

Zeitschrift: Cadastre : revue spécialisée consacrée au cadastre suisse
Herausgeber: Office fédéral de topographie swisstopo
Band: - (2021)
Heft: 35

Artikel: Campagne 2020 de détermination des déviations de la verticale en Suisse
Autor: Willi, Daniel / Carrel, Jérôme / Marti, Urs
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-905765>

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: 11.05.2025

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

Campagne 2020 de détermination des déviations de la verticale en Suisse

Les déviations de la verticale constituent un soutien efficace de la modélisation du géoïde. L'Office fédéral de topographie swisstopo dispose depuis peu de la caméra zénithale « CODIAC ». Elle a été entièrement développée à l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich. Cet instrument exceptionnel a été utilisé pour la toute première fois en production dans le cadre de la campagne de mesure 2020 avec une mise en station en 27 points répartis sur l'ensemble de la Suisse.

En Suisse, les mesures de la déviation de la verticale s'inscrivent dans une longue tradition. Les déviations de la verticale ont ainsi été prises en compte dès 1890, lors du calcul du réseau de triangulation suisse, après l'obtention d'erreurs de fermeture trop importantes sans correction¹. De nombreuses campagnes ont été réalisées en Suisse tout au long du 20^e siècle, à la fois pour les besoins de la mensuration nationale et pour des investigations à caractère scientifique². Il y a quelques décennies encore, les déviations de la verticale servaient surtout à corriger les mesures terrestres effectuées au théodolite. Une déviation de la verticale non prise en compte produit le même effet qu'un défaut de verticalité de l'axe principal du théodolite et peut provoquer des erreurs conséquentes en montagne ou dans des réseaux très étendus. Depuis que les systèmes mondiaux de navigation par satellites (GNSS) sont utilisés en mensuration, l'importance du géoïde en tant que surface de référence s'est accrue, si bien que les mesures de déviation de la verticale revêtent à nouveau un grand intérêt.

Petit retour sur la détermination des altitudes

La plupart des applications requièrent de disposer d'altitudes dites physiques, cas par exemple des constructions routière et ferroviaire ou de la prise de cotes hydrographiques. Contrairement aux altitudes géométriques, les altitudes physiques reproduisent le sens de l'écoulement des eaux. Les altitudes orthométriques constituent un exemple d'altitudes physiques. La détermination altimétrique à l'aide d'un instrument GNSS ne fournit en revanche que des altitudes purement géométriques, les hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde. Les altitudes orthométriques H_{ortho} et les hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde h_{ell} sont reliées entre elles par la relation suivante:

$$h_{ell} = H_{ortho} + N$$

où N est la cote du géoïde. En Suisse et par rapport à l'ellipsoïde de Bessel, la valeur de N oscille entre -3 m et +3 m. Les altitudes officielles suisses, les altitudes

usuelles NF02, se déduisant des altitudes orthométriques, il en résulte que la cohérence de la détermination des altitudes en Suisse est également garantie par un modèle de géoïde précis. Sans lui, la détermination des altitudes via GNSS est impossible.

Utilité des déviations de la verticale

Les déviations de la verticale se révèlent très utiles dans ce contexte, parce qu'elles permettent une détermination très directe du géoïde. Ce dernier est la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre au niveau de la mer. Une surface équipotentielle est une surface dont tous les points possèdent le même potentiel gravimétrique. La déviation de la verticale est l'angle entre la verticale du lieu et la normale à l'ellipsoïde (figure 1). Pour la déterminer, la caméra zénithale est mise en station de nuit sur un point connu. Le télescope orienté vers le haut et le capteur photo numérique photographient le ciel étoilé. La caméra zénithale dispose d'inclinomètres de précision qui établissent le lien avec la verticale locale. L'exploitation combinée des observations astronomiques (photos du ciel nocturne) et des mesures des inclinomètres fournit la direction de la verticale locale. La normale à l'ellipsoïde résulte de la position GNSS du point.

