

# CHGEO98 le nouveau géoïde de la Suisse

Urs Marti

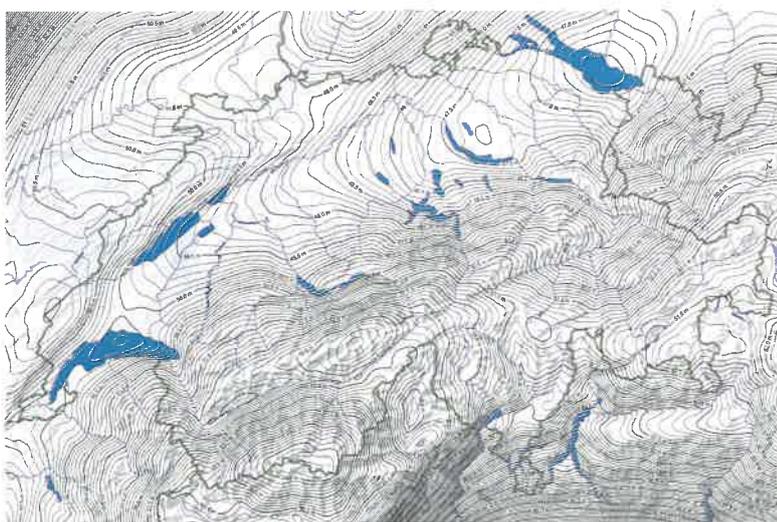
Réalisé ces dernières années, le géoïde et le quasi-géoïde de la Suisse ont été un projet conjoint de l'école polytechnique fédérale (ETH Zürich), de l'office Fédéral de topographie (S + T, SWISSTOPO) et de l'université de Berne (AIUB). Le but de ce projet était de déterminer une référence de haute précision pour les déterminations d'altitude au GPS et de constituer une base pour le nouveau réseau national altimétrique (RNA95).

Le calcul a été effectué à partir d'environ 600 mesures de déviation de la verticale, de 70 stations nivellement/GPS et de 2000 mesures gravimétriques. Les observations ont été réduites à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) et d'informations relatives à la densité géologique. Les résidus ont été interpolés par la méthode des moindres carrés et le géoïde et le quasi-géoïde ont été obtenus par addition des influences des modèles de masse.

La solution CHGEO98 a été achevée en 1998 et elle n'inclut que les déviations, les mesures nivellement/GPS et une partie des mesures gravimétriques, du fait que la plupart des mesures gravimétriques doit encore être validée.

La précision de CHGEO98 est de l'ordre de 3 cm dans les zones de plaines et de l'ordre de 5 cm dans les Alpes, ceci pour l'ensemble du territoire. Elle peut être vérifiée par une comparaison avec le quasi-géoïde Européen EGG97.

Le GPS permet aujourd'hui de déterminer des différences de coordonnées entre stations largement espacées avec une précision relative de  $10^{-7}$  à  $10^{-9}$ . Ceci ne vaut néanmoins que pour les composantes horizontales et ne s'applique pas aux altitudes. Ce dernier point résulte en partie de l'asymétrie des mesures (pas de satellites disponibles au-dessous de l'horizon) et des effets de la réfraction troposphérique. Le principal problème découle du fait que les altitudes dérivées au GPS se réfèrent à l'ellipsoïde, et non au géoïde, comme c'est en général le cas dans les levés terrestres. Les différences peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres à



Le géoïde dans ETRF 93

l'échelle du globe, et même dans un cadre régional comme celui des Alpes, les différences dépassent 10 mètres. L'objectif de cette contribution est de déterminer le géoïde et le quasi-géoïde de la Suisse au niveau du centimètre et de débattre des différentes composantes à prendre en compte dans les calculs d'erreur. Un autre but est d'analyser les exigences relatives à la précision et à la densité des données requises pour obtenir les ondulations géoidales avec ce haut niveau de précision, y compris dans les régions montagneuses telles que les Alpes Suisses.

