récentes pour les lacs les plus étendus seraient plus importantes. Les masses des glaciers ont elles aussi été insuffisamment modélisées jusqu'à présent, ce qui conduit à des difficultés locales lors de la détermination du géoïde, les mesures disponibles étant généralement rares dans ces zones.

La collocation par la méthode des moindres carrés a fait toutes ses preuves comme méthode de calcul et reste aisément utilisable avec des ordinateurs modernes pour un pays peu étendu comme la Suisse. Il vaudrait toutefois mieux effectuer tous les calculs de modèles de masse de manière rigoureuse sur l'ellipsoïde, afin d'écarter toute influence éventuelle des déformations dues à la projection, et étendre encore le périmètre des modèles de masse (notamment de la topographie) afin de minimiser les effets aux marges.

Bibliographie

Bürki B., Ganz M., Hirt Ch., Marti U., Müller A., Radogna PV., Schlatter A., Wiget A. (2005): Astrogeodätische und gravimetrische Zusatzmessungen für den Gotthard-Basistunnel. swisstopo-Report 05-34. Office fédéral de topographie, 2005.

Brockmann E. (2003): CHGeoid2003. Planung und Auswertung der GPS Messungen. swisstopo-Report 03-30. Office fédéral de topographie, 2003.

Denker H, Torge W. (1998): The European gravimetric quasigeoid EGG97 – An IAG supported continental enterprise. IAG Symposia 119: 249-254, Springer Verlag.

Forsberg R. (1994): Terrain Effects in Geoid Computations. In: International School for the Determination and Use of the Geoid. Lecture Notes. Milan, 1994.

Ganz M. (2007): Geoidbestimmung am Sustenpass. Travail de diplôme réalisé à l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich, 2007.

Guillaume S. (2015): Determination of a Precise Gravity Field for the CLIC Feasibility Studies. Dissertation ETH N° 22590, 2015.

Hirt C, Featherstone W., Marti U (2010) Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data to improve quasigeoid computations in mountainous areas devoid of gravity data, J Geod 84(9): 557-567, doi: 10.1007/s00190-010-0395-1.

Lemoine F., Kenyon S., Factor J., Trimmer R., Pavlis N., Chinn D., Cox C., Klosko S., Luthcke S., Torrence M., Wang Y., Williamson R., Pavlis E., Rapp R., Olson T. (1998). The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998-206861.

Lindegger B. (2011): Zur Problematik der Geoidbestimmung im Unterengadin. Masterarbeit GEO 511. Institut de géographie de l'Université de Zurich. Département de télédétection, 2011.

Marti U. (1997): Geoid der Schweiz 1997. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 56. Commission géodésique suisse, 1997.

Marti U. (1998): Das Geoid der Schweiz 1998. Technische Ergänzungen zur Neuberechnung des Geoids der Schweiz. Technischer Bericht 98-25. Office fédéral de topographie, 1998.

Marti U. (2002a): Aufbau der neuen Landesvermessung LV95. Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998 „CHGeo98". swisstopo-Doku Nr. 16. Office fédéral de topographie, 2002.

Marti U. (2002b): LHN95: Übergang zwischen den Höhensystemen LN02 und LHN95. swisstopo-Report 01-32. Office fédéral de topographie, 2002.

Marti U. (2003): Projekt LHN95: Der Übergang zwischen den Höhenrahmen LN02 und LHN95. Anpassungen und weitere Testberechnungen. swisstopo-Report 03-10. Office fédéral de topographie, 2003.

Marti U., Hirt C., Müller A., Bürki B. (2004): CHGeoid2003: Astrogeodätische Messungen mit digitalen Zenitkameras vom 7.-29. Oktober 2003. swisstopo-Report 03-33. Office fédéral de topographie, 2004.

Olivier R., Dumont B., Klingelé E. (2010): L'atlas gravimétrique de la Suisse. Géophysique N.43. Contribution à la géologie de la Suisse. ISSN 0253-1186. Commission géophysique suisse, 2010.

Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) -; Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012) Volume 117, Issue B4, avril 2012.

Ray J., Marti U. (2007): REFRAME. Changement de cadre de référence planimétrique et/ou altimétrique. Manuel de swisstopo 07-f. Office fédéral de topographie, 2007 (avec mise à jour de 2009).

Ray J. (2012): GeoSuite. Manuel de swisstopo 10-f. Office fédéral de topographie, 2012 (avec mise à jour de 2013).

Schlatter A., Mattli B., Vogel B. (2003): Landeshöhennetz LHN95. Die Anschlüsse des GPS-Netzes LV95 und der AGNES-Stationen an das Landeshöhennetz (LHN95 und LN02). swisstopo-Report 02-33. Office fédéral de topographie, 2003.

Schlatter A., Mattli B., Kistler M. (2005): CHGeoid2003. GPS/Nivellement Rekognoszierung, Versicherung, Nivellement-Anschlussmessungen und Punktdokumentation. swisstopo-Report 03-32. Office fédéral de topographie, 2005.

Schlatter A (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 72. Commission géodésique suisse, 2007.

Schneider D., Brockmann E., Marti U., Schlatter A. (2002): GPS-Geoid 2003 (CHGeo2003). Konzertierte Aktion für eine gezielte Verbesserung des Geoidmodells im Rahmen der neuen Landesvermessung LV95. swisstopo-Report 02-16. Office fédéral de topographie, 2002.

Wirth B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 42. Commission géodésique suisse, 1990.

Annexe A1

A1 Récapitulatif des points GPS-nivellement utilisés

Le tableau suivant répertorie les points GPS-nivellement tels qu'ils ont été utilisés pour le calcul de CHGeo2004. Les côtes du géoïde observées sont ici indiquées dans CH1903+ (MN95). La colonne dH fournit l'écart altimétrique (orthométrique) entre le point de nivellement et le point GPS. Cette différence est souvent égale à 0, les points étant généralement identiques. Si elle n'est pas égale à 0, il s'agit de hauteurs de mâts pour les stations AGNES, de corrections de sphères (-1,563 cm) pour certains points en Haut-Valais ou de l'écart altimétrique issu d'un nivellement local, si l'antenne GPS n'a pas pu être mise en place directement sur le point de nivellement.

La colonne U indique comment le point a été utilisé lors du calcul du géoïde. U: le géoïde a été fortement contraint sur ce point dans la solution définitive; R: utilisé avec un poids réduit dans le calcul; E: éliminé des calculs.