ξ est la composante Nord-Sud de la déviation de la verticale et η sa composante Est-Ouest. Elles sont définies ainsi:

$$\begin{aligned}\xi &= \phi - \varphi \\ \eta &= (\Lambda - \lambda) \cos \phi\end{aligned}$$

ϕ et Λ sont la latitude et la longitude astronomiques déterminées à l'aide de la caméra zénithale, φ et λ sont la latitude et la longitude géodésiques obtenues par le GNSS.

Les déviations de la verticale observées doivent être réduites au niveau de la mer pour pouvoir être prises en compte dans le calcul du géoïde. Les déviations de la verticale réduites correspondent à l'inclinaison du géoïde, aux incertitudes de mesure près. Le modèle de géoïde peut ainsi être déterminé en intégrant les déviations de la verticale. Pour le modèle de géoïde officiel de la Suisse, d'autres données ont été intégrées en plus des déviations de la verticale, notamment des données de nivelle-

¹ Wolf R. (1890) Astronomische Beobachtungen im Tessiner Basisnetz, auf Gähris und Simlon; definitive Dreiecksseitenlängen; geographische Coordinaten. Commission géodésique suisse, Zurich

² Marti U. (1997) Le géoïde de la Suisse 1997. Commission géodésique suisse, Zurich, p. 21

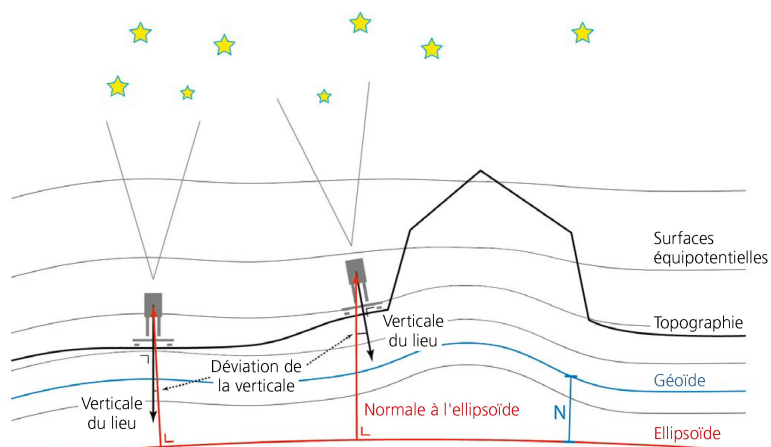
ment GNSS et des mesures gravimétriques³. En raison de leur précision et de leurs propriétés, les déviations de la verticale contribuent de manière importante à la précision et à la fiabilité du modèle de géoïde suisse.

La caméra zénithale «CODIAC»

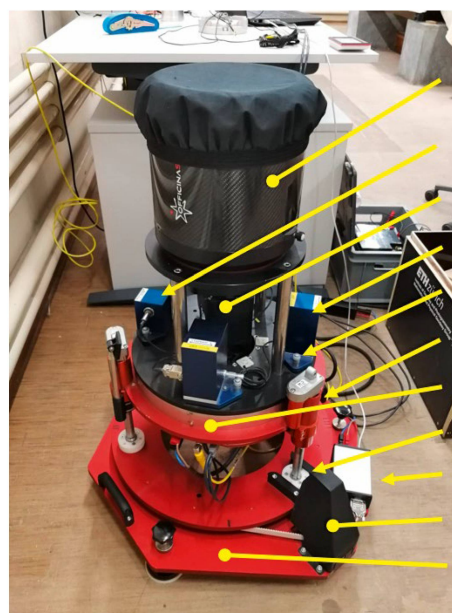
Si l'on utilisait des théodolites autrefois et des caméras analogiques plus récemment pour effectuer les mesures, c'est désormais d'un instrument hautement automatisé et ultraprécis dont dispose l'Office fédéral de topographie swisstopo. La caméra zénithale «CODIAC» (**C**ompact **D**igital **A**strometric **C**amera, figure 2) a été entièrement développée à l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich. Elle n'existe qu'en deux exemplaires qui se trouvent actuellement chez swisstopo.

