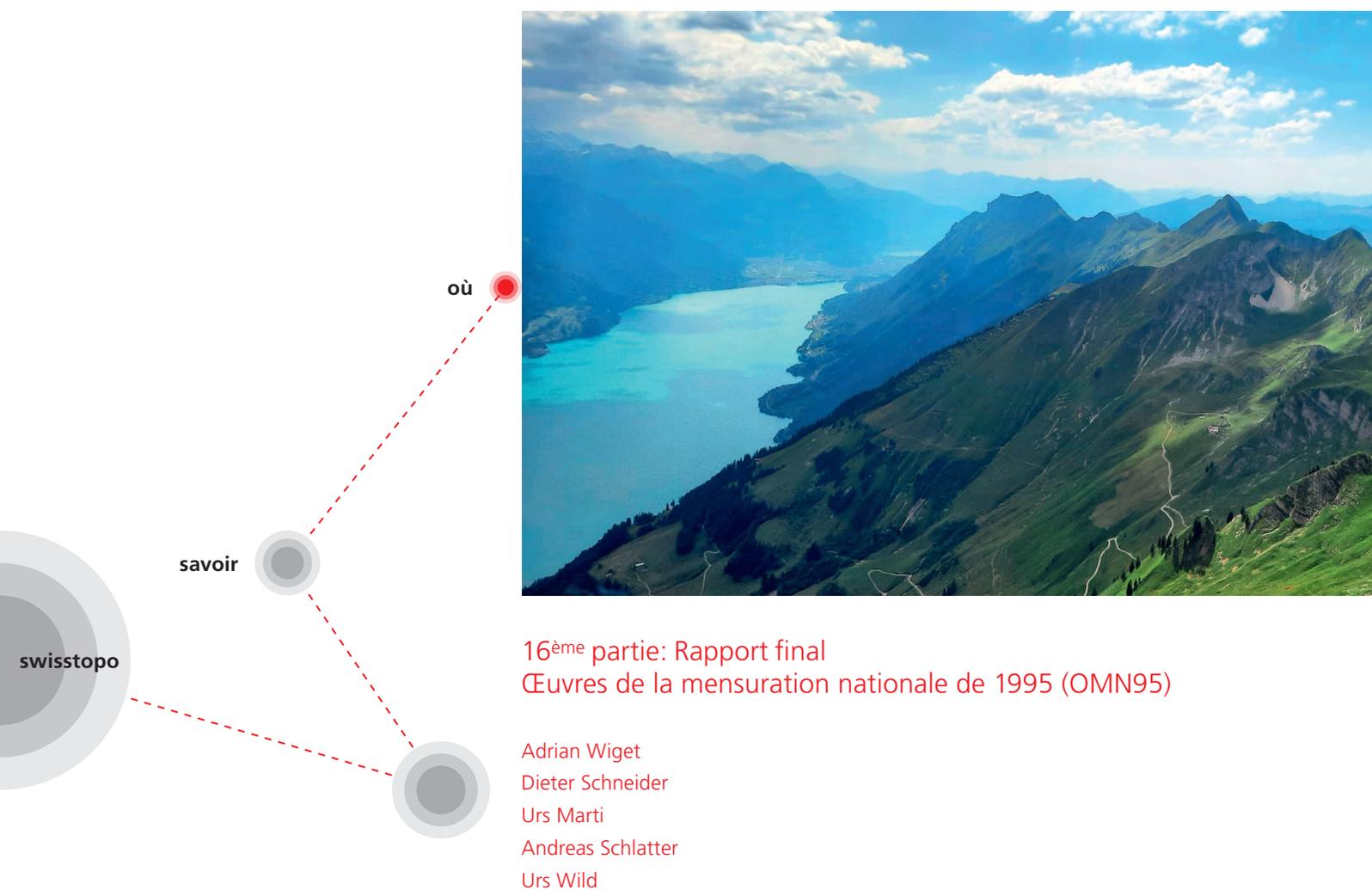


Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse «MN95»



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de topographie swisstopo
www.swisstopo.ch

Photo de couverture: Brienzergrat

ISBN **978-3-302-10033-3**
EAN **9783302100333**

Mentions légales

© 2023 Office fédéral de topographie swisstopo

Office fédéral de topographie swisstopo
Géodésie und direction fédérale des mensurations
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Téléphone: +41 58 469 01 11
E-Mail: mensuration@swisstopo.ch



Table des matières

1. Introduction	6
1.1 Historique et vision pour une nouvelle mensuration nationale	6
1.2 Travaux préliminaires et développements en parallèle	7
1.2.1 Logiciel bernois (Bernese GNSS Software)	7
1.2.2 Réseau test de Tourtemagne	7
1.2.3 Compensations de diagnostic de la triangulation de 1 ^{er} et 2 ^{ème} ordre DIA93 et DIA95	8
1.3 Bases légales pour l'introduction de MN95	10
2. Les œuvres de la mensuration nationale de 1995 « OMN95 »	13
2.1 Bases géodésiques GG95	17
2.1.1 Objectif stratégique, concept et contenu	17
2.1.2 Systèmes de référence terrestres	19
2.1.2.1 Systèmes globaux	19
2.1.2.2 Systèmes locaux	20
2.1.3 Systèmes de projection	21
2.1.4 Transformations	21
2.1.4.1 Transformations en 3D	21
2.1.4.2 Transformations en 2D (projection) ; FINELTRA	21
2.1.4.3 Transformations en 1D (altimétrie) ; HTRANS	22
2.1.5 Etat actuel et développements futurs possibles	22
2.2 Station fondamentale géostation de Zimmerwald	23
2.2.1 Objectif stratégique, concept et contenu	23
2.2.2 Télémétrie laser sur satellites (SLR, Satellite Laser Ranging)	26
2.2.3 Systèmes mondiaux de navigation par satellites (GNSS)	29
2.2.4 Station gravimétrique (ECGN / RGN)	30
2.2.5 Etat actuel et développements futurs	31
2.3 Réseau GNSS permanent AGNES et service de positionnement swipos	33
2.3.1 Objectif stratégique, concept et contenu	33
2.3.2 Réseau GPS/ GNSS automatique de la Suisse – AGNES	34
2.3.3 PNAC	35
2.3.4 Swipos (Swiss Positioning Service)	37
2.3.5 Etat actuel et développements futurs possibles	39
2.4 Réseau de référence GNSS réseau national MN95	40
2.4.1 Objectif stratégique et documentation	40
2.4.2 Etablissement du réseau	41
2.4.3 Comparaison avec MN03, changement de cadre de référence de MN03 vers MN95 et services de transformation	42
2.4.4 Etat actuel et développements futurs possibles	49
2.5 Réseau gravimétrique national RGN2004	50
2.5.1 Objectif stratégique et concept	50
2.5.2 Rappel historique	51
2.5.3 Mise en place du RGN	52



2.5.4	RGN d'ordre 0	52
2.5.5	RGN de 1 ^{er} et 2 ^{ème} ordre	53
2.5.6	RGN de 3 ^{ème} ordre	54
2.5.7	Ligne de calibration Interlaken–Jungfraujoeh	55
2.5.8	Pesanteurs pour le RAN (RGN de 4 ^{ème} ordre)	56
2.5.9	Etat actuel et développements futurs possibles	57
2.6	Réseau altimétrique national RAN95	59
2.6.1	Objectif stratégique	59
2.6.2	Travaux relatifs au projet partiel du réseau altimétrique national RAN95	59
2.6.3	Etat actuel et développements futurs possibles	64
2.7	Réseau géodésique combiné CH-CGN	65
2.7.1	Objectif stratégique	65
2.7.2	Réseau géodésique combiné européen ECGN (European Combined Geodetic Network)	65
2.7.3	Géostation de Zimmerwald	66
2.7.4	Réseau combiné CH-CGN	67
2.7.5	Mouvements verticaux	69
2.7.6	Etat actuel et développements futurs possibles	70
2.8	Modèle du géoïde CHGeo2004	71
2.8.1	Objectif stratégique	71
2.8.2	Rappel historique	71
2.8.3	Modèle du géoïde CHGeo98	72
2.8.4	Modèle du géoïde CHGeo2004	73
2.8.5	Etat actuel et développement futur	75
2.9	Mensuration nationale cinématique CHKM95	76
2.9.1	Objectif stratégique, concept et contenu	76
2.9.2	Modèle cinématique en 3D CHKM95	77
2.9.3	Etudes et analyses de déformations ; projets Swiss4D et Swiss4D-II	82
2.9.3.1	Projet Swiss4D	82
2.9.3.2	Projet Swiss4D – extension RSO	83
2.9.3.3	Projet Swiss4D-II	84
2.9.4	Etudes de déformations locales	85
2.9.5	Etat actuel et développements futurs	86
2.10	Documentation, communication et prestations de services	88
2.10.1	Objectif stratégique	88
2.10.2	Documentation et publications	88
2.10.3	Groupes de travail spécifiques et projets concernant la communication et l'introduction de MN95	89
2.10.4	Concept de communication et relations publiques	90
2.10.5	Autres canaux et supports d'information	91
2.10.6	Informations des cantons	92
2.10.7	Développement logiciel et prestations de services (services Web)	93
2.10.8	Contrôle de la qualité	97
2.10.9	Etat actuel et développements futurs	99



