

**Zeitschrift:** Cadastre : revue spécialisée consacrée au cadastre suisse  
**Herausgeber:** Office fédéral de topographie swisstopo  
**Band:** - (2022)  
**Heft:** 40

**Artikel:** Profil astrogéodésique au CERN  
**Autor:** Willi, Daniel / Azumi Koch, Julia / Weyer, Benjamin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1002792>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 11.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Profil astrogéodésique au CERN

L'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), basée à Genève, exploite l'accélérateur de particules le plus puissant au monde, le LHC (Large Hadron Collider). Le terme de son exploitation est cependant prévu autour de 2040, de sorte que les études relatives à son successeur, le FCC (Future Circular Collider), vont d'ores et déjà bon train. Un projet d'infrastructure d'une telle envergure doit pouvoir s'appuyer sur des bases géodésiques solides. C'est pourquoi l'Office fédéral de topographie swisstopo a réalisé un profil astrogéodésique d'une précision inégalée à ce jour, en collaboration avec le CERN, l'ETH Zurich et la HEIG-VD. Ce profil servira d'assise à la modélisation précise du géoïde au CERN.

Des bases géodésiques précises sont indispensables pour des projets d'infrastructure de grande ampleur. L'exemple de la construction d'un tunnel l'illustre parfaitement. Des points fixes doivent être disponibles de part et d'autre du futur ouvrage, afin que la progression du creusement puisse être suivie depuis les deux extrémités et que les équipes puissent faire leur jonction à mi-parcours. Les bases géodésiques ne se limitent toutefois pas aux seuls points fixes planimétriques et altimétriques. Elles comprennent souvent un système de coordonnées spécifique, une projection cartographique adaptée et un modèle du géoïde local spécifique. Plus un ouvrage est grand et plus les exigences en matière de précision sont élevées, plus les exigences envers la précision de ces bases géodésiques sont fortes.

L'accélérateur de particules existant, le LHC (Large Hadron Collider), devrait être exploité jusqu'en 2040, date

à laquelle le FCC (Future Circular Collider) pourrait lui succéder. Il fait en effet partie des projets à l'étude pour la suite. Actuellement, une zone étendue (diamètre d'environ 100 km, à une profondeur de 300 m) est prévue pour l'accélérateur (fig.1). Majoritairement en territoire français, elle s'étend du pied du Jura jusqu'à proximité d'Annecy (F) et se trouve en partie sous le lac Léman.

L'étude du FCC, au périmètre très large, couvre tous les aspects de la construction et de l'exploitation du futur accélérateur de particules. Si elle se concentre sur la physique et le développement de technologies propres aux accélérateurs telles que les aimants supraconducteurs qui en constituent le cœur, elle ne néglige pas pour autant les multiples autres facettes de l'accélérateur, techniques bien sûr, mais aussi juridiques et sociales. Le FCC étant souterrain, il va de soi que la géologie revêt un intérêt tout particulier. Les aspects environnementaux et le droit foncier jouent cependant un rôle à ne pas sous-estimer pour la planification des puits d'accès, le projet s'étendant sur deux pays.

Un aspect important manque toutefois à l'appel dans la liste précédente, à savoir la géodésie et par suite les bases géodésiques! La contribution de la géodésie à cette étude est primordiale, puisque le FCC s'étend sur deux pays aux systèmes de référence différents, tant en planimétrie qu'en altimétrie. Le défi consiste donc à acquérir une connaissance la plus fine possible des précisions à la frontière franco-suisse. A cela s'ajoute le fait qu'une partie au moins des générations existantes d'accélérateurs de particules du CERN possède son propre système de coordonnées. Ainsi, le modèle du géoïde utilisé au CERN est par exemple déduit du modèle suisse CHGeo98. Enfin, si des bases géodésiques précises sont nécessaires pour la construction, elles sont aussi indispensables pour aligner entre eux les différents éléments dont l'accélérateur de particules se compose. Ces éléments doivent être implantés avec une précision maximale pour assurer le bon fonctionnement de l'accéléra-

Figure 1:  
variantes pour le FCC; il s'étend du Jura jusqu'aux environs d'Annecy (F) et passe sous le lac Léman;  
© CERN



teur. C'est pour l'ensemble de ces raisons qu'un nouveau système de référence a été développé pour le FCC, spécifique au projet, assis sur des bases géodésiques précises.