Point niv.	Point GPS	Nom point du géoïde	H. ell. MN95	Alt. orth. RAN95	dH Niv-GPS	Côte obs.	U
SH 106	1031.366	Siblingen	516.7156	514.9939	0.0000	1.7217	U
BS 41	1047.700	Chrischona	457.1381	455.9147	0.0000	1.2234	U
AG 70s	1049.400	Laufenburg	360.7141	359.5160	0.0000	1.1981	U
SH 107	1051.600	Buchberg	525.6618	524.9007	0.0000	0.7611	U
SG 658	1075.400	Goldach	501.0183	500.6622	0.0000	0.3561	U
AUT 1	1076.800	Pfänder	1043.6172	1042.5276	0.0000	1.0896	U
JU 188	1085.700	Les Rangiers	839.1096	838.3907	0.0000	0.7189	U
ZH 76s	1091.300	Hönggerberg	528.1871	528.2036	0.0000	-0.0165	U
SG 657	1096.100	Montlingen	420.0233	419.5210	0.0000	0.5023	U
SO 215	1107.300	Riedholz	514.0403	513.9267	0.0000	0.1136	U
LU 357	1129.500	Knutwil	578.0420	578.3639	0.0000	-0.3219	U
AG 636	1130.800	Sins	427.1376	427.6498	0.0000	-0.5122	U
SZ 171	1151.500	Oberarth	455.4134	455.6224	0.0000	-0.2090	U
GL 146	1153.700	Glarus	521.5135	520.7734	0.0000	0.7401	U
SG 653	1155.500	Sargans	514.7824	514.0053	0.0000	0.7771	U
BES 499	1168.100	Signau	706.0139	706.2988	0.0000	-0.2849	U
VDO 455	1182.621	Col des Etroits	1165.8155	1166.0449	0.0000	-0.2294	U
BES 498	1186.800	Zimmerwald	906.5501	897.9061	9.1895	-0.5455	U
UR 308	1192.000	Altdorf	458.3587	457.4950	0.0000	0.8637	U
UR 309	1193.000	Klausenpass	1956.9456	1955.3296	0.0000	1.6160	U
GR1 530	1195.300	Bonaduz	663.8483	662.8916	0.0000	0.9567	U
GR2 309	1197.300	Davos	1564.0824	1561.3763	0.0000	2.7061	U
BEO 596	1207.500	Thun	562.0523	562.3711	0.0000	-0.3188	U
BEO 597	1209.500	Brienz	649.8377	648.9887	0.0000	0.8490	U
GR3 483	1218.400	Zernez	1565.2414	1561.4676	0.0000	3.7738	U
VDO 454	1221.600	Le Lieu	1052.4566	1052.9635	0.0000	-0.5069	U
VDO 457	1222.700	La Sarraz	534.7072	535.7870	0.0000	-1.0798	U
FR 360	1225.200	La Tour-de-Trême	747.9703	748.4745	0.0000	-0.5042	U
UR 311	1232.200	Oberalp	2045.0431	2043.0076	0.0000	2.0355	U
GR1 531	1235.500	Andeer	1089.6509	1087.8050	0.0000	1.8459	U
VDO 456	1242.700	Echandens	448.7878	450.2394	0.0000	-1.4516	U
BEO 598	1246.041	Saanen	1115.2205	1114.6944	0.0000	0.5261	U
VSD 419	1250.700	Grimsel	2172.5448	2170.2354	0.0000	2.3094	U
TI 608	1251.706	San Gottardo neu	2103.9448	2101.7444	0.0000	2.2004	U
VDO 453	1260.800	La Givrine	1206.3677	1207.4730	0.0000	-1.1053	U
TI 527	1273.550	Biasca neu	380.1440	379.3031	0.0000	0.8409	U
GR3 481	1274.600	Mesocco	805.7292	804.3908	0.0000	1.3384	U
GR3 482	1276.600	Maloja	1813.2212	1810.5061	0.0000	2.7151	U
VDE 502	1284.700	St-Triphon	447.8843	448.3964	0.0000	-0.5121	U
VSD 420	1289.400	Simplon	2011.5258	2009.5963	0.0000	1.9295	U
VSF 335	1306.400	Sion	593.6444	593.1834	0.0000	0.4610	U
TI 514	1312.600	Ascona	219.1103	218.8511	0.0000	0.2593	U