Les précédentes tentatives de détermination du géoïde de la Suisse ont appliqué la technique de prélèvement-restauration (Elmiger, 1969), la collocation (Gurtner, 1978) et l'application de l'intégrale de Stokes (Geiger, 1990). Les observations astro-géodésiques dans la zone d'Ivrea (Bürki, 1989) ont été utilisées par Marti (1988) pour étudier la possibilité d'obtenir un géoïde de précision centimétrique dans la Suisse méridionale. En Suisse, les premières déterminations de géoïde combinant des jeux de données terrestres et satellitaires ont été entreprises par Wirth (1990). Cette contribution, publiée pour la première fois à la conférence IAG de Budapest en mars 1998, représente la continuation de ces efforts.

Pour incorporer les déviations de la verticale, les anomalies de gravité, les données de nivellement GPS aussi bien que les modèles de masse, nous avons développé un logiciel permettant de calculer :

- les effets gravitationnels des modèles de masse (MNT maillés ou polyèdres irréguliers) en termes de potentiel et de vecteur de gravité,
- la réduction des informations observées sur les champs de gravité pour leurs effets sur les modèles de masse,
- l'interpolation des champs résiduels et le calcul du co-géoïde réduit,
- les prédictions relatives aux déviations de la verticale, aux anomalies de gravité et aux ondulations géoidales pour les points situés entre les points mesurés,

- les calculs d'altitudes dans les différents systèmes altimétriques,
- la transformation du géoïde et du vecteur de gravité dans les différents systèmes de référence.

## Les données utilisées

Nous avons pu prendre en compte dans nos calculs environ 600 stations astrogéodésiques avec au minimum une composante de la déviation de la verticale (Fig. 1). La plupart d'entre elles ont été recompilées et ramenées dans un système de référence unique. En général, la précision est de l'ordre de 0.5". Les mesures les plus anciennes remontent au siècle dernier, tandis qu'environ 100 stations ont été observées entre 1990 et 1992, dans le cadre particulier de la nouvelle détermination du géoïde. Après validation par recoupement, 520 stations ont pu être retenues pour le calcul final.

La plupart des stations gravimétriques de la Suisse accessibles au public (et qui sont incluses dans le quasi-géoïde Européen EGG97) résultent des travaux de la commission géophysique de la Suisse (SGPK) pour la carte gravimétrique de la Suisse (Klingelé, Olivier, 1980). Un nouveau projet d'atlas gravimétrique est actuellement mené à bien par le SGPK. Environ 20 000 stations situées en Suisse occidentale devraient être disponibles pour la détermination du géoïde (Fig. 2).

En plus des déviations de la verticale et des données gravimétriques, environ 80 stations GPS reliées aux mailles du nivellement de premier ordre ont été prises en compte en tant qu'ondulations géoïdales « observées ». Ces observations font partie du nouveau réseau de base GPS national (MN95) et elles ont été introduites avec une précision de 2 à 5 cm (Fig. 3).

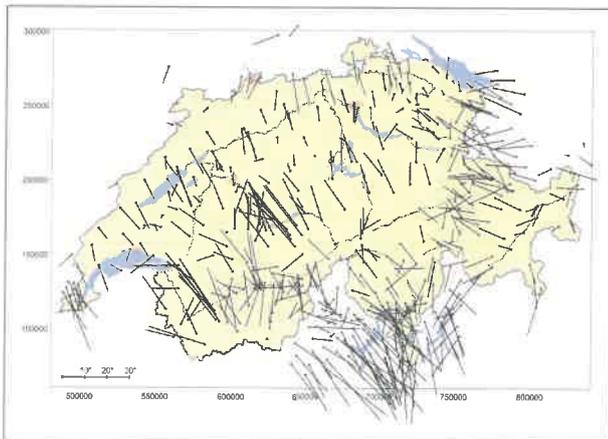


Fig. 1 - Déviations de la verticale observées (stations avec les deux composantes uniquement)