### Le géoïde, la grandeur clé

La détermination des altitudes jouit traditionnellement d'un statut particulier en géodésie. La définition courante de l'altitude entretient un lien étroit avec le champ de pesanteur terrestre. Une route est ainsi « plane » si un ballon ne roule pas à sa surface, donc si tous ses points sont à la même altitude. La plupart des instruments utilisés en mensuration sont calés avant toute mesure, afin que leur axe principal coïncide avec la verticale du lieu. On recourt pour cela à une nivelle qui est soumise au champ de pesanteur terrestre. Il est bien connu que ce champ présente des irrégularités, dues tout autant à la topographie qu'aux structures géologiques. Les points qui se trouvent à une même altitude forment une surface équipotentielle. Tous ces points ont le même potentiel gravimétrique. La surface équipotentielle coïncidant avec le niveau moyen des mers est appelée le géoïde et une altitude nulle est attribuée à l'ensemble de ses points.

Les particules qui sont destinées à entrer en collision dans l'accélérateur ont une masse très faible, si bien qu'elles ne subissent guère l'influence du champ de pesanteur terrestre. L'accélérateur doit donc se trouver dans un plan géométrique avec une précision aussi élevée que possible (figure 2). En revanche, les instruments de mesure sont presque tous calés selon la verticale du lieu, liée au champ de pesanteur. Pour pouvoir implanter un plan géométrique dans ces conditions, un modèle de champ de pesanteur précis est indispensable. Et au cœur de ce dernier se trouve le modèle du géoïde.

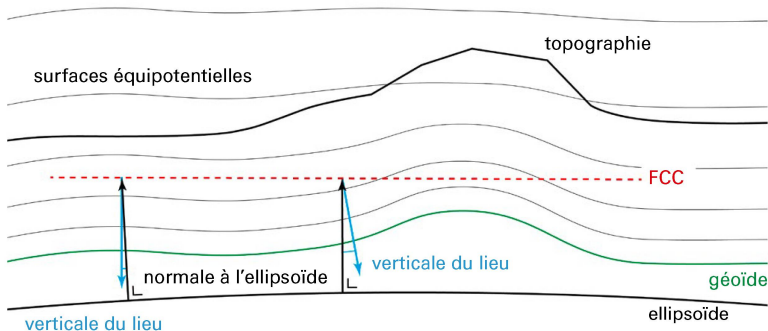


Figure 2: le FCC se trouve dans un plan géométrique (pointillés en rouge), les instruments géodésiques sont en revanche calés sur la base du champ de pesanteur local (en bleu); le lien entre la physique et la géométrie est établi à l'aide d'un modèle du champ de pesanteur, dont le modèle du géoïde est au cœur (en vert).

### La confiance c'est bien, la validation c'est mieux

Les exigences de précision du CERN envers le modèle du champ de pesanteur pour l'alignement approché (la planéité) du FCC s'élevaient à 0,1 mm sur une distance de 225 m. Déterminer un modèle du champ de pesanteur avec une telle précision est un défi de taille. Il faut non seulement réaliser bon nombre de mesures pour atteindre cette précision, mais également disposer de solides connaissances du sous-sol et d'algorithmes appropriés. Différentes mesures (gravimétriques, déviations de la verticale) et des modèles géologiques sont ainsi combinés pour calculer un modèle aussi précis que possible. Une grande partie de ces données est mise à disposition par swisstopo, le calcul effectif du géoïde étant réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat en cours à l'ETH Zurich.