Le télescope est relié par des tiges en invar à la plaque tournante sur laquelle les quatre inclinomètres sont fixés. Chaque couple d'inclinomètres fournit une solution indépendante. Le fait d'utiliser deux types d'inclinomètres différents aux propriétés différentes (de types «Lippmann» et «Wylér») permet du reste d'améliorer la solution. La plaque tournante est motorisée et mesure automatiquement dans deux positions (0° et 180°) pour éliminer les erreurs systématiques. La caméra est calée automatiquement au moyen de servomoteurs. Un «calibrage azimutal» est alors entrepris pour éliminer les erreurs systématiques restantes⁴. La structure complète est à nouveau montée sur une embase tournante pour cela. Chaque station est mesurée quatre fois, à quatre azimuts différents (0°, 90°, 180°, 270°). Une précision d'environ 0,04 secondes d'arc est atteinte au terme de ce processus⁵, ce qui correspond à une inclinaison de 0,2 mm sur une distance d'un kilomètre. La caméra est pilotée au moyen d'un ordinateur ordinaire, fonctionnant sous Windows (figure 3). Il est possible de mesurer jusqu'à un point par heure, s'il est aisément accessible.

Les prises de vues astronomiques sont exploitées à l'aide du logiciel AURIGA (Automatic Realtime Image Processing System for Geodetic Astronomy) de l'Institut für Erdmessung de l'Université Leibniz de Hanovre⁶ et de scripts



1



Télescope / objectif avec protection anti-condensation télescopique

Inclinomètre Wylér

Caméra CCD et commande de mise au point

Inclinomètre Lippmann

Vis de réglage de l'inclinomètre

Servomoteurs

Plateau tournant

Pieds en nylon

Commande de la plaque de base

Moteur pas à pas

Plaque de base avec plateau tournant



Figure 1: lien entre le géoïde et les déviations de la verticale

Figure 2: la caméra zénithale «CODIAC» et ses différents éléments constitutifs

Figure 3: la caméra «CODIAC» en station sur un point

³ Marti U. (2016) Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95' – Le géoïde de la Suisse 2004 «CHGeo2004». Office fédéral de topographie, Wabern

⁴ Hirt C. (2004) Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamera-systems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Thèse de doctorat. Université technique de Munich

⁵ Van Westrum D, Ahlgren K, Hirt C, Guillaume S. (2021) A Geoid Slope Validation Survey (2017) in the rugged terrain of Colorado, USA. Journal of Geodesy, 95. doi: <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01463-8>

⁶ Hirt C. (2004) Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamera-systems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Thèse de doctorat. Université technique de Munich

MATLAB⁷. La préparation des données ainsi que diverses étapes de prétraitement et de posttraitement ont été automatisées par swisstopo, afin que les observations puissent être exploitées en quelques clics.