3. Appréciation et remerciements	100
Annexe	I
1. Glossaire	II
2. Publications / références	V
2.1 Publications spécialisées	V
2.1.1 Publications concernant l'histoire de la mensuration nationale de la Suisse	V
2.1.2 Articles de synthèse sur la mensuration nationale MN95 / les œuvres de la mensuration nationale OMN95, articles spécialisés traitant de leurs composantes et conséquences	V
2.1.3 Articles consacrés au thème de la géodynamique	VII
2.1.4 Volumes de la CGS - série consacrée aux travaux géodésiques et géophysiques réalisés en Suisse (sélection de travaux en rapport avec la mensuration nationale)	VIII
2.2 Berichte aus der L+T / Rapports du S+T; swisstopo-Doku	IX
2.3 Rapports techniques (Technische Berichte, TB) et swisstopo Reports – renvois vers d'autres publications	XI
2.3.1 EUREF	XI
2.3.2 Station fondamentale de Zimmerwald	XI
2.3.3 Réseau permanent GNSS AGNES / service de positionnement swipos	XII
2.3.4 Réseau de référence GNSS – réseau national MN95 (réseaux spéciaux inclus) / CHTRF :	XIV
2.3.5 Réseau gravimétrique national RGN2004	XIX
2.3.6 Réseau altimétrique national RAN95	XX
2.3.7 Réseau géodésique combiné CH-CGN / ECGN	XXII
2.3.8 Modèles du géoïde de la Suisse	XXIII
2.3.9 Modèle cinématique CHKM95 (projet Swiss4D/-II); cf. aussi A2.3.4 rapports sur CHTRF	XXIII
2.3.10 Documentation, logiciels, service de données sur les points fixes FPDS, transformation et services Web	XXIV
2.3.11 Contrôle de la qualité	XXVI
2.4 Logiciels	XXVIII



Avant-propos

Près de quatre décennies se sont écoulées depuis les premières mesures GPS géodésiques en Suisse (1984) et le domaine de la géodésie et de la mensuration nationale a profondément changé depuis lors. C'est très tôt que les géodésiens de swisstopo chargés de la mensuration nationale de la Suisse s'aperçurent qu'un renouvellement complet des œuvres de la mensuration nationale s'imposait. Si les travaux se concentrèrent initialement sur la définition d'un « réseau national GPS MN95 » venant remplacer la triangulation du 1^{er} au 3^{ème} ordre antérieure, il s'avéra très vite qu'un renouvellement en profondeur de l'ensemble des œuvres de la mensuration nationale devait être envisagé.

La première tâche à accomplir consistait à renouveler les bases théoriques. Il s'agissait de procéder à une évaluation critique des systèmes de référence, des modèles d'ellipsoïde et des systèmes de projection cartographique disponibles, puis de soupeser les avantages et les inconvénients des solutions permettant de les remplacer ou de les adapter. Les objectifs visés ici étaient le rattachement des systèmes et des cadres de référence nationaux locaux aux systèmes de référence et aux standards globaux, au travers notamment d'un ancrage homogène au nouveau point fondamental de Zimmerwald, de même que la prise en compte appropriée de la variation dans le temps de toutes les données géodésiques spatiales (géodynamique). Le renouvellement intégral du cadre de référence altimétrique (RAN) dans le respect des principes de la théorie du potentiel faisait aussi partie des tâches assignées, avec une prise en compte de la cinématique et en assurant la meilleure compatibilité possible entre les altitudes déterminées par nivellement et celles déduites d'observations GNSS, ce qui présupposait une étape supplémentaire préalable d'amélioration du modèle du géoïde officiel. Le besoin de renouveler le cadre de référence gravimétrique existant (le réseau gravimétrique de base) y était étroitement associé, pour en faire une partie intégrante de la nouvelle mensuration nationale sous le nom de réseau gravimétrique national (RGN). La mensuration nationale gravimétrique devint ainsi une nouvelle tâche fondamentale de swisstopo.

L'essor du positionnement par satellites permit des développements entièrement nouveaux et l'émergence de méthodes de mesure en temps réel, suscitant à leur tour le besoin de disposer de réseaux GNSS permanents. La mise à disposition adéquate des nouveaux cadres de référence via la mise en place et l'exploitation d'un réseau national GNSS permanent (AGNES), de services de positionnement nationaux (swipos®) et de services Web (comme le service de données sur les points fixes ou FPDS) devint donc une tâche prioritaire de la mensuration nationale. Il est évident aujourd'hui que ce développement est très loin d'être achevé et qu'une veille technologique permanente est indispensable pour suivre les innovations incessantes.

La nouvelle mensuration nationale atteignit alors une ampleur considérable et gagna encore en importance lorsque la Confédération prit la décision stratégique de bâtir une nouvelle infrastructure nationale de données géographiques (INDG). Le projet initial « MN95 », limité dans le temps, n'avait donc cessé de se développer pour se transformer en une œuvre complète englobant tous les aspects de la mensuration nationale. C'est pourquoi le présent rapport tente d'imprimer une nouvelle marque à la terminologie utilisée de manière très hétérogène en pratique dans la mensuration suisse en lien avec « MN95 ». Aujourd'hui, « MN95 » désigne tout autant l'œuvre géodésique de la mensuration nationale de manière générale que le cadre de référence MN95 (jeu de coordonnées dans le système de référence CH1903+) et son réseau de référence (réseau national GPS MN95) de manière spécifique, ce qui peut prêter à confusion à l'occasion. Dans ce rapport, les travaux géodésiques en rapport avec la nouvelle mensuration nationale sont désormais regroupés sous l'appellation générique d'« œuvres de la mensuration nationale de 1995 (OMN95) ».

Le premier projet du présent rapport fit suite à un colloque de swisstopo organisé au printemps 2006 par Dieter Schneider, responsable du domaine Géodésie, peu avant son départ à la retraite. C'est au vu de l'état des lieux alors dressé et des développements possibles esquissés pour les différents éléments constitutifs de la nouvelle mensuration nationale que le vœu d'un rapport final exhaustif, brochant un panorama complet de l'œuvre, fut formulé. L'appellation d'œuvres de la mensuration nationale devait par ailleurs souligner le fait que l'œuvre (d'art) complète résulte de l'assemblage de nombreux éléments dont chacun est une œuvre en soi. A cette époque, certaines parties des œuvres étaient encore en cours de développement. L'introduction dans la mensuration officielle et l'adaptation de la législation n'étaient pas encore achevées, de sorte qu'il n'était pas judicieux de mettre un point final à la série documentaire. Nul n'aurait



cependant pu envisager que 16 années allaient s'écouler jusqu'à la conclusion du rapport et qu'une partie des protagonistes de la nouvelle mensuration nationale auraient pris leur retraite entretemps. Si le présent rapport a finalement pu être mené à terme, c'est à l'engagement, à l'esprit d'équipe et à la ténacité de tous les coauteurs impliqués, en activité ou déjà la retraite, qu'il le doit. Qu'ils soient tous remerciés ici.

Le présent Doku 24 – « Œuvres de la mensuration nationale de 1995 – rapport final » ne peut fournir qu'une vue d'ensemble du développement et de l'état actuel du champ aussi riche que varié des travaux géodésiques, 25 ans après l'établissement de l'une de ses principales composantes, à savoir le « réseau national GPS MN95 ». Les différents chapitres de ce rapport conclusif sont d'ampleur variable, certains étant autrement plus détaillés que d'autres. La raison en est simple : les parties des OMN95 déjà documentées par ailleurs ont été intégrées ici sous une forme résumée. En revanche, les parties des OMN95 qui ont encore connu des développements importants au cours des dernières années et dont les travaux n'avaient pas encore fait l'objet de rapports spécifiques ont eu droit à des présentations plus fouillées. Les paragraphes 2.9 Mensuration nationale cinématique et 2.10 Documentation, communication et prestations de services sont principalement concernés ici. Procéder ainsi devait en outre permettre de consigner par écrit les dernières phases de l'historique du développement des œuvres. Le rapport doit enfin permettre à l'utilisateur des œuvres de la mensuration nationale d'accéder à la documentation complète des travaux établie dans le cadre de la série « Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95' », des séries de rapports internes (*Rapports techniques / swisstopo Reports*) et d'autres publications de swisstopo. C'est pourquoi il est renvoyé aux rapports originaux concernés de la série *swisstopo-Dokus* lors de la description des différentes composantes.

La conclusion de la série des rapports consacrés à la *Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse 'MN95'* suit enfin de peu l'échéance fixée dans l'ordonnance sur la géoinformation, puisque le changement de système et de cadre de référence géodésique de CH1903/MN03 vers CH1903+/MN95 devait avoir eu lieu le 31 décembre 2020 pour toutes les géodonnées de base relevant du droit fédéral. Nous souhaitons enfin que le présent rapport puisse fournir les informations de fond requises et les renvois vers toutes les sources nécessaires à l'ensemble de ses lectrices et de ses lecteurs, qu'elles ou ils soient membres de la classe politique, praticiennes et praticiens de la mensuration ou du monde éducatif et à l'avenir peut-être, historiennes et historiens.