Point niv.	Point GPS	Nom point du géoïde	H. ell. MN95	Alt. orth. RAN95	dH Niv-GPS	Côte obs.	U
VSF 87s	1325.200	Martigny	574.4151	574.4051	0.0000	0.0100	U
VSF 336	1345.700	Bourg-St-Pierre	1631.2060	1629.8308	0.0000	1.3752	U
VSD 405	1348.100	Zermatt	1690.8028	1687.9440	-0.0156	2.8744	U
TI 512	1273.500	Biasca alt	290.1923	289.3786	0.0000	0.8137	E
SZ 91	1152.111.3	Rothenturm	922.0403	927.4034	-5.3772	0.0141	U
VSD 422	TURT_HP	Turtmann	623.7586	622.4889	-0.0156	1.2854	U
BEO 1t	1227.754	Tellenburg	845.6893	844.8364	0.0000	0.8529	U
VSD 366	1288.820	Lalden	651.8918	650.4027	-0.0156	1.5047	U
UR 310	1212.205	Amsteg	560.3339	558.8704	0.0000	1.4635	U
TI 515	1373.425	Stabio	378.8900	382.3000	0.0000	-3.4100	U
VSD 421	SUST_HP	Susten (VS)	677.8347	676.6630	-0.0156	1.1874	U
TI 513	1313.700	Bellinzona	275.3114	275.3065	0.0000	0.0049	U
AG 638	1070.261	Birrfeld	395.7020	395.3561	0.0000	0.3459	U
BEO 612	1226.558	Boltigen	834.2702	833.8466	0.0000	0.4236	U
NE 343	1164.222	Colombier	492.7894	493.1788	0.0000	-0.3894	U
OW 103	1190.030	Giswil	597.2600	596.5953	0.0000	0.6647	U
BEN 455	1147.338	Hindelbank	542.6263	543.1185	0.0000	-0.4922	U
ZH 426	1111.579	Kilchberg	499.0077	499.2999	0.0000	-0.2922	U
SG 660	1114.256	Krummenau	727.3268	726.9013	0.0000	0.4255	U
AG 637	1048.620	Möhlin	363.8119	362.5663	0.0000	1.2456	U
JU 189	1104.736	Muriaux	968.9620	968.2743	0.0000	0.6877	U
ZH 427	1071.424	Oberglatt	443.1141	442.7848	0.0000	0.3293	U
ZH 425	1111.162	Obfelden	467.0823	467.4830	0.0000	-0.4007	U
AG 639	1110.305	Sarmenstorf	625.9505	626.0971	0.0000	-0.1466	U
LU 361	1169.357	Schüpfheim	754.4701	754.4578	0.0000	0.0123	U
LU 374	1110.138	Schwarzenbach LU	687.7114	688.0444	0.0000	-0.3330	U
SG 659	1076.318	St. Margrethen	436.8084	436.2752	0.0000	0.5332	U
BEO 610	1211.215	Sustenpass	2266.3964	2264.3590	0.0000	2.0374	U
UR 319	1211.844	Wassen	878.4994	876.7129	0.0000	1.7866	U
BES 500	1187.445	Wichtrach	593.1127	593.6049	0.0000	-0.4922	U
BEO 611	1227.755	Wimmis	638.3572	638.2246	0.0000	0.1326	U
BEO 609	1210.344	Wyler	747.0447	745.5112	0.0000	1.5335	U
GR3 318	1143	GR3 318 (Ramosch)	1162.2825	1151.0889	6.8265	4.3672	R
OW 18	0712	OW 18 (Alpnach)	466.8311	470.3726	-3.7832	0.2417	R
TI 48	0792	TI 48 (Dalpe)	1001.4570	1012.3551	-12.8179	1.9198	R
BEO 448	0802	BEO 448 (Engstligenalp)	1181.9464	1174.2025	6.3069	1.4370	R
VSD 96	0812	VSD 96 (Fieschertal)	1058.9226	1053.1457	3.7508	2.0261	R
TI 367a	0822	TI 367A (Generoso)	269.5419	276.2561	-4.4899	-2.2243	R
BEO 2t	0852	BEKN 4212 (Grindelw.)	1244.9697	1229.1239	13.9472	1.8987	R
TI 455	0942	TI 455 (Sonvico)	555.9007	547.8745	8.2244	-0.1982	R
SG 640	9016	SG 640 (Bachtel)	446.6162	443.1552	3.6616	-0.2006	R
ZH 399	9036	ZH 399 (Buchberg)	393.0742	392.4319	-0.2111	0.8535	R
TG 249	9056	TG 249 (Dettighofen)	413.9850	415.3946	-1.9375	0.5279	R
SZ 149	9076	SZ 149 (Gaster)	424.4373	439.7894	-15.3700	0.0179	R
AG 535	9146	AG 535 (Lenzburg)	351.2088	361.7269	-10.8344	0.3163	R
TG 113	9166	TG 113 (Nollen)	454.1102	451.7745	1.9832	0.3525	R
SG 293	9176	SG 293 (Oberhelfen.)	586.6668	570.8944	15.5857	0.1867	R
ZH 85	9196	ZH 85 (Pfannenstiel)	425.3867	427.1238	-1.3290	-0.4081	R
TG 47	9205	TG 47 (Schauenberg)	488.1238	470.0895	17.7817	0.2526	R
SH 62	9226	SH 62 (Siblingen)	433.1260	433.0759	-1.4360	1.4861	R
SH 78	9246	SH 78 (Stammheim)	399.1009	401.4920	-3.3101	0.9190	R