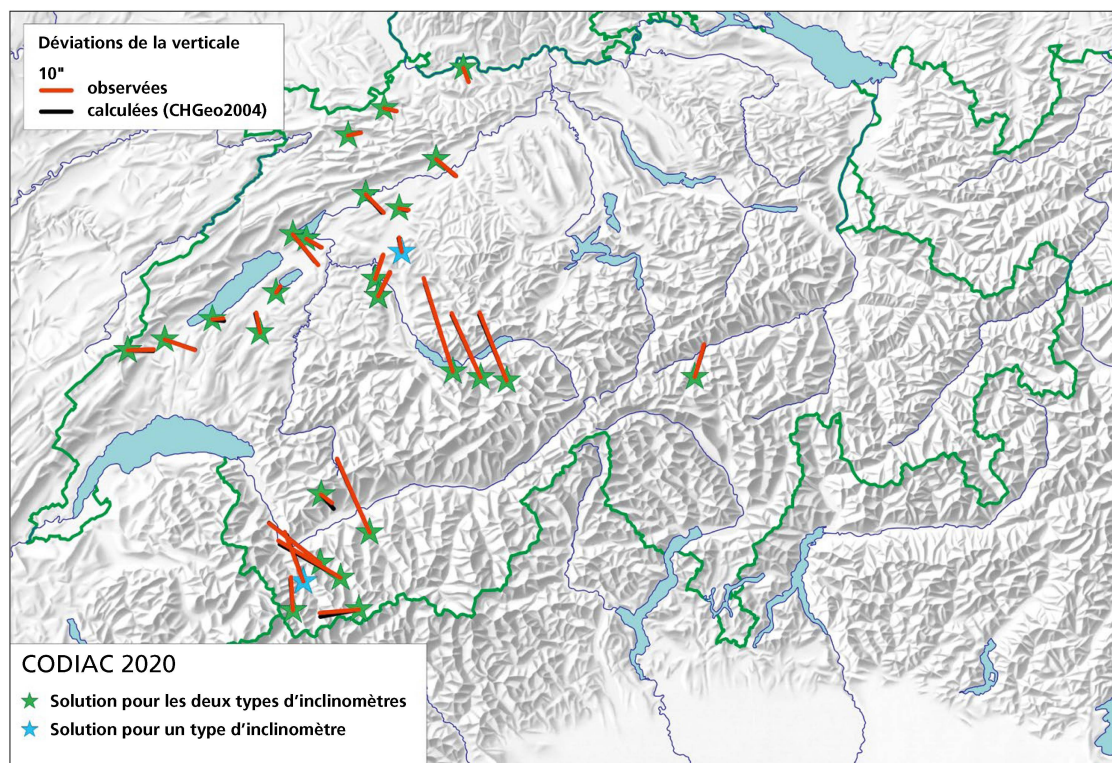
Campagne 2020 et résultats

Les mesures effectives des déviations de la verticale ont eu lieu entre le 5 juin et le 4 août 2020, pour l'essentiel dans l'ouest de la Suisse. Les mesures ont été planifiées de manière à compléter du mieux possible les mesures existantes. Comme il s'agissait des premières expériences acquises avec la nouvelle caméra « CODIAC », la priorité a été donnée à des points facilement accessibles. Plusieurs mesures de test ont par ailleurs été réalisées à Zimmerwald et à Wabern (cf. figure 4 et tableau 1). La

figure 5 (en page 16) présente les écarts entre le modèle et les observations. Ils sont d'une part entachés de systématismes et présentent d'autre part une forte corrélation spatiale, ce qui s'explique par des faiblesses locales du modèle de géoïde CHGeo2004.

Les mesures répétées effectuées sur les stations de Wabern et de Zimmerwald (tableau 1) fournissent une première indication de leur répétabilité. Les écarts sont majoritairement inférieurs à 0,05 secondes d'arc. La précision atteignable est d'une part limitée par la réfraction⁸ et d'autre part par des erreurs instrumentales⁹.

Figure 4: comparaison entre les déviations de la verticale mesurées dans le cadre de la campagne 2020 (en rouge) et celles calculées à partir du modèle de géoïde (en noir)



⁷ Guillaume S. (2020) Auswerteskripte für CODIAC-Beobachtungen (in MATLAB). Communication personnelle, 3 septembre 2019