Wabern, en octobre 2022

Dr. Dieter Schneider
1998–2006 Responsable du domaine Géodésie

Adrian Wiget
2006–2016 Responsable du domaine Géodésie

Dr. Urs Wild
2017–2022 Suppl. du Responsable du domaine « Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales »

Dr. Urs Marti

Dr. Andreas Schlatter



1. Introduction

1.1 Historique et vision pour une nouvelle mensuration nationale

L'historique de la mensuration nationale suisse, notamment celui de la phase de constitution durant la première moitié du 20^e siècle, est bien documenté [Zölly 1948]. Entre 1950 et 1970, l'accent fut mis sur la conservation et la mise à jour des œuvres de l'ancienne mensuration nationale (triangulation du 1^{er} au 3^{ème} ordre et nivellement fédéral) [Matthias 1977]. En ces années-là, c'est surtout la Commission géodésique suisse (CGS) qui coordonnait et encourageait les développements dans le domaine géodésique dans les hautes écoles, notamment en matière de géodésie astronomique. Elle poursuivit son action lors de l'introduction de la mesure électronique des distances (MED), pour la détermination du géoïde et enfin concernant la géodésie par satellites [CGS Volume 39].

Au sein de swisstopo, les méthodes de base de la mensuration nationale (triangulation et nivellement) continuèrent à être affinées, optimisées et numérisées entre 1970 et 1985 pour atteindre un grand degré de perfectionnement [Chablais et al. 1988, Schneider et al. 2003, Schneider et al. 2015]. Les développements internes les plus importants portèrent entre autres sur les logiciels, pour le traitement et la compensation des réseaux géodésiques (programme LTOP, etc.), l'introduction de la MED en pratique et l'étude de mouvements verticaux de l'écorce terrestre fondée sur l'analyse de nivellements répétés.

Les nouvelles méthodes de mesure (MED) permirent de déceler des carences (inhomogénéités dans les réseaux de triangulation) durant cette période, en différents endroits des cadres de référence existants de la mensuration nationale (MN03 et NF02). On tenta d'y remédier conformément à la stratégie de l'époque, c.-à-d. en procédant à des renouvellements partiels des réseaux de triangulation du 1^{er} au 3^{ème} ordre et en remesurant certains tronçons des lignes du nivellement fédéral. En agissant ainsi, on voulait aussi répondre aux exigences croissantes de la mensuration officielle envers la mensuration nationale en termes de densité des points fixes (triangulation de 4^{ème} ordre). Bien que ce mode opératoire ait simplement modifié la répartition des contraintes existantes dans les réseaux avec une atténuation de leurs effets nocifs pour principale conséquence, rebâtir une mensuration nationale à deux cadres de référence (planimétrie / altimétrie) sur une base entièrement nouvelle restait totalement inenvisageable à l'époque, ne serait-ce que pour des raisons économiques.

Le développement du système *NAVSTAR GPS (Global Positioning System)* par le département de la Défense des Etats-Unis et le lancement des premiers satellites de test du bloc I du GPS à partir de 1978 marquèrent l'entrée dans une nouvelle ère pour la navigation par satellites. Les premiers rapports consacrés au début des années 1980 aux tentatives d'utilisation du système pour le positionnement géodésique laissèrent entrevoir des perspectives très intéressantes pour la future mensuration nationale. Il en résulta une vision qui fut discutée entre géodésiens en Suisse et motiva finalement les responsables à déployer les efforts nécessaires à la mise en place d'une nouvelle mensuration nationale MN95 :

« Grâce au GPS, l'utilisateur de la future mensuration nationale pourra déterminer sa position très rapidement en n'importe quel point du pays, dans un système de référence mondial et avec une précision centimétrique. »

Cette idée devint un objectif ambitieux, pour la réalisation duquel un grand nombre de développements géodésiques virent le jour durant deux décennies au moins.



1.2 Travaux préliminaires et développements en parallèle

Durant la seconde moitié des années 1980, l'essentiel des efforts déployés en géodésie et en mensuration nationale concernaient les travaux préliminaires que demandaient le développement et la mise au point de la nouvelle technologie GNSS, sans oublier la formation du personnel de ce qui était alors la section Géodésie. Les travaux préliminaires et les développements principaux furent entrepris dans les domaines qui vont maintenant être évoqués.

1.2.1 Logiciel bernois (Bernese GNSS Software)

On se rendit compte très tôt, à l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB), que le savoir des astronomes en matière de mécanique céleste et de calcul des orbites des satellites allait revêtir une importance majeure dans le cadre du développement et de l'utilisation de la technologie GPS. C'est donc sous la désignation de *Bernese GPS Software* qu'un logiciel de traitement GPS fut développé à l'AIUB à l'initiative et sous la direction du professeur Dr G. Beutler (et avec des contributions essentielles de futurs professeurs, notamment les Dr W. Gurtner, M. Rothacher et U. Hugentobler) et acquit une réputation mondiale dans le milieu de la géodésie. L'AIUB devint rapidement l'un des instituts les plus en pointe dans ce domaine hautement spécialisé.

Le domaine Géodésie de l'Office fédéral de topographie swisstopo sut tirer le plus grand profit de ces développements. Les géodésiens purent ainsi jouir d'une formation théorique de très haut niveau en matière de géodésie par satellites via GPS et l'appliquer ensuite dans le cadre des traitements effectués à l'aide du logiciel *Bernese GPS Software*. La collaboration se révéla particulièrement fructueuse pour les deux institutions : swisstopo put mettre à disposition des données de qualité élevée issues de campagnes de mesures d'ampleurs différentes et saisies par un large éventail de récepteurs GPS. L'AIUB put améliorer le logiciel progressivement, au fil des expériences acquises avec ces données, et tint compte dans ce cadre des exigences de précision élevées de la mensuration nationale et de la mensuration d'ingénieur.

Un autre aspect positif des développements d'alors résidait dans l'excellente collaboration entretenue avec les institutions géodésiques tant en Suisse qu'en Europe, laquelle fut coordonnée sous l'égide de la Commission géodésique suisse (CGS) au plan national et dans le cadre de l'Association internationale de géodésie (AIG) et de sa sous-commission EUREF au plan international. La collaboration était tout aussi étroite avec les offices compétents des pays voisins, notamment avec le BKG en Allemagne et le BEV en Autriche ainsi qu'avec le service des mensurations du Land allemand de Basse-Saxe (Landesverwaltungsamt Niedersachsen), la coopération se traduisant en particulier par le prêt réciproque de récepteurs GPS et la mise à disposition de personnel.

C'est surtout à cette avance en termes de savoir et à la clairvoyance de l'équipe de direction de la section à l'époque (avec à sa tête le Dr h.c. Erich Gubler, alors président d'EUREF et directeur de swisstopo plus tard) que la géodésie suisse doit d'avoir joué en ce temps un rôle majeur lors de l'introduction de la nouvelle technologie dans la mensuration nationale, rôle qu'elle a conservé depuis.

1.2.2 Réseau test de Tourtemagne

L'aspiration à utiliser rapidement les développements de la géodésie par satellites dans le cadre de la mensuration nationale fit naître les besoins suivants au sein de swisstopo au milieu des années 1980 :

- 1) acquisition de connaissances et d'expérience pratique avec la nouvelle technologie GPS ;
- 2) test des possibilités de mise en œuvre et des limites, en termes de précision et de fiabilité des mesures notamment, dans le cas aussi de fortes dénivelées en terrain montagneux ;
- 3) formation en pratique (*training on the job*) du personnel de la section Géodésie à tous les échelons, tant pour les mesures que pour leur traitement.

La création en 1985 du groupe de travail GPS de la Commission géodésique suisse (CGS) donna une impulsion décisive à l'analyse de la nouvelle technologie. On décida ainsi d'implanter un réseau test de haute précision en 3D près de Tourtemagne (VS), notamment pour tester les nouvelles méthodes de mesure dans l'espace alpin [CGS Volume 45]. Les objectifs suivants étaient assignés à ce réseau :



- 1) en tant que réseau test GPS : réseau de référence pour le contrôle et l'évaluation de récepteurs GPS ainsi que de méthodes de mesure et de traitement ;
- 2) en tant que réseau d'essai terrestre en 3D : contrôle d'instruments de mesure géodésiques classiques et de méthodes de mensuration ;
- 3) en tant que réseau de contrôle géodynamique : étude dans la durée de la cinématique de la croûte terrestre superficielle au sein de la zone d'étude sismiquement active.

A l'issue des mesures terrestres, 16 campagnes de mesures furent conduites en tout entre 1985 et 1996 avec 18 types de récepteurs GPS différents [CGS Volume 51]. Les données GPS et les coordonnées de comparaison tridimensionnelles déterminées par voie terrestre (*ground truth*) servirent des années durant au test et à la poursuite du développement du traitement des données GPS au sein de l'AIUB, de swisstopo et de l'ETHZ. En outre, le personnel de la section Géodésie de swisstopo, à différents niveaux de formation, ainsi que des équipes invitées venant d'Allemagne, d'Autriche et de France purent acquérir de premières expériences en pratique avec la méthode de mesure GPS. Les résultats obtenus, les enseignements tirés et les expériences acquises dans le cadre du projet de TOURTEMAGNE servirent de base, particulièrement précieuse, à la conception, à la planification et à l'exécution de la première mesure du nouveau réseau national GPS MN95.