Point niv.	Point GPS	Nom point du géoïde	H. ell. MN95	Alt. orth. RAN95	dH Niv-GPS	Côte obs.	U
VDE 300a	9326	VDE 300A (Chailly)	386.2759	380.4132	6.8572	-0.9945	R
VDO 294	9356	VDO 294 (Echandens)	474.3456	469.6061	6.1651	-1.4256	R
VDO 40	9366	VDO 40 (Essertines)	392.2238	394.7370	-0.8732	-1.6400	R
JU 134	9376	JU 134 (Fahy)	427.1041	411.8651	14.5532	0.6858	R
FR 277	9386	FR 277 (Forel)	464.7703	456.1883	9.4520	-0.8700	R
FR 118	9396	FR 118 (Fribourg)	594.6674	590.5008	4.8924	-0.7257	R
BEN 302	9426	BEN 302 (Langenthal)	481.0445	484.5683	-3.3888	-0.1349	R
NE 97	9436	NE 97 (Chaux-de-Fonds)	1166.5652	1166.0627	0.2957	0.2067	R
VDO 253	9456	VDO 253 (La Sarraz)	475.4452	485.0223	-8.4854	-1.0917	R
LU 221a	9506	LU 221A (Menzberg)	717.7628	726.5330	-8.5962	-0.1740	R
BL 131	9516	BL 131 (Metzerlen)	336.3492	335.9797	-0.3760	0.7454	R
FR 235a	9526	FR 235A (Moudon)	690.7628	685.2971	6.5542	-1.0884	R
BEJ 20	9546	BEJ 20 (Reconvilier)	654.4126	654.0557	-0.0960	0.4529	R
VDE 247	9566	VDE 247 (Savigny)	407.7259	400.5583	8.5634	-1.3959	R
BEN 114	9576	BEN 114 (Seedorf)	462.9322	462.6054	0.8537	-0.5269	R
NE 217	9606	NE 217 (Travers)	728.9604	729.5390	-0.5724	-0.0062	R
FR 352	9626	FR 352 (Vully)	431.4254	463.5294	-31.4373	-0.6667	R
BL 1t	FHBB	FHBB	329.8164	328.7925	0.0000	1.0239	U
GR2 336	DAVO	DAVO	1598.0967	1594.0292	1.3680	2.6995	U
TI 609	1253.210	Olivone	1337.4235	1335.7808	0.0000	1.6427	U
GR3 488	1257.410	Samedan	1723.3121	1720.0704	0.0000	3.2417	U
GR2 340	1256.412	Sur	1570.4716	1567.8648	0.0000	2.6068	U
GR3 487	1296.103	Bondo	803.8962	802.1241	0.0000	1.7721	U
GR2 339	1215.631	Sils i.D.	722.9459	721.6051	0.0000	1.3408	U
GR3 484	1239.800	Santa Maria	1355.9002	1351.7233	0.0000	4.1769	U