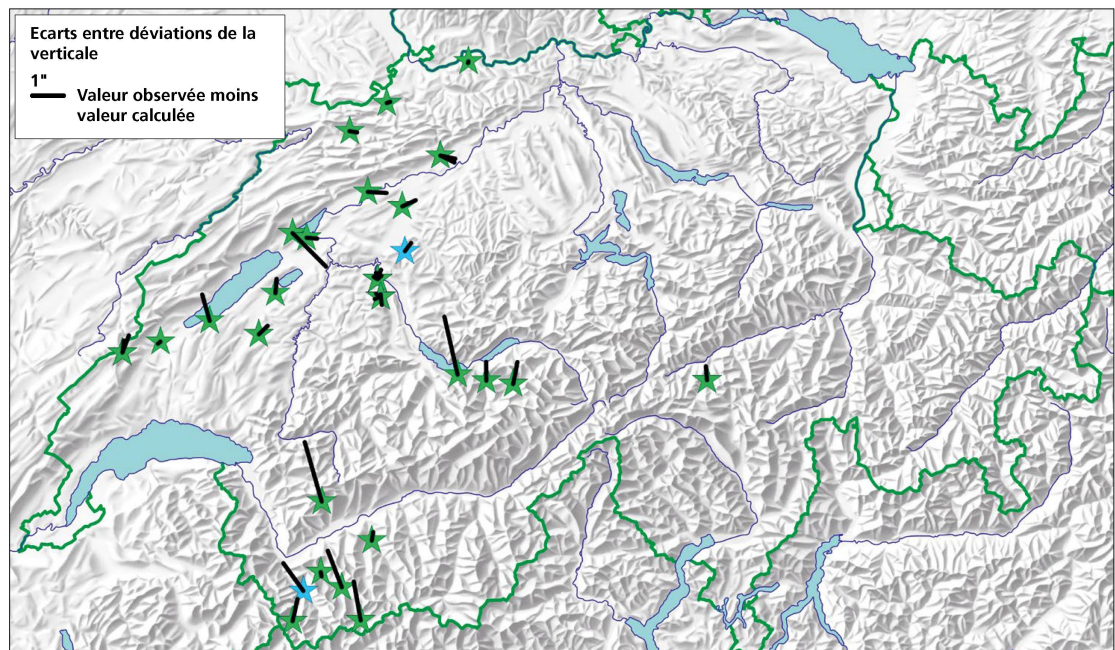
⁸ Hirt C. (2006) Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system. *Astronomy & Astrophysics*, 459, 283-290. doi: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065485>

⁹ Somieski AE. (2008). Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece. Thèse de doctorat. ETH Zurich. doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005710420>

Tableau 1: déviations de la verticale mesurées (ξ_{obs} , η_{obs}), erreurs formelles associées (σ_{ξ} , σ_{η}), déviations de la verticale calculées à partir du modèle de géoïde CHGeo2004 ($\xi_{Modèle}$, $\eta_{Modèle}$) et écarts entre les observations et le modèle ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$). Toutes les valeurs sont indiquées en secondes d'arc.