La validation des modèles calculés constitue l'une des difficultés de la détermination du géoïde. Les algorithmes sont complexes et riches en étapes de calcul. Les données de mesure utilisées sont nombreuses et souvent inhomogènes, parce qu'elles ont été saisies au fil des décennies avec des instruments différents et par des organisations différentes. Une validation aussi indépendante que possible est par conséquent indispensable. Classiquement, les modèles du géoïde sont validés soit par comparaison avec d'autres modèles du géoïde, soit par comparaison avec des mesures GNSS et de nivellement. Dans ce dernier cas de figure, l'écart altimétrique entre deux points ou plus est déterminé à la fois via GNSS et via nivellement. De ces écarts se déduisent les différences entre les cotes du géoïde qui peuvent alors être comparées avec le modèle. Ce mode opératoire suppose que l'on dispose d'altitudes orthométriques; c'est pourquoi on recourt à des mesures gravimétriques pour la réduction des écarts altimétriques obtenus par nivellement.

Les profils astrogéodésiques constituent une autre possibilité intéressante de validation de modèles du géoïde. Des mesures astronomiques (pour accéder aux déviations de la verticale) sont effectuées à intervalles réguliers le long d'un profil aussi rectiligne que possible. La verticale du lieu ne pointe pas exactement vers le centre de la Terre en raison des irrégularités internes à notre planète et de la topographie<sup>1</sup>. C'est ce léger écart que l'on appelle la déviation de la verticale. Les déviations de la verticale sont ensuite intégrées mathématiquement et le résultat est reporté sur une vue en coupe du géoïde. Au besoin, ces mesures peuvent encore être complétées par

<sup>1</sup> Parce que la Terre est légèrement aplatie aux pôles, on utilise un ellipsoïde et non une sphère comme surface de référence. En toute rigueur, la déviation de la verticale est la différence entre la normale à l'ellipsoïde et la direction de la verticale. La normale à l'ellipsoïde est un vecteur perpendiculaire à la surface de l'ellipsoïde.



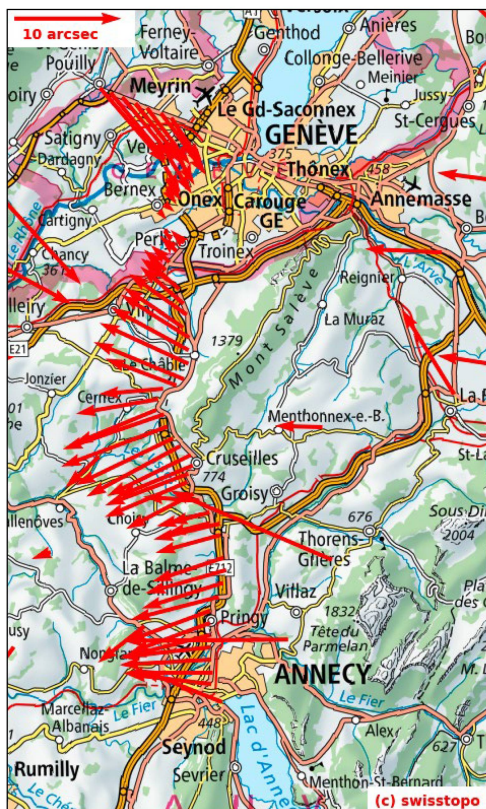
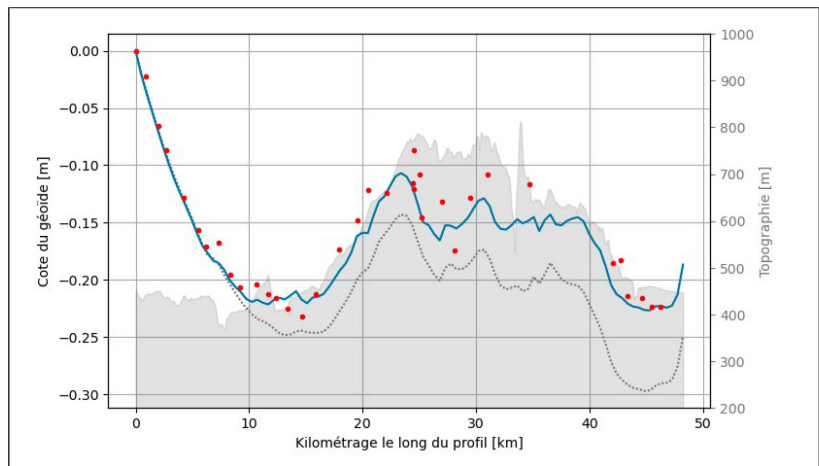


Figure 3 en haut: déviations de la verticale du profil astrogéodésique, complétées par quelques autres déviations de la verticale autour de Genève.