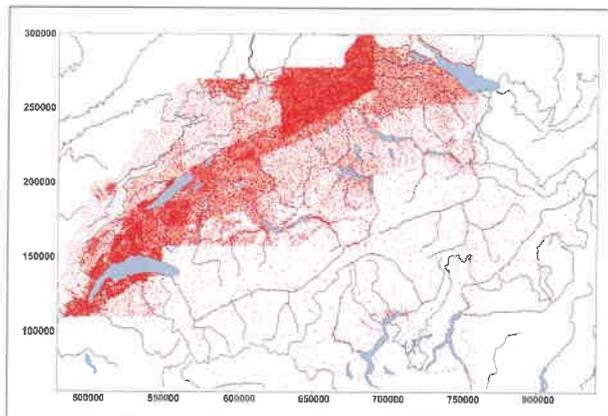


Fig. 2 - Données gravimétriques utilisées pour la détermination du géoïde

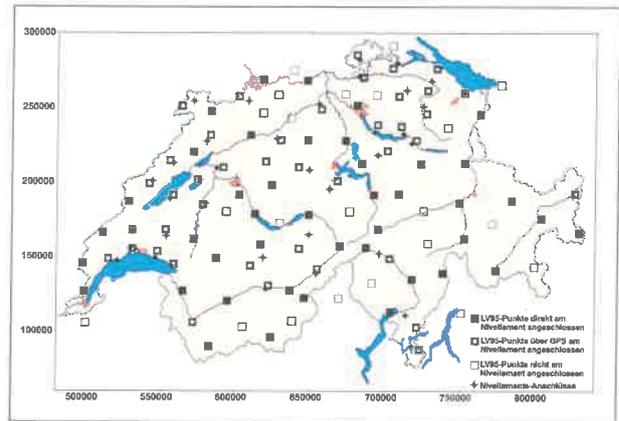


Fig. 3 - Le réseau national GPS MN95 et sa connection au réseau de nivellement de 1<sup>er</sup> ordre

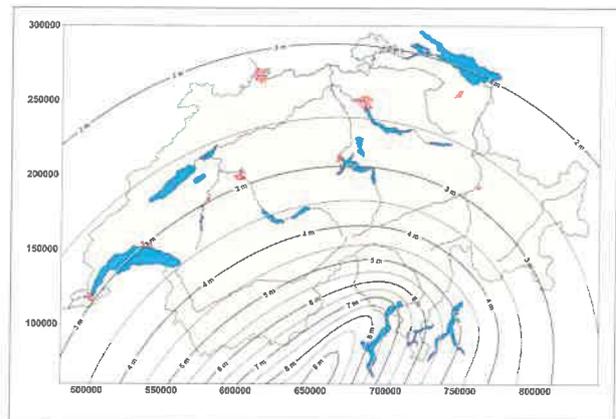


Fig. 4 - Influence de la formation Ivrea sur le géoïde

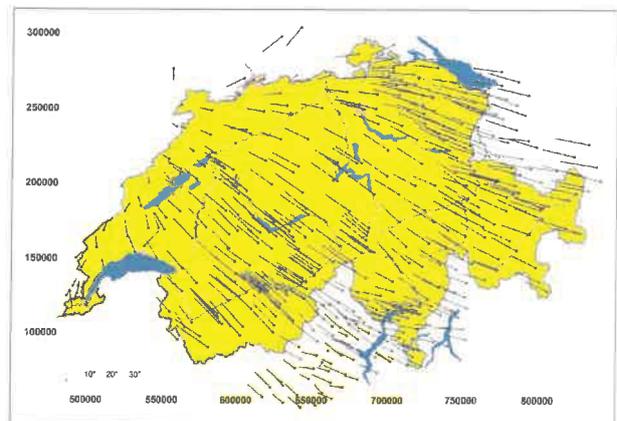


Fig. 5 - Déviations de la verticale après soustraction des effets des modèles de masse