GE 1	0001	Pierre du Niton	371.3092	373.5949	0.3716	-2.6573	U
BEJ 41s	1125.200	Chasseral	1598.0309	1597.6593	0.0000	0.3716	U
AG 42	AG_42_GPS	AG 42 (FRIC)	328.8919	328.1128	-0.5388	1.3179	U
AG 471	AG_471_GPS	AG 471 (Wartburg)	407.5832	398.2959	9.1228	0.1646	U
BL 19a	BL_20_GPS	BL 19A (FHBB)	284.6178	264.8835	18.6332	1.1011	U
BL 42	BL_42_GPS	BL 42 (Sissacherfluh)	371.5454	372.0853	-1.3892	0.8493	U
FL 103	FL_103_GPS	FL 103 (Eschen)	455.8587	450.5660	4.7121	0.5806	U
GE 52	GE_52_GPS1	GE 52 (GENE)	409.9117	405.9518	6.3932	-2.4333	U
GE 52	GE_52_GPS2	GE 52 (Bossy)	409.8011	405.9518	6.2827	-2.4334	U
GR1 410a	GR1_411_GPS	GR1 410A (SARG)	528.9743	528.4721	-0.4515	0.9537	U
GR2 338	GR2_338	GR2 338 (Filisur)	890.7692	888.9136	0.0000	1.8556	U
GR2 37	GR2_38_GPS	GR2 37 (Schiers)	994.5715	991.1265	1.2615	2.1835	U
JU 170	JU_170_GPS	JU 170 (BOUR)	485.9135	483.9039	1.3978	0.6119	U
SH 51	SH_50_GPS	SH 50 (SCHA)	434.3016	432.5964	0.1036	1.6016	U
SZ 150	SZ_148_GPS	SZ 150 (UZNA)	437.0235	439.6964	-2.7012	0.0282	U
TG 3	TG_3_GPS	TG 3 (Frauenfeld)	422.6162	416.6540	5.5631	0.3991	U
ZH 317	ZH_316_GPS	ZH 316 (Brütten)	516.0393	519.4588	-3.4419	0.0224	U
LU 378	LUZE	LUZE	493.7040	484.1517	10.0376	-0.4853	U
ITA 101	028701	Gran San Bernardo	2466.4457	2465.2226	0.0000	1.2231	R
GL 150	1173.633	Linthal	682.2940	681.0371	0.0000	1.2569	U
VDO 1t	EPFL B	EPFL	409.0820	410.6314	0.0000	-1.5494	U
TG 313	KREU	KREU	483.8545	477.1260	6.1143	0.6142	U
GR3 507	SANB	SANB	1653.1317	1645.2419	6.1112	1.7786	U
GR3 512	ARDE	ARDE	1499.4781	1494.1562	1.3322	3.9897	U
UR 286	UR_285_GPS	UR 285 (ANDE)	1470.6503	1467.4981	1.0686	2.0836	U
BEO 127	BEO_127_GPS	BEO 127 (Beatenberg)	588.3131	580.7731	6.9433	0.5967	R