Station	ξ_{obs}	σ_{ξ}	η_{obs}	σ_{η}	$\xi_{Modèle}$	$\eta_{Modèle}$	$\Delta\xi$	$\Delta\eta$
Wabern	7.87	0.02	2.73	0.02	7.76	2.60	0.11	0.13
Wabern	7.84	0.03	2.48	0.02	7.76	2.60	0.08	-0.12
Wabern	7.96	0.03	2.65	0.02	7.76	2.60	0.20	0.05
Zimmerwald	7.84	0.03	3.70	0.02	7.92	3.89	-0.08	-0.19
Vallorbe	0.09	0.03	8.42	0.03	-0.30	8.37	0.39	0.05
Vallorbe	0.25	0.03	8.58	0.02	-0.30	8.37	0.55	0.21
Orbe	-3.52	0.03	10.02	0.02	-3.45	10.10	-0.07	-0.08
Yvonand	0.33	0.03	3.59	0.02	-0.52	3.83	0.85	-0.24
Avenches	2.16	0.03	1.39	0.02	1.70	1.35	0.46	0.04
Middes	6.53	0.02	-1.29	0.02	6.26	-1.57	0.27	0.28
Wabern	8.06	0.02	2.71	0.01	7.76	2.60	0.30	0.11
Sogn Gions	10.81	0.03	3.09	0.02	10.36	3.13	0.45	-0.04
La Neuveville	-10.18	0.03	8.44	0.02	-9.10	7.36	-1.08	1.08
Lüscherz	-2.88	0.03	5.08	0.02	-2.85	4.74	-0.03	0.34
Krauchthal	4.78	0.03	-0.86	0.03	4.51	-1.06	0.27	0.20
Derborence	-2.82	0.05	3.64	0.04	-4.73	4.19	1.91	-0.55
Grenchen	-6.07	0.03	5.98	0.02	-6.04	5.38	-0.03	0.60
Bätterkinden	-0.48	0.03	3.12	0.02	-0.68	2.69	0.20	0.43
Oensingen	-5.65	0.03	6.59	0.02	-5.43	6.14	-0.22	0.45
Oensingen	-5.53	0.03	6.62	0.02	-5.43	6.14	-0.10	0.48
Chanrion	-1.15	0.02	-13.03	0.02	-2.39	-12.81	1.24	-0.22
Fionnay	12.31	0.03	-20.67	0.02	11.14	-20.22	1.17	-0.45
Le Châble	13.19	0.03	-16.95	0.02	13.32	-16.97	-0.13	0.02
La Fouly	10.96	0.03	-0.62	0.03	10.26	-0.78	0.70	0.16
Orsières	16.36	0.03	-6.12	0.03	15.47	-5.48	0.89	-0.64
Euseigne	24.53	0.02	-10.83	0.02	24.25	-10.87	0.28	0.04
Delémont	0.90	0.03	4.26	0.02	0.94	4.02	-0.04	0.24
Dittingen	-0.94	0.02	4.16	0.01	-0.98	4.05	0.04	0.11
Möhlín	-4.74	0.02	1.77	0.01	-4.68	1.78	-0.06	-0.01
Grindelwald	22.56	0.04	-8.99	0.03	21.86	-9.13	0.70	0.14
Zweilütschinen	21.40	0.03	-9.62	0.02	20.79	-9.61	0.61	-0.01
Meielisalp	30.98	0.03	-9.68	0.02	29.12	-9.25	1.86	-0.43
Zimmerwald	7.66	0.02	3.93	0.02	7.92	3.89	-0.26	0.04
Wabern N	7.89	0.02	2.61	0.01	7.76	2.59	0.13	0.02
Wabern S	7.97	0.02	2.55	0.02	7.76	2.60	0.21	-0.05
Zimmerwald O	7.89	0.03	3.78	0.02	7.79	3.93	0.10	-0.15
Zimmerwald W	7.88	0.02	3.93	0.02	7.79	3.93	0.09	0.00
Moyenne							0.32	0.05
$\sigma_{Moyenne}$							0.41	0.22

Figure 5: écarts entre déviations de la verticale mesurées et calculées à partir du modèle de géoïde officiel



Perspectives

La densification visée et le remplacement des mesures de déviation de la verticale les plus anciennes se poursuivent en Suisse en 2021. A court terme, le modèle de géoïde existant pourra ainsi être contrôlé. A moyen terme, c'est le calcul d'un nouveau modèle de géoïde pour la Suisse qui est visé. Cela permettra aussi de garantir la cohérence des déterminations altimétriques par GNSS à l'avenir.

Le fait de disposer de deux caméras ouvre de nouvelles perspectives pour la validation et l'examen des facteurs limitants. Des mesures de test sont prévues simultanément avec les deux caméras au printemps 2021. swisstopo dispose pour cela de points de test adaptés avec la station fondamentale de Zimmerwald.

A partir du printemps 2021, la caméra zénithale sera utilisée dans la région genevoise dans le cadre d'une collaboration avec le CERN. Il s'agira de déterminer un géoïde local ultraprécis pour le nouvel accélérateur de particules en projet au CERN¹⁰.

Daniel Willi, Dr ès sc. ETH Zurich

Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales
swisstopo, Wabern
daniel.willi@swisstopo.ch

Jérôme Carrel, ing. dipl. HES

Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales
swisstopo, Wabern
jerome.carrel@swisstopo.ch

Urs Marti, Dr ès sc. techn. ETH Zurich

Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales
swisstopo, Wabern
urs.marti@swisstopo.ch

¹⁰ CERN (2021) Site Internet du projet FCC, www.home.cern/science/accélérateurs → les accélérateurs du futur → Futur collisionneur circulaire