Pour être totalement complet, on indiquera encore ici que swisstopo implanta également un réseau de référence extrêmement précis à Thoun (distances courtes sur l'Allmend). Il servit notamment à évaluer les récepteurs GPS et à déterminer les décalages (offsets) relatifs des antennes GPS.

1.2.3 Compensations de diagnostic de la triangulation de 1^{er} et 2^{ème} ordre DIA93 et DIA95

Dans l'ancienne mensuration nationale MN03, les travaux principaux portèrent sur la triangulation nationale du 1^{er} au 3^{ème} ordre, de sorte que la plupart des données observées et saisies par swisstopo le furent dans ce cadre. D'autres jeux de données de mesures géodésiques existent cependant pour la période courant de 1890 à 1986, allant des premières mesures de bases et d'azimuts astronomiques jusqu'à des mesures de distances (micro-ondes, laser), toutes ces mesures pouvant être intégrées dans une compensation globale de l'« ère pré-GNSS ». Bon nombre de ces mesures furent effectuées dans le cadre de travaux scientifiques de la CGS, mais ne furent pas prises en compte pour réaliser le cadre de référence (jeu de coordonnées) MN03. Si la compensation globale rigoureuse de toutes ces données de mesure était souhaitable depuis longtemps du point de vue géodésique, elle ne fut rendue concrètement envisageable, avec une charge de travail acceptable, qu'une fois les données numérisées afin de pouvoir les utiliser avec le logiciel de compensation LTOP.

C'est en 1985, dans le contexte des préparatifs entrepris pour une nouvelle mensuration nationale, que la section Géodésie décida de procéder à une compensation de diagnostic complète englobant toutes les mesures du réseau de triangulation de 1^{er}/2^{ème} ordre. Ainsi, les connaissances et l'expérience pratique acquises par la section en matière de compensation de réseaux géodésiques classiques furent sollicitées une nouvelle fois et une documentation complète fut établie.

Le projet de « compensation de diagnostic DIA93 » [Berichte aus der L+T Nr. 9 – LV95 – Teil 4, *non traduit*] poursuivait principalement les objectifs suivants :

- documentation complète et homogène de toutes les mesures géodésiques du réseau de triangulation de 1^{er}/2^{ème} ordre sur la période 1880–1980 ;
- calcul du meilleur jeu de coordonnées possible de tous les PT 1^{er}/2^{ème} ordre avec leur matrice de variance-covariance aux fins de comparaison ;
- évaluation statistique de la précision des différentes classes d'observations ;
- analyse des déformations dans le cadre de référence officiellement en vigueur MN03 et test de leur modélisation mathématique ;
- mise à disposition d'un réseau de comparaison pour l'analyse de nouvelles méthodes de mesure (Doppler, GPS, etc.) ;
- calcul de jeux de paramètres pour la transformation entre le datum géodésique suisse (cadre de référence MN03) et d'autres cadres de référence mondiaux ;



- mise à disposition des données pour des études géodynamiques de mouvements récents de la croûte terrestre en Suisse.

En résumé, les principaux résultats de DIA93 sont les suivants :

- les mesures de directions originales (1893-1982), les azimuts astronomiques (1890–1970) et les données MED (1963–1986) sont de très bonne qualité ;
- la comparaison avec les résultats des compensations RETRIG (1^{er} ordre seul) permet de constater que l'ajout des mesures du 2^{ème} ordre contribuait grandement à améliorer la précision ;
- une transformation de Helmert des coordonnées de DIA93 sur les valeurs officielles de MN03 fit apparaître une rotation de $-2,7^{\circ} \pm 0,3^{\circ}$ et une différence d'échelle de $-5,0 \text{ ppm} \pm 0,05 \text{ ppm}$;
- les comparaisons avec les mesures de distances au sein des réseaux d'amplification de base d'Aarberg, Weinfelden et Bellinzona (1980/81) et avec la base d'Heerbrugg (1959) se révélèrent également intéressantes, tout comme celles avec les mesures de distances laser terrestres (1985) de Zimmerwald vers le Monte Generoso via la Jungfraujoeh.

Le lien avec le réseau GPS MN95 fut enfin établi avec la compensation de diagnostic de 1995 (DIA95). Ainsi, une meilleure analyse des mesures géodésiques et des déformations présentes dans la triangulation de 1^{er}/2^{ème} ordre fut aussi possible et les données de base pour la transformation entre MN03 et MN95 furent mises à disposition. Les travaux relatifs à la compensation de diagnostic 1995 sont documentés dans [*Berichte aus der L+T* Nr. 14 – LV95 – Teil 8, *non traduit*].



1.3 Bases légales pour l'introduction de MN95

A l'époque du démarrage du projet MN95 et de la mise en place du réseau national GPS, les tâches de l'Office fédéral de topographie (L+T/swisstopo) étaient régies par la loi fédérale du 21 juin 1935 concernant l'établissement de nouvelles cartes nationales et par l'« ordonnance sur les attributions du Service topographique fédéral » du 10 mai 1972 (RS 510.61). Cette dernière précisait que la L+T (section Géodésie) était chargée d'établir les bases géodésiques et de mettre en place, de conserver et de mettre à jour les réseaux géodésiques de la mensuration nationale. La mensuration officielle (MO) est placée sous la haute surveillance de la Direction fédérale des mensurations cadastrales qui a été intégrée à l'Office fédéral de topographie swisstopo par le Conseil fédéral le 1^{er} janvier 1999. Le système et le cadre de référence (encore appelé datum géodésique alors) pour la MO étaient encore définis à l'époque à l'article 20 de l'ordonnance sur la mensuration officielle (OMO, RS 211.432.2). Il était cependant clair que toutes les mensurations en Suisse devaient s'appuyer sur un système et un cadre de référence unifiés. C'est pourquoi la collaboration étroite entre la mensuration nationale (L+T/swisstopo) et la mensuration officielle (Direction du cadastre D+M et CSCC) revêtait une très grande importance. Pour que la MN95 ne reste pas simplement un projet scientifique, swisstopo devait convaincre les utilisateurs de la mensuration nationale, au premier rang desquels les représentants de la mensuration officielle, des avantages procurés par la nouvelle mensuration nationale.

En conséquence, les institutions intéressées et concernées (telles que la Direction fédérale des mensurations cadastrales, l'état-major général, l'armée, les forces aériennes, le groupement de l'armement, le GP-SSMAF, d'autres associations, les hautes écoles, les PTT Telecom, etc.) furent intégrées aux consultations menées en vue d'introduire la MN95 et de définir le nouveau système de référence CH1903+ (y compris la fixation de l'origine et de ses nouvelles coordonnées artificiellement décalées, dites *false easting / false northing*).

Au départ, un regard plutôt critique était porté sur le rapport entre le bénéfice inhérent à l'introduction de la MN95 dans la MO et la charge de travail qu'elle impliquait. Un groupe de travail placé sous la direction de la Direction fédérale des mensurations cadastrales fut alors instauré, chargé d'analyser les conséquences de la nouvelle mensuration nationale MN95 et d'en débattre le plus largement possible. Il remit un rapport final des plus détaillés, passant en revue le contexte initial, l'environnement, les conflits d'objectifs, les aspects juridiques, l'utilité, les frais, l'organisation et les scénarios possibles pour bâtir des stratégies de mise en œuvre, tirer des conclusions et formuler des recommandations.

Le groupe de travail en vint à la conclusion que « *la MO devait anticiper l'avenir et donc remplacer le cadre de référence MN03 par MN95* ». Il estimait dans son rapport que la MO devait prendre acte du développement technologique pour l'utiliser au mieux et y prendre une part active, afin de conserver sa position dominante dans le domaine des systèmes d'information du territoire et de continuer à pouvoir exercer sa mission pleinement. Le passage à MN95 était jugé nécessaire, judicieux dans l'optique de l'économie nationale et exécutable de manière rationnelle au vu de la stratégie décrite. Il reconnaissait que les problèmes viendraient bien moins du volet technique du projet que des domaines de l'information et de l'organisation. « *Plus tôt on démarre la conversion, plus on réduit les frais (coordination avec la réalisation de la MO 93) et plus tôt on en récolte les bénéfices.* »

Les nouveaux systèmes de référence CHTRS95 et CH1903+ (origine : E = 2 600 000 m, N = 1 200 000 m) furent définis en tenant compte des résultats de la consultation précitée et approuvés par la direction de swisstopo le 23 avril 1996. Le 6 mai 1996, swisstopo et la D+M décidèrent de passer à MN95 sur la base d'une large consultation menée au niveau de la MO et mirent une organisation en place pour le projet. Les travaux d'adaptation de la MO à MN95 furent inclus dans les conventions-programmes ordinaires conclues entre la Confédération et les cantons. La Confédération participait à hauteur de 60% aux frais de cette « adaptation particulière présentant un intérêt national exceptionnellement élevé ». A la fin de l'année 1998, la Direction fédérale des mensurations cadastrales fut intégrée à l'Office fédéral de topographie swisstopo, ce qui facilita la coordination entre la MN et la MO.