Point niv.	Point GPS	Nom point du géoïde	H. ell. MN95	Alt. orth. RAN95	dH Niv-GPS	Côte obs.	U
GR1 34a	GR1_34A_GPS	GR1 34A (Disentis)	1307.3159	1305.5100	0.0000	1.8059	U
GR1 463	GR1_463_GPS	GR1 463 (FALE)	704.5023	702.5321	0.8573	1.1129	U
NE 1t	NEUC B	NEUC	454.7608	455.1400	0.0000	-0.3792	U
NE 345	1163.400	Travers	786.7518	786.7845	0.0000	-0.0327	U
NE 346	1144.200	La Chaux-de-Fonds	1194.2823	1193.9340	0.0000	0.3483	U
JU 190	JU_190	Grandgourt	419.4905	418.8112	0.0000	0.6793	U
JU 191	JU_191	Choindez	480.4374	479.7864	0.0000	0.6510	E
NE 347	NE_347	Le Prévoux	1089.1669	1088.9084	0.0000	0.2585	U
NE 348	NE_348	Le Cernil	1178.4072	1178.3290	0.0000	0.0782	U
BS 1t	BS_1T	St. Louis	260.5541	259.4195	0.0000	1.1346	U
BL 154	BL_154	Liesberg Station	390.0482	389.3677	0.0000	0.6805	U
BEN 465	BEN_465	Biel/Bienne	470.7465	470.7452	0.0000	0.0013	U
VDO 458	VDO_458	Chamblon	448.7569	449.6231	0.0000	-0.8662	U
VDE 506	VDE_506	Monts de Corsier	755.7665	756.6843	0.0000	-0.9178	U
VDO 2t	VDO_2T	L'Asse	467.9638	469.7531	0.0000	-1.7893	U
VDE 507	VDE_507	Les Diablerets	1182.0164	1181.5389	0.0000	0.4775	U
FR 1t	FR_1T	Lessoc Station	780.7513	780.9189	0.0000	-0.1676	U
VSF 337	VSF_337	Le Châtelard	1132.2943	1131.8809	0.0000	0.4134	U
VSD 379	VSD_379	Stalden	824.5899	822.8415	-0.0156	1.7640	U
VSD 423	VSD_423	Gondo	949.6554	947.8936	0.0000	1.7618	U
VSD 424	VSD_424	Fiesch-Mühlebach	1199.5148	1197.3974	0.0000	2.1174	U
VSD 425	VSD_425	Oberwald (Furka)	1472.6058	1470.2839	0.0000	2.3219	U
OW 104	OW_104	Telliegg	434.6598	434.7600	0.0000	-0.1002	U
BEN 1t	BEN_1T	Riedtwil	503.9934	504.2795	0.0000	-0.2861	U
SG 1t	SG_1T	Wil	576.4254	576.2051	0.0000	0.2203	U
GR1 1t	GR1_1T	Tavanasa-Waltensburg	770.4675	769.1155	0.0000	1.3520	U
GR1 549	GR1_549	Splügenpass	2122.1210	2120.1099	0.0000	2.0111	U
GR3 516	GR3_516	Vinadi	1063.6565	1058.9760	0.0000	4.6805	U
GR3 515	GR3_515	Ramosch	1147.1403	1142.7044	0.0000	4.4359	U
BEO 614	BEO_614	Guttannen	1216.2867	1214.0955	0.0000	2.1912	U
VSF 338	VSF_338	Grand St. Bernard	2476.7054	2475.4290	0.0000	1.2764	U
GR1 550	GR1_550	Parpan	1494.7513	1493.0840	0.0000	1.6673	U
SG 669	SG_670	Wagen/Eschenbach	461.2415	461.4238	0.0000	-0.1823	U
BEO 616	1208.733	Ringgenberg	609.2578	608.6271	0.0000	0.6307	U
BEJ 1t	BEJ_1T	Moutier	529.3047	528.8236	0.0000	0.4811	U
VDE 505	VDE_505	Bressonaz	532.2789	533.4024	0.0000	-1.1235	U
VDE 1t	PAYE B	PAYE	498.3274	499.2877	0.0000	-0.9603	U
BES 157a	BES_157A	Niederried	462.9759	463.5570	0.0000	-0.5811	U
BES 1t	1145.833	Kallnach	481.6392	482.1740	0.0000	-0.5348	U
GR2 350	1216.539	Filisur	1146.9049	1144.6796	0.0000	2.2253	U
TI 610	TI_610	Prato	832.8439	831.1322	0.0000	1.7117	U
UR 341	UR_341	Tiefenbach	2124.9885	2122.6696	0.0000	2.3189	U
TI 328	TI_328	Taverne	371.8561	372.5729	0.0000	-0.7168	U
TI 1t	TI_1T	All'Acqua	1614.6232	1612.3169	0.0000	2.3063	U
GR3 517	GR3_517	Campocologno	538.6728	536.2951	0.0000	2.3777	U
GR3 534	1278.200	Berninapass	2332.6890	2329.1763	0.0000	3.5127	U
GE 52	1281.000	Bossy	446.2820	405.9518	42.6395	-2.3092	U
TI 608	1251.700	San Gottardo alt	2111.1339	2101.7444	7.1825	2.2070	E
SH 1t	1011.816	Wiechs	707.0271	704.8845	0.0000	2.1426	U