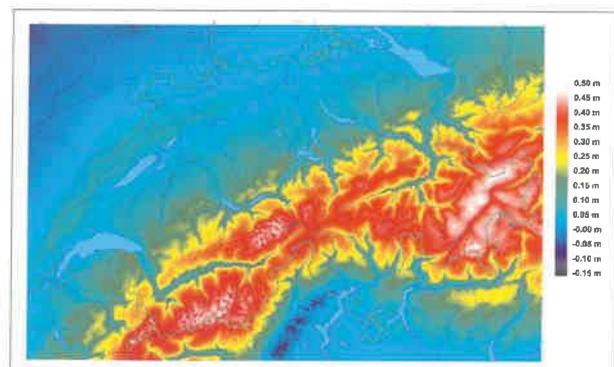


Fig. 6 - Différences entre quasi-géoïde et géoïde CHGEO98

## Les modèles de masse de la Suisse

Pour la dérivation des calculs à des zones moins étendues et pour faciliter l'interpolation du champ de gravité, il est nécessaire de modéliser la distribution des masses d'attraction. Le plus important est de disposer d'un modèle numérique de terrain à haute résolution. Mais d'autres modèles, tels que les anomalies de densité à l'intérieur du globe, doivent également être pris en considération.

### Modèle Numérique de Terrain

Le modèle numérique de terrain utilisé dans les calculs du géoïde est dérivé de la maille de 25 mètres (MNT25) de l'Office Fédéral de Topographie, qui a été obtenu par une scanne-risation des cartes au 1/25 000.

Afin d'économiser le temps de calcul, des mailles compatibles avec une résolution de 50, 500 et 10 000 mètres été dérivées. Dans les régions voisines où les cartes (Suisse) au 1/25 000 ne sont pas disponibles, ces mailles ont été dérivées du jeu de données DTEDI du NIMA (résolution d'origine 3"x3"). En dehors d'une zone d'environ 50 km autour de la Suisse, on a utilisé un MNT global (TUG87, résolution 5"x5") compilé à l'université de Graz.

Une densité de 2,67 g/cm<sup>3</sup> a généralement été utilisée pour l'ensemble du MNT, à l'exception des régions où des informations de densitométrie fiables étaient disponibles. Ceci est principalement le cas pour les lacs, les glaciers et les sédiments quaternaires de rivières importantes, de même que pour la zone d'Ivrea et les zones amont de la plaine du Pô.

Pour les calculs, les valeurs des mailles ont été utilisées sous la forme de facettes ou, pour des distances accrues, elles ont été remplacées par des masses linéaires ou ponctuelles. Le tableau 1 montre quel modèle et quelle formule ont été utilisés en fonction des distances.

Comme nous pouvons l'observer, la simplification critique semble être la limite de 50 km entre les MNT à 500 m et à 10 km. Le problème avec cette limite est qu'elle affecte considérablement le temps de calcul des influences de terrain. Et comme avec une valeur de 70 km, l'erreur reste supérieure à 1 cm, il était nécessaire de trouver un compromis entre la précision et le temps de calcul.

### Modèles de masse pour l'intérieur du globe

En dehors de la topographie, les effets les plus marquants sur le champ de gravité sont causés par le gradient de densité à la limite de l'écorce terrestre (Moho). En général, ces effets sont pris en compte dans un modèle isostatique, mais dans ce

projet nous avons utilisé une maille de 5 km de la profondeur de Moho. Le contraste de densité qui convenait le mieux pour notre jeu de données était de 0,37 g/cm<sup>3</sup>. D'autres modèles de densité importants sont constitués par les sédiments de la plaine du Pô, avec une profondeur maximum de 11 km et un contraste de densité maximum de -0,8 g/cm<sup>3</sup>, et un modèle de la formation Ivrea, dans les Alpes du sud, avec un contraste de densité maximum de 0,4 g/cm<sup>3</sup>. La figure 4 montre l'effet de la formation Ivrea sur la cote géoïdale comme exemple de l'influence d'un modèle de ce type.