Après l'introduction de la **loi sur l'organisation du gouvernement et de l'administration (LOGA)** du 21 mars 1997 (RS 172.010) et de l'ordonnance sur l'organisation du gouvernement et de l'administration (OLOGA) du 25 novembre 1998 (RS 172.010.1), le DDPS édicta l'**Ordonnance sur l'organisation du**



Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports (Org-DDPS) du 13 décembre 1999 (RS 172.214.1) qui vint se substituer à l'ordonnance précitée. Il y était défini ceci :

Art. 5 Les unités administratives subordonnées et leurs fonctions

1 Sont subordonnés au Secrétariat général et exercent les fonctions suivantes :

a. L'Office fédéral de la topographie :

Il gère la mensuration nationale géodésique et topographique, établit les cartes nationales, assume la direction générale et la haute surveillance de la mensuration officielle ; il fournit des prestations commerciales dans son domaine spécialisé et coordonne les besoins de l'administration fédérale en matière de données dans le secteur des systèmes d'information géographique, en gérant un centre d'expertise habilité à donner des directives.

En 2003, swisstopo cessa d'être subordonné au Secrétariat général du DDPS pour venir intégrer le nouveau « groupement armasuisse ». L'**Org-DDPS** du 7 mars 2003 fut ainsi modifiée comme suit :

Art. 13 let. c

Sont subordonnés au groupement armasuisse avec les fonctions suivantes :

c. l'Office fédéral de topographie (swisstopo) :

il gère la mensuration nationale géodésique, topographique et cartographique, établit les cartes nationales, assume la direction générale et la haute surveillance de la mensuration officielle, garantit la réalisation d'un relevé géologique du pays et fournit des prestations commerciales dans son domaine de spécialité ; il coordonne les besoins de l'administration fédérale dans les domaines de la géoinformation et de la géologie nationale en gérant un organe de coordination pour chacun d'entre eux, habilité à donner des directives ; il accomplit d'autres tâches qui lui sont attribuées par la législation sur la géoinformation.

C'est en vertu de l'**art. 75a « Mensuration »** de la **Constitution fédérale** (al. 1 : « *La mensuration nationale relève de la compétence de la Confédération* »), approuvé lors de la votation populaire du 28 novembre 2004, que le Parlement adopta la **loi fédérale sur la géoinformation LGéo** (RS 510.62). Elle fut mise en vigueur par le Conseil fédéral avec les ordonnances d'exécution suivantes, à la date du 1^{er} juillet 2008 :

- Ordonnance sur la géoinformation OGéo (RS 510.620)
- Ordonnance de l'Office fédéral de topographie sur la géoinformation OGéo-swisstopo (RS 510.620.1)
- Ordonnance sur la mensuration nationale OMN (RS 510.626)
- Ordonnance du DDPS sur la mensuration nationale OMN-DDPS (RS 510.626.1)

La LGéo, l'OGéo et l'OGéo-swisstopo, l'OMN et l'OMN-DDPS formèrent dès lors des bases légales autrement plus concrètes pour les OMN 95 :

- dans l'**OGéo** sont définies les références officielles en planimétrie et en altimétrie ainsi que les délais de transition pour le changement de système et de cadre de référence planimétrique (passage de CH1903/MN03 à CH1903+/MN95) : les géodonnées de référence doivent être converties pour la fin 2016 au plus tard, les autres géodonnées de base relevant du droit fédéral devant l'être pour la fin 2020 ;
- l'**OGéo-swisstopo** définit les systèmes de référence géodésiques locaux CH1903 et CH1903+ ainsi que la transformation de coordonnées entre CHTRS95 et CH1903+ ;
- l'**OMN** prescrit les éléments de la mensuration nationale géodésique (les composantes des OMN95), décrit les systèmes et les cadres de référence globaux ainsi que les systèmes et les cadres de référence altimétrique de la mensuration nationale ;
- l'**OMN-DDPS** règle d'autres détails techniques relatifs aux systèmes et aux cadres de référence de la mensuration nationale et à leurs composantes tels que les stations fondamentales, les stations permanentes, le réseau gravimétrique national et le modèle du géoïde de la Suisse. Elle définit les prestations officielles de la mensuration nationale géodésique incombant à l'Office fédéral de topographie.

Ces actes législatifs, notamment l'OGéo, respectent pleinement la Stratégie pour l'information géographique au sein de l'administration fédérale adoptée par le Conseil fédéral en juin 2001, de même que le concept de mise en œuvre associé. Cette stratégie vise à accroître la disponibilité de géoinformations de grande qualité, contribuant ainsi à la croissance économique, à l'amélioration de l'environnement, à un



développement durable et au progrès social. La mise en place d'une Infrastructure nationale de données géographiques INDG est au cœur de cette stratégie. L'INDG intègre en particulier les géodonnées de base, indispensables pour la conduite de l'administration. Il s'agit de géodonnées produites et mises à jour dans l'intérêt de tous, sur l'intégralité du territoire, aux niveaux de qualité et d'homogénéité requis, dans le cadre d'une tâche fondamentale et destinées à être utilisées largement. Elles se fondent sur un acte législatif.

Le catalogue des géodonnées de base de l'INDG suisse est subdivisé en « données de référence » et en « données thématiques ». Les *géodonnées de référence* sont les géodonnées de base sur lesquelles se fondent toutes les autres informations géoréférencées. En font notamment partie, aussi, les systèmes de référence géodésiques (CH1903+ ; y compris l'ellipsoïde de référence, le géoïde, les projections cartographiques et les transformations) et les cadres de référence (MN95 et RAN95 ; coordonnées planimétriques et altitudes des points de référence, stations permanentes GNSS), soit les composantes essentielles des OMN95. Les offres d'information de l'INDG doivent être utilisées au moyen de *géoservices* en réseau. En font également partie, en plus des services de cartographie Web et de diffusion, les services de positionnement et de transformation de coordonnées.

On indiquera enfin que l'Office fédéral de topographie est placé sous l'autorité directe du chef du DDPS depuis le 1^{er} mars 2015 (il s'agissait alors du CF Ueli Maurer) et que l'**Org-DDPS** (RS 172.214.1) a été adaptée comme suit (état le 1^{er} janvier 2018) :

Section 6a Office fédéral de topographie

Art. 13

1 Conformément aux directives politiques, l'Office fédéral de topographie (swisstopo) est le centre de compétences national de la Confédération suisse pour la description, la représentation et l'archivage de géodonnées à référence spatiale (géoinformation).

2 Pour poursuivre les objectifs fixés dans la loi du 5 octobre 2007 sur la géoinformation (LGéo), swisstopo assume notamment les tâches suivantes :

- a. il organise une mensuration tridimensionnelle nationale moderne fournissant des données ayant l'actualité et la qualité requises ;
- b. il fournit des produits et services géodésiques, topographiques, cartographiques et géologiques adaptés aux besoins des clients civils et militaires ;
- c. il sauvegarde les géoinformations permettant de retracer l'historique du développement du territoire et de l'environnement ;
- d. il établit des bases géologiques en vue de l'exploitation des richesses du sous-sol et assure l'exploitation du laboratoire de recherche du Mont Terri ;
- e. il fournit des prestations dans les domaines de la géoinformatique et de la géoinformation au sein de l'administration fédérale ;
- f. il coordonne les besoins de l'administration fédérale dans les domaines de la géoinformation et de la géologie nationale en gérant un organe de coordination pour chacun d'entre eux, habilité à donner des directives ;
- g. il assume la direction générale et la haute surveillance de la mensuration officielle et du cadastre des restrictions de droit public à la propriété foncière ;
- h. il accomplit d'autres tâches que lui attribue la législation dans le domaine de la géoinformation.



2. Les œuvres de la mensuration nationale de 1995 « OMN95 »

La mensuration nationale géodésique compte parmi les tâches principales de l'Office fédéral de topographie swisstopo. Elle englobe l'établissement, le développement continu et la conservation des bases géodésiques, notamment les systèmes de référence terrestres et leur réalisation par des cadres de référence au moyen de réseaux géodésiques de points fixes et permanents. L'objectif initial, à savoir le remplacement des réseaux de triangulation du 1^{er} au 3^{ème} ordre de la mensuration nationale de 1903 (MN03) existant jusqu'alors par un nouveau champ de points fixes (MN95) adapté aux exigences propres aux nouvelles méthodes de mesure et la mesure des coordonnées de tous ces points par GPS, put être atteint en très peu de temps. Le réseau national GPS ne peut cependant pas satisfaire à lui seul les besoins d'une mensuration nationale moderne. L'ancien système des altitudes usuelles du nivellement fédéral (NF02) ne sera plus à même de remplir les exigences d'un système de référence altimétrique précis à l'avenir et cela, pour diverses raisons :

- le nouveau système lié au champ de pesanteur devrait reposer sur une base rigoureuse du point de vue de la théorie du potentiel ;
- la modification des altitudes dans le temps devrait pouvoir être décrite par un modèle cinématique, libre de toute contrainte de rattachement et compatible avec le cadre altimétrique européen EUVN ;
- le nouveau cadre altimétrique devrait être cohérent avec le cadre tridimensionnel du réseau de référence GPS MN95, après prise en compte du modèle du géoïde officiel.