Figure 4 en haut à droite: solution finale du profil astrogéodésique; la nouvelle solution est présentée en bleu, le modèle du géoïde suisse CHGeo2004 est figuré en pointillés gris, les points GNSS et de nivellement étant indiqués en rouge; la topographie le long du profil est présentée en gris; la valeur 0 m a été attribuée au premier point du profil (kilomètre 0,000).



des mesures GNSS et de nivellement. Ces deux types de mesures se complètent parfaitement, les déviations de la verticale convenant très bien à la saisie de variations dans un périmètre restreint, tandis que les mesures GNSS et de nivellement sont très bien adaptées aux variations sur des zones plus étendues.

Un profil astrogéodésique a été mesuré l'an passé au sud de Genève, dans la zone du FCC projeté, sur une longueur de plus de 45 km, avec une densité de mesures astronomiques inégalée à ce jour dans le monde, sous la direction de swisstopo et en collaboration avec le CERN, l'ETH Zurich et l'HEIG-VD. Les déviations de la verticale mesurées par les spécialistes de swisstopo durant 15 nuits d'observation sont présentées sur la figure 3. En plus de 61 déviations de la verticale mesurées à un intervalle moyen de 800 m, des mesures de nivellement et des mesures gravimétriques ont également été réalisées. Le profil a été établi de telle manière qu'un maximum de mesures de nivellement existantes (canton de Genève et Institut national de l'information géographique et forestière, IGN côté français) aient pu être utilisées. Une courte portion de 8,8 km a par ailleurs fait l'objet d'un nouveau nivellement de la part du CERN. Des points fixes altimétriques sélectionnés ont été déterminés lors de longues sessions de mesure GNSS statiques. 36 points GNSS et de nivellement ont en outre été mesurés par des spécialistes du CERN, de l'ETH Zurich et de la HEIG-VD lors d'une campagne de plus grande ampleur. Les mesures gravimétriques le long du profil ont été réalisées par swisstopo à l'aide du gravimètre relatif Scintrex CG-6.

Les premiers résultats des calculs sont présentés sur la figure 4. La précision estimée des déviations de la verticale atteint 0,02 secondes d'arc, ce qui correspond à 0,1 mm sur une distance de 1 km. Les mesures sont par-

faitement cohérentes avec les observations GNSS et de nivellement et avec les modèles existants comme le modèle du géoïde suisse CHGeo2004. La densité de mesures inégalée à ce jour a toutefois permis de distinguer bien plus de détails dans un périmètre restreint. Le profil astrogéodésique constitue ainsi un premier pas, mais un pas essentiel, vers des modèles du géoïde de haute précision dans le périmètre du projet FCC. Le calcul d'un modèle du géoïde à haute résolution et de grande précision par l'ETH Zurich constitue l'une des nombreuses contributions grâce auxquelles le projet FCC pourra finalement voir le jour.

Daniel Willi, Dr sc. ETH  
Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales  
swisstopo, Wabern  
daniel.willi@swisstopo.ch

Julia Azumi Koch, Master of Science TU Munich,  
doctorante  
ETH Zurich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
jukoch@ethz.ch

Benjamin Weyer, ingénieur topographe INSA Strasbourg  
CERN, Genève  
benjamin.weyer@cern.ch

Jérôme Carrel, dipl. Ing. HES  
Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales  
swisstopo, Wabern  
jerome.carrel@swisstopo.ch

Urs Marti, Dr sc. techn. ETH  
Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales  
swisstopo, Wabern  
urs.marti@swisstopo.ch

#### Informations complémentaires

- CERN «Future Circular Collider study»: <https://cern.ch/fcc>
- Sébastien Guillaume «Determination of a Precise Gravity Field for the CLIC Feasibility Studies», Dissertation, ETH Zürich
- «Campagne 2020 de détermination des déviations de la verticale en Suisse», revue spécialisée «cadastre» n°35 – avril 2021
- Doku n° 22f: Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse MN95 – 14<sup>ème</sup> partie – Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004»