Série des rapports relatifs à la nouvelle mensuration nationale MN95

Berichte aus der der L+T (jusqu'en 2002) **/ swisstopo-Doku Série MN95**		
N°	**Titre** (auteurs)	**Edition**
6	**Teil 1: Vorgeschichte, Entstehung des Projekts, Konzept und Planung** (**D. Schneider**, E. Gubler und A. Wiget)	**1996**
7	**Teil 2: Geostation Zimmerwald: Satellite Laser Ranging (SLR) und GPS-Permanentbetrieb** (**U. Wild** und W. Gurtner)	**1995**
8	**Teil 3: Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen** (**D. Schneider**, E. Gubler, U. Marti und W. Gurtner)	**2001**
8 f	**3ème partie: Systèmes et cadres de référence terrestres** (**D. Schneider**, E. Gubler, U. Marti und W. Gurtner, traduit par H. Dupraz)	**2001**
9	**Teil 4: Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung 'DIA93'** (**H. Chablais**, Th. Signer und B. Vogel)	**1995**
11	**Teil 5: GPS-Landesnetz: Netzanlage, Materialisierung, Dokumentation und Nachführung** (**W. Santschi**, B. Vogel, Th. Signer und D. Gutknecht)	**1998**
12	**Teil 6: GPS-Landesnetz: GPS-Messungen 1988-94** (**B. Vogel**, A. Wiget, Th. Signer, D. Gutknecht und W. Santschi)	**1997**
13	**Teil 7: GPS-Landesnetz: Auswertung der GPS-Messungen 1988-94; Bezugsrahmen 'CHTRF95' und 'LV95'** (**A. Wiget**, U. Wild, Th. Signer und B. Vogel)	**2003**
14	**Teil 8: Gesamtausgleichungen des GPS-Landesnetzes mit dem Diagnosenetz der Triangulation 1. und 2. Ordnung 'DIA95'** (**Th. Signer** und B. Vogel)	**2001**
15	**Teil 9: GPS-Landesnetz: Verdichtung und Bezug zur bisherigen Landesvermessung. Transformation 'LV95 <-> LV03'** (**Th. Signer** und B. Vogel)	**1999**
16	**Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998** (**U. Marti**)	**2003**
19	**Teil 11: Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Stationsnetz und Positionierungs-dienste** (**U. Wild**, S. Grünig und R. Hug)	**2006**
20	**Teil 12: Landeshöhennetz 'LHN95': Konzept, Referenzsystem, kinematische Gesamt-ausgleichung und Bezug zum Landesnivellement 'LN02'** (**A. Schlatter** und U. Marti)	**2007**
21	**Teil 13: Einführung des Bezugsrahmens 'LV95' in die Nationale Geodateninfrastruktur** (**B. Vogel,** M. Burkard, M. Kistler, U. Marti, J. Ray, M. Scherrer, A. Schlatter und A. Wiget)	**2009**
21 f	**13ème partie: Introduction du cadre de référence 'MN95' dans l'infrastructure nationale de données géographiques** (**B. Vogel,** M. Burkard, M. Kistler, U. Marti, J. Ray, M. Scherrer, A. Schlatter und A. Wiget)	**2009**
22	**Teil 14: Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004"** (**U. Marti**)	**2016**
22 f	**14ème partie: Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004»** (**U. Marti,** traduit par O. Reis)	**2016**