C'est pourquoi le projet d'une nouvelle mensuration nationale « MN95 » fut révisé sur le plan conceptuel en 1992/93 et adapté à l'objectif ainsi étendu [*Berichte aus der L+T* Nr. 6 – LV95 – Teil 1, *non traduit*]. On compléta la tâche centrale par des tâches partielles et l'organisation du projet s'en trouva articulée comme suit :

- 1) les systèmes de référence (incluant la géostation de Zimmerwald, EUREF et les paramètres de transformation entre systèmes de référence) ;
- 2) la densification (incluant la compensation de diagnostic, la transformation et l'interpolation, les rattachements à la triangulation nationale et au nivellement fédéral) ;
- 3) les systèmes altimétriques (incluant le géoïde, la gravimétrie, la compensation cinématique du nivellement fédéral et REUN / UELN) ;
- 4) la méthode GPS (incluant les techniques de mesure, les traitements, le logiciel, les modèles météo, les orbites des satellites et la mise en place du réseau national GPS) ;
- 5) la coordination (incluant la documentation et la communication / les relations publiques pour MN95, les contacts avec la Direction fédérale des mensurations cadastrales).

La nouvelle mensuration nationale MN95, avec ses concepts, ses modèles, ses divers réseaux, ses sites propres et ses différents jeux de données, se développa ainsi au fil des décennies au point de constituer une véritable œuvre géodésique désormais, appelée les **œuvres de la mensuration nationale de 1995 (OMN95)**, le pluriel soulignant que chaque composante est une œuvre en soi. Il s'agit notamment (cf. Figure 2-1) de la définition des systèmes géodésiques de référence CHTRS95 et CH1903+, de la station fondamentale / géostation de Zimmerwald, du réseau GNSS automatique suisse AGNES et du service de positionnement swipos, du réseau national GPS des points MN95, du réseau altimétrique national RAN95, du réseau gravimétrique national RGN2004, du modèle du géoïde de la Suisse CHGeo2004, de la base de transformation CHENyx06 et du modèle cinématique CHKM95.

On fixa donc les **objectifs et les exigences** suivants à une mensuration nationale de son temps :

- définition de systèmes géodésiques de référence nationaux modernes sur le modèle des systèmes de référence internationaux globaux, notamment le système européen ETRS89, afin de servir de base à l'infrastructure nationale de données géographiques (INDG) ;
- établissement du lien unissant les systèmes et les réseaux locaux (nationaux) aux systèmes et aux cadres géodésiques globaux (internationaux) par l'exploitation d'une station fondamentale intégrée à des réseaux de référence internationaux (géostation de Zimmerwald) et par des mesures de rattachement ; détermination de paramètres de transformation rigoureux ;



- mise en place d'un cadre de référence terrestre tridimensionnel par des mesures GPS resp. GNSS répétées extrêmement précises et fiables sur des points de référence aisément accessibles et matérialisés à demeure (réseau national GPS MN95) et par des mesures GNSS effectuées en continu sur des stations permanentes (AGNES) ; détermination des coordonnées en 3D et de leur covariance, de même que du champ de vitesses associé ;
- mise en relation avec les réseaux de la mensuration nationale en vigueur jusqu'alors (MN03 et nivellement fédéral NF02) ; établissement de possibilités de rattachement optimales pour les réseaux de densification de la mensuration officielle et mise à disposition des outils de transformation ;
- mise à disposition sous une forme appropriée des positions et éventuellement des vitesses des points de référence géodésiques et diffusion des mesures sur les stations permanentes GNSS via le service de positionnement swipos® en qualité de géodonnées de référence pour toutes les mensurations effectuées en Suisse ;
- renouvellement du réseau gravimétrique national RGN à l'aide de mesures gravimétriques absolues et relatives et détermination de données astrogéodésiques (déviations de la verticale) et gravimétriques (mesures ad hoc) sur les points du réseau national GPS, en des points sélectionnés du nivellement fédéral et en des points revêtant une signification particulière ;
- calcul d'un modèle du géoïde de précision centimétrique faisant le lien entre le réseau en 3D (GNSS) et le réseau altimétrique national (nivellement) ;
- définition du réseau altimétrique national RAN95 comme cadre de référence altimétrique national ; il se base sur un système altimétrique rigoureux du point de vue de la théorie du potentiel (altitudes orthométriques et éventuellement normales) en tenant compte de la pesanteur ; il est calculé au moyen d'une compensation cinématique globale des mesures répétées dans le nivellement fédéral, combinées aux altitudes ellipsoïdales issues du réseau national GPS et aux cotes du géoïde provenant du modèle du géoïde renouvelé ;
- saisie des mouvements dans le temps et dans l'espace de la croûte terrestre superficielle par la mensuration répétée en 3D de champs de points géodésiques adaptés avec une précision maximale, détermination de séries temporelles et d'un modèle cinématique de la Suisse.

Le développement de certaines parties des OMN95 est désormais achevé, si bien qu'elles sont dorénavant tenues à jour et conservées. D'autres parties font l'objet de mesures répétées à intervalles périodiques. Des jeux de données ponctuels en résultent (par exemple des coordonnées, des vitesses, etc.) et sont affectés à une époque bien précise. Des séries temporelles s'en déduisent à leur tour et servent à analyser les modifications dans le temps. Les installations de mesure et de traitement en service permanent qui fournissent des données en temps réel aux utilisateurs sont également incluses dans les œuvres complètes. Une attention particulière doit être accordée à ces installations permanentes qui doivent bénéficier de ressources suffisantes, parce qu'elles sont en exploitation 365 jours par an, 24 heures sur 24 et doivent fournir des données en ligne en ne connaissant si possible, aucune interruption de service. Le développement de ces parties les plus récentes des OMN95 doit se poursuivre sans arrêt, afin de rester constamment en phase avec le rythme très soutenu de l'innovation dans le secteur des technologies de l'information et de la communication.

Certaines parties des OMN95 (notamment les modèles) ne sont pas encore pleinement achevées. Des efforts d'ampleur seront encore nécessaires ici dans les décennies à venir pour atteindre les objectifs fixés dans le concept des OMN95 (en termes de standards et de tâches). La documentation de l'ensemble des œuvres doit enfin être établie avec soin et tenue à jour. Les concepts, les modèles, les documents et les données doivent être proposés aux utilisateurs sous une forme aisément compréhensible. Ce sont surtout les possibilités de communication modernes qui sont sollicitées ici, via Internet avec les services Web et le géoportail de swisstopo.

La figure suivante fournit une vue d'ensemble schématique des œuvres de la mensuration nationale de 1995. Ses différentes parties sont brièvement décrites dans les sous-chapitres suivants du présent rapport final. Pour des indications et des descriptions détaillées, on se reportera à d'autres publications (cf. § 2.10 resp. annexe 2), notamment aux rapports de la série MN95 «*Berichte aus der L+T*» (jusqu'en 2002) resp. «*swisstopo-Doku*».

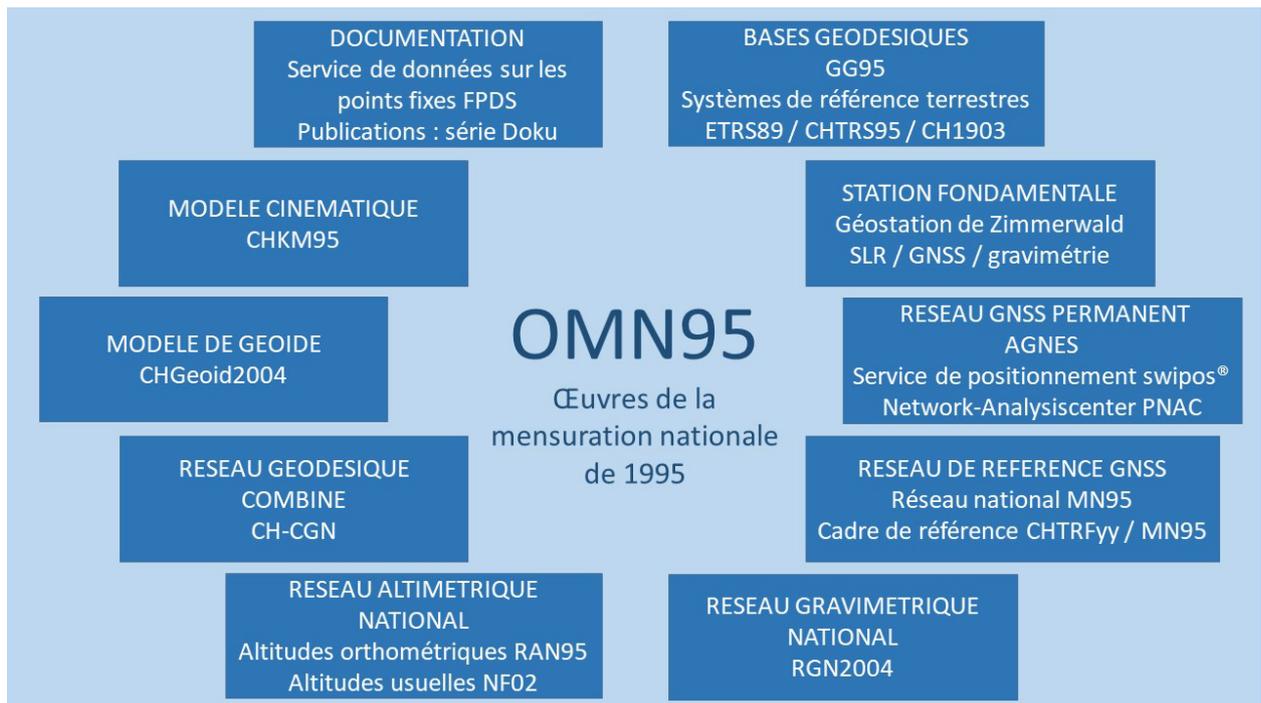


Figure 2-1 : schéma des composantes des œuvres de la mensuration nationale OMN 95