### Le calcul du co-géoïde

Après que toutes les observations avaient été réduites en raison des influences des modèles de masse, nous avons obtenu un champ de résidus lissé. À titre d'exemple, nous voyons sur la figure 5 les déviations de la verticale après réduction, qui peuvent être comparées sur la figure 1 aux valeurs observées sur le terrain.

Ces résidus affichent un systématisme qui ne peut pas être expliqué par nos modèles de masse. Ceci provient principalement du choix du système de référence et des masses qui n'ont pas été prises en compte dans nos modèles. Ce systématisme a été réduit au moyen de polynômes harmoniques, en vue de faciliter l'étape suivante d'interpolation des résidus.

L'interpolation des résidus a été réalisée au moyen d'une compensation par les moindres carrés. Un modèle harmonique de Markov du 3<sup>e</sup> ordre a été choisi pour la fonction de covariance. Ses paramètres, qui dépendent essentiellement du jeu de données choisi, les modèles de masse utilisés et la fonction de systématisme, ont été déterminés empiriquement.

Les calculs d'essai ont fait apparaître que, avec les seules données astrogéodésiques, le géoïde pouvait être déterminé avec une précision d'environ 4 cm sur l'ensemble du pays. L'introduction des stations de nivellement GPS réduit cette valeur à 2 à 3 cm. En prenant également en compte les données gravimétriques, on obtient localement une meilleure précision, mais le résultat sur l'ensemble du pays est maintenu à environ 2 cm.

Nous avons retenu comme solution finale pour le co-géoïde une combinaison des données astrogéodésiques et des données de nivellement GPS. L'intégration des mesures gravimétriques provoquait des incohérences de plus de 10 cm, et ceci devra faire l'objet d'une étude plus détaillée avant que nous puissions présenter une solution complète combinant l'ensemble des données disponibles.

### Le calcul du géoïde et du quasi-géoïde

Le quasi-géoïde est dérivé du co-géoïde en restaurant les effets des modèles de masse à l'altitude du terrain. Le géoïde est obtenu en restaurant ces effets au niveau de la mer. Ces

MNT	Formule	Distance max.	Erreur max. causée par simplification		
			Potentiel	Champs de gravité	Déviations
25 m	facette	100 m	0	0	0
50 m	facette	300 m	0	0,09 mgal	0,02"
50 m	ligne	1 250 m	0	0,01 mgal	0
500 m	facette	5 000 m	0,2 mm	0,18 mgal	0,05"
500 m	ligne	20 000 m	1,0 mm	0,09 mgal	0,02"
500 m	point	50 000 m	3,0 mm	0,03 mgal	0,01"
10 000 m	point	Modèle entier	16,0 mm	0,13 mgal	0,07"
5'	point	Terre entière	?	?	?

MNT et formules utilisés pour la correction de terrain, et erreurs dues à la simplification

deux surfaces de référence ont été calculées dans les systèmes de référence de la Suisse (CH1903, Ellipsoïde de Bessel), et de l'Europe (ETRF93, Ellipsoïde GRS80). À titre d'exemple, le géoïde est représenté en début d'article dans ETRF93.

La figure 6 affiche les différences entre le géoïde et le quasi-géoïde. Elles sont évidemment très corrélées avec la topographie. Alors que les différences sont proches de 0 dans les zones de plaine, elles dépassent 0.5 mètres dans les zones de haute montagne.