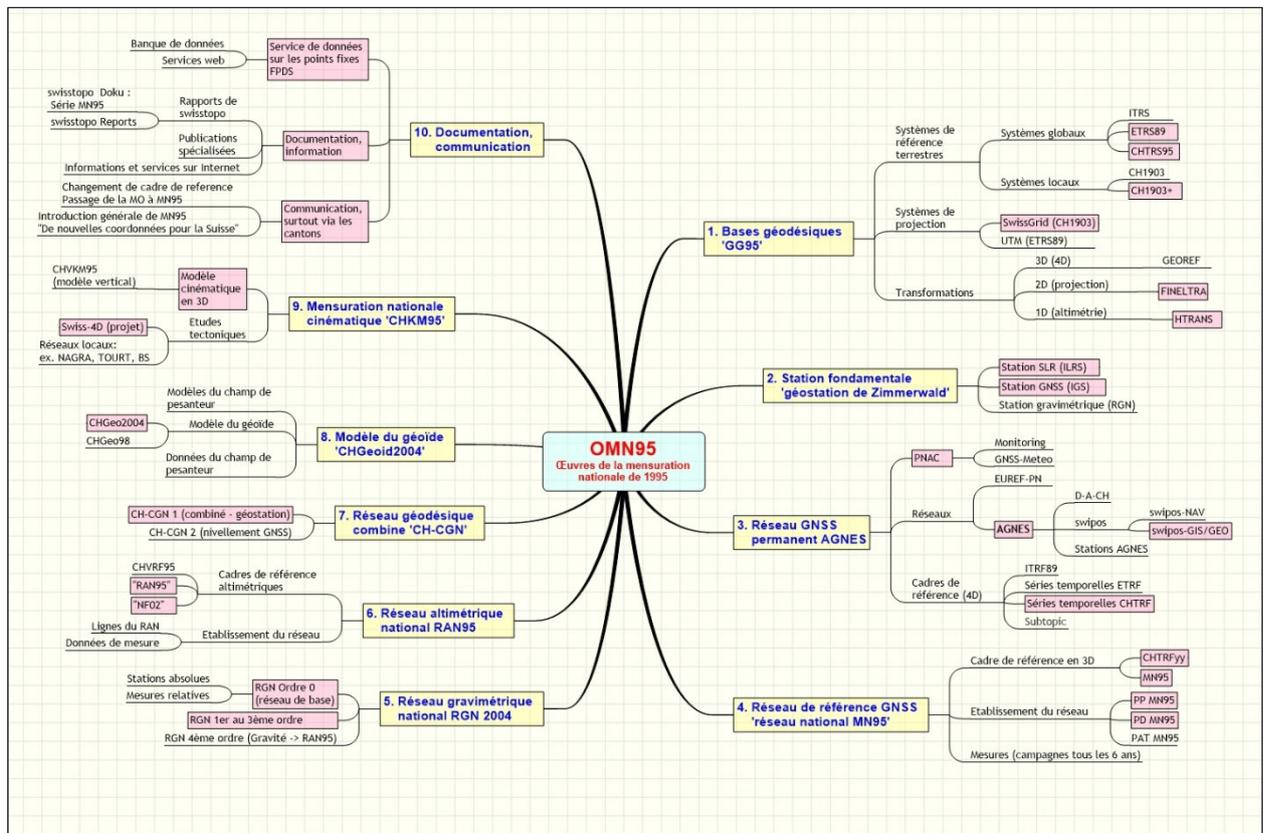


Figure 2-2 : carte heuristique (mindmap) de l'ensemble des composantes des œuvres de la mensuration nationale OMN95 faisant partie de travaux consacrés au projet



Références bibliographiques relatives à la mensuration nationale, notamment aux OMN95 :

Des publications portant sur l'histoire de la mensuration nationale de la Suisse sont regroupées à l'annexe 2, au paragraphe 2.1.1.

Une liste exhaustive d'articles de synthèse consacrés à la mensuration nationale MN95 / aux œuvres de la mensuration nationale OMN95 resp. aux diverses composantes et aux conséquences du projet, principalement publiés dans la revue spécialisée *Mensuration, photogrammétrie, génie rural* resp. *Géomatique Suisse*, figure à l'annexe 2, au paragraphe 2.1.2.

La liste des *Berichte aus der L+T* resp. des *swisstopo-Doku* issus de la série « Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse MN95 » est disponible à l'annexe 2.2.



2.1 Bases géodésiques GG95

2.1.1 Objectif stratégique, concept et contenu

Définir de nouveaux systèmes géodésiques de référence (Terrestrial Reference Systems) pour la Suisse comme fondement de la mise en place d'une Infrastructure nationale de données géographiques (INDG), aptes à satisfaire les exigences de la géomatique et de la navigation modernes ainsi que de la recherche scientifique. Garantir le lien dans le temps et l'espace entre les systèmes nationaux (locaux) en vigueur jusqu'alors et les systèmes globaux. Mise à disposition de modèles géodésiques, de méthodes de transformation et de projections cartographiques adaptés.

La définition des nouveaux systèmes de référence et de leurs paramètres était (et est toujours) une tâche importante à laquelle les responsables de la géodésie et de la mensuration nationale vouèrent une grande partie de leur temps entre 1995 et 2001. Les définitions géodésiques primordiales devaient être consolidées à l'issue du traitement des réseaux de référence GNSS (réseau national GPS). Il s'agissait là de décisions lourdes, figeant pour longtemps la base de toutes les mensurations et ayant de fortes répercussions sur les géodonnées nationales de la Suisse : après une préparation minutieuse, les conséquences pouvant résulter de leur mise en œuvre furent vérifiées. Les bases géodésiques furent élaborées par une commission spécialisée de swisstopo à laquelle W. Gurtner (AIUB) fut invité à participer et le projet fut documenté dans [Berichte aus der L+T n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie].

Les principaux enseignements et conclusions tirés lors de la définition des paramètres de MN95 furent les suivants :

- **Concept du « choix de système dual »** : le concept des systèmes de référence terrestres pour MN95 se fonde sur un choix de systèmes dual, prévoyant la coexistence d'un système local (CH1903+) et d'un système global (CHTRS95). Ces deux systèmes doivent être reliés l'un à l'autre par une transformation simple et régulière. Une translation simple (3 décalages constants) entre les coordonnées géocentriques cartésiennes a donc été définie une fois pour toutes. L'avantage de ce choix, c'est qu'on dispose d'une transformation mathématique simple, faisant intervenir des paramètres constants définis avec exactitude. Elle ne dépend pas de grandeurs mesurées et sa validité n'est pas limitée dans le temps. CHTRS95 étant par ailleurs identique à ETRS89 à l'instant 1993.0, les coordonnées suisses locales de la nouvelle mensuration nationale MN95 (cadre de référence MN95) peuvent être converties simplement dans les cadres européens ETRFyy. Les cadres de référence terrestres sont ici des réalisations plus ou moins parfaites des systèmes de référence, calculées à partir de mesures GNSS réelles. C'est pourquoi il faut compter avec de légères différences (de l'ordre de l'incertitude de mesure, généralement inférieure au centimètre) lors de la comparaison de coordonnées exprimées dans des cadres de référence différents.
- **Points fondamentaux** : l'ancien observatoire astronomique de Berne, en lequel aucune mesure ne peut être effectuée, a fait son temps comme point fondamental de la mensuration nationale. Une nouvelle définition de l'origine à la géostation de Zimmerwald s'impose naturellement, puisqu'il s'agit d'une station de mesure pour un grand nombre de méthodes géodésiques modernes. Le lien entre l'ancien et le nouveau point fondamental peut être établi indirectement avec une grande précision. Les paramètres devraient être définis de telle façon que les modifications pour les utilisateurs de la mensuration nationale soient aussi réduites qu'il est possible.
- **Transformation global-local** : deux liens doivent toujours être établis pour les nouveaux systèmes de référence terrestres nationaux : un lien local vers les systèmes existants (positionnement local) et un lien global (positionnement global) vers les systèmes internationaux et européens. Les passages (transformations) entre systèmes doivent être établis par des relations mathématiques de manière aussi simple et univoque qu'il est possible (au moyen par exemple de translations en 3D simples).
- **Projection cartographique** : les avantages de l'ellipsoïde de référence en vigueur jusqu'alors (Bessel 1841) et de la projection cartographique suisse (projection cylindrique conforme à axe oblique) pour la mensuration doivent être conservés dans la mesure du possible. Les déformations inhérentes à la réduction des mesures géodésiques dans le système de projection étant faibles, les calculs correspondants peuvent être effectués à l'aide de formules et de modules logiciels simples, ayant fait toutes leurs



preuves. Pour bien des applications, les valeurs de ces réductions sont si faibles qu'elles peuvent être négligées en première approximation. C'est pourquoi les dimensions de l'ellipsoïde et la projection cartographique suisse ont été conservés sans changement pour le nouveau système de référence CH1903+ positionné localement.