### Comparaison de la solution avec le quasi-géoïde Européen EGG97

Pour effectuer un contrôle de qualité totalement indépendant, nous avons comparé notre solution avec le quasi-géoïde EGG97, qui a été calculé par l'IfE à Hanovre (Denker et al., 1998). Dans cette comparaison, nous n'avons appliqué ni décalage, ni fonction d'orientation. Nous avons simplement interpolé les valeurs d'EGG97 (résolution 1'x 1.5') sur nos points de réseau. Cette comparaison peut être observée sur la figure 7.

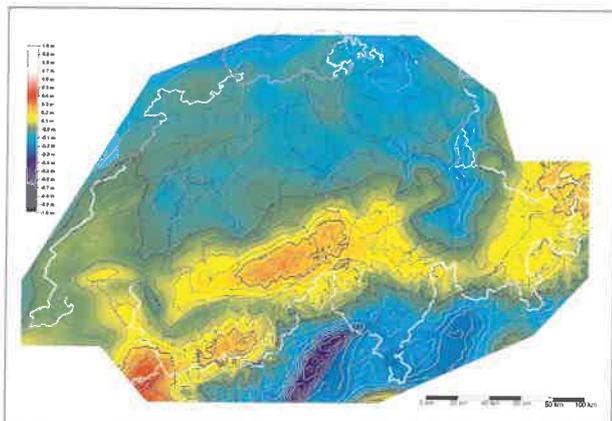


Fig. 7 - Les différences entre le quasi-géoïde européen (EGG97) et le quasi-géoïde suisse

En plaine, les différences sont généralement inférieures à 5 cm. Mais dans le sud-ouest, aux environs de Lausanne et de Genève, elles peuvent atteindre plus de 10 cm. Dans les Alpes, les différences sont généralement inférieures à 10 cm, alors que dans certaines parties de la Suisse centrale ou orientale, elles peuvent dépasser 15 cm.

Cette comparaison de deux solutions complètement indépendantes indique que, dans les zones de plaine, les deux solutions ont une précision de quelques centimètres. Dans les régions montagneuses, nous pouvons assumer que la plus grosse part de ces différences doit être attribuée au quasi-géoïde européen (MNT plus simple, données moins nombreuses), et que notre solution doit avoir une précision d'environ 5 cm, même dans les zones alpines.

### Conclusions et perspectives

En résumé, nous pouvons affirmer que nous avons atteint le but de notre projet de déterminer un géoïde avec une précision de quelques centimètres. La preuve principale réside dans la comparaison avec la solution EGG97.

Le géoïde CHGEO98 a été déclaré géoïde officiel de la Suisse en octobre 1998 et il est à présent largement diffusé chez nos clients sous la forme d'un réseau de 1 km ou 0.5'. Il est également intégré dans la plupart des capteurs et logiciels GPS vendus en Suisse. Les premiers résultats indiquent que, dans beaucoup de régions, la précision des transformations entre altitudes GPS et altitudes nivelées s'est accrue notablement. Inclinaisons et décalages ont presque complètement disparu. Mais le bénéfice entier de CHGEO98 ne sera obtenu qu'avec l'introduction d'un système altimétrique strictement orthométrique (RNA95) comme système officiel pour la Suisse.

Office Fédéral de Topographie, Seftigenstrasse 264 — CH-3084 Wabern, Suisse — E-mail : [urs.marti@ft.admin.ch](mailto:urs.marti@ft.admin.ch)  
La bibliographie relative à cet article est disponible sous : [www.leica-geosystems.com/Reporter](http://www.leica-geosystems.com/Reporter)

(Article paru dans « Reporter » n° 43 de nov. 99, magazine de « LEICA-GEOSYSTEMS », et reproduit avec leur aimable autorisation)

# VUES AERIENNES METRIQUES

TOUTES ÉCHELLES - TOUTES ÉMULSIONS :  
POUR TOUTES APPLICATIONS



## AU SERVICE DES AMENAGEURS

670, rue Jean Perrin • Z.I. • 13851 AIX EN PROVENCE CEDEX 03

Téléphone : 04.42.60.05.45 • Télécopie : 04.42.24.26.04