- **Modèles du champ de pesanteur** : des modèles adaptés du champ de pesanteur (géoïde, etc.) font également partie des bases géodésiques de la nouvelle mensuration nationale. Ils permettent de combiner de manière cohérente les réseaux géodésiques liés au champ de pesanteur (nivellement, etc.) avec les réseaux géométriques spatiaux (réseaux GNSS) (*combined geodetic networks*).
- **Modèles cinématiques** : les données de mesure géodésiques sont non seulement à envisager dans une perspective spatiale tridimensionnelle, mais aussi dans une perspective temporelle. Des modèles cinématiques (champs de vitesses, de contraintes, etc.) sont définis pour procéder à cette description. Il devient ainsi possible de saisir et d'étudier les variations dans le temps de points de certains objets (cinématique de la croûte terrestre superficielle). Cette modélisation permet par ailleurs de traiter ensemble des données de mesure d'époques différentes (traitements en 4D).
- **Passage d'un cadre de référence local à un autre** : les cadres de référence existants de l'ancienne mensuration nationale resteront en usage pendant longtemps encore, notamment dans la MO, après le passage prévu à la nouvelle mensuration nationale. Il est donc important que les utilisateurs disposent de méthodes de transformation adaptées, modélisant les déformations dans les anciens réseaux (en planimétrie et en altimétrie) avec une précision suffisante.

Lorsque le premier projet du rapport [*Berichte aus der L+T* n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie] fut disponible en juin 1995, on décida de le communiquer aux services officiels concernés de la Confédération et des cantons ainsi qu'à divers autres services spécialisés, dans le cadre d'une consultation. Vu la portée et les conséquences financières de la décision pour la MO, le projet fut également soumis au « groupe de travail paritaire MO / MN95 » de la D+M pour avis. De nombreuses suggestions et propositions d'amélioration furent transmises en retour et prises en compte dans les limites du possible. L'introduction du nouveau système de référence (CH1903+), du nouveau cadre de référence (MN95) et la définition des coordonnées de l'origine de la mensuration nationale ($N_0 = 1200 \text{ km} / E_0 = 2600 \text{ km}$) furent finalement entreprises après entente avec la Direction fédérale des mensurations cadastrales (V+D), sous la forme d'une décision de la direction de swisstopo le 16 avril 1996.

Le projet de rapport ne contenait que quelques réflexions de fond pour l'introduction d'un nouveau système altimétrique. Les travaux relatifs à un nouveau système altimétrique et à un cadre de référence altimétrique (réseau altimétrique national RAN95) ne purent être lancés qu'en 1996 du fait des ressources en personnel limitées. Par suite, la publication définitive de [*Berichte aus der L+T* n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie] fut reportée à février 2001, afin de pouvoir rédiger les paragraphes appropriés concernant le cadre de référence altimétrique RAN95 pour établir une documentation complète des systèmes et des cadres de référence terrestres.

Les **bases géodésiques GG95** constituent le thème n°1 des OMN95. En font partie les systèmes de référence terrestres, les systèmes de projection mis en application ainsi que les transformations de données (coordonnées en 2D et en 3D, vitesses et altitudes) entre ces systèmes. Ce thème n°1 ainsi que les sous-thèmes, leur structure et leur délimitation de même que les produits élaborés dans ce cadre sont présentés sur la Figure 2-3.

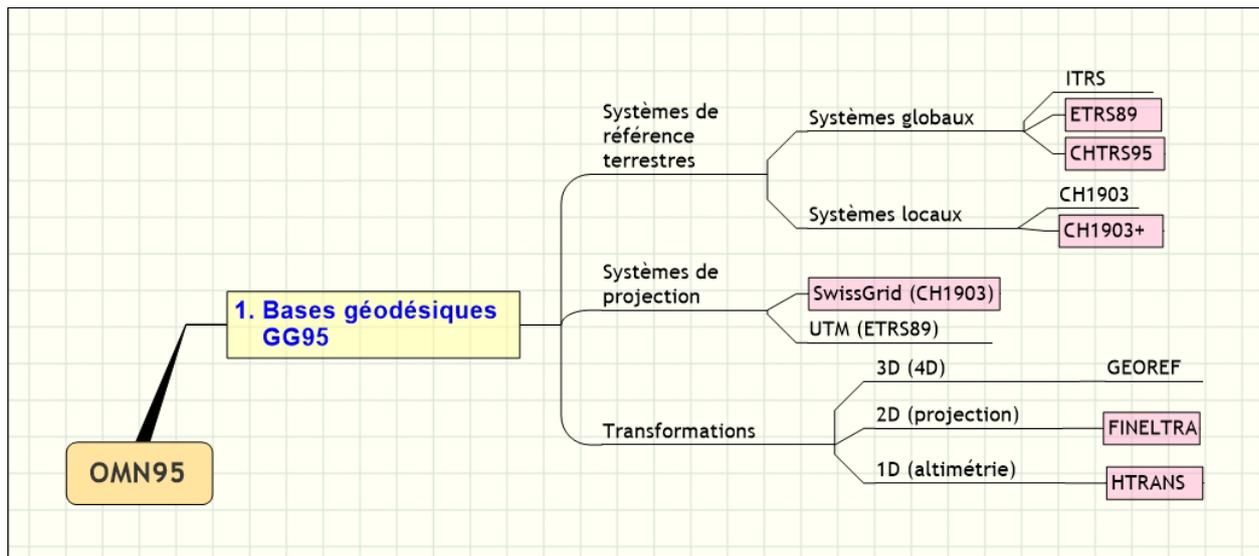


Figure 2-3 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 1 – bases géodésiques ‘GG95’

2.1.2 Systèmes de référence terrestres

2.1.2.1 Systèmes globaux

Le développement des systèmes de référence terrestres pour la nouvelle mensuration MN95 est décrit en détail dans [Berichte aus der L+T n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie]. Les systèmes de référence globaux ITRS et ETRS89 sont prescrits par le Service international de rotation de la Terre (IERS), resp. la sous-commission EUREF de l'Association internationale de géodésie (AIG). Ils jouent tous deux un rôle central lors des traitements GNSS et sont utilisés de manière homogène sur le plan international et à l'échelle européenne. ETRS89 se distingue surtout du système mondial ITRS par les modifications dans le temps dues au déplacement de la plaque tectonique eurasiennne. En utilisant un modèle cinématique de la tectonique des plaques globale, ETRS89 bouge avec l'Europe, de sorte qu'il devient dès lors possible d'envisager ainsi des points fixes (points de référence) au sein du continent. Les coordonnées ETRS89 ne sont pas non plus à considérer comme étant invariantes sur une longue période. Au sud des Alpes notamment et en mer Méditerranée, il faut compter avec des mouvements locaux considérables au sein d'ETRS89. Pour en tenir compte au mieux, les réseaux de référence en Europe (EUREF resp. les densifications nationales) sont remesurés périodiquement et des cadres de référence terrestres ETRF_{yy} rapportés à une époque t donnée sont calculés sur cette base. Du fait des mesures permanentes dans le cadre d'EUREF-PN, des séries temporelles sont générées les concernant, à partir desquelles des vecteurs de vitesses peuvent être calculés en plus des coordonnées en 3D.

Une sélection de rapports techniques resp. de swisstopo Reports, consacrés à la thématique d'EUREF resp. ETRS89, figure à l'annexe 2, au paragraphe 2.3.1.

En raison de la situation tectonique en Suisse, marquée à la fois par l'existence de zones plutôt actives, dans le nord-ouest de la Suisse (fossé rhénan) ou dans l'ouest du Valais par exemple, et par le soulèvement alpin, il est difficile de considérer les coordonnées ETRS89 comme étant constantes sur une période de plusieurs décennies. Les vitesses verticales relatives dans l'espace alpin par rapport à un point de référence sur le Plateau (Mittelland) étant de l'ordre de 1,5 à 2 mm/an (ce que la compensation cinématique du RAN95 permet de garantir), les modifications d'altitudes atteignent le décimètre au bout d'une cinquantaine d'années à peine. C'est pourquoi un concept étendu fut élaboré pour MN95, en vue de la définition d'un système de référence national suisse CHTRS95 (Swiss Terrestrial Reference System 1995). Le système de référence tridimensionnel cartésien CHTRS95 est directement rattaché à ETRS89, les deux systèmes étant identiques par définition à l'instant 1993.0. Toutefois, CHTRS95 contient encore en plus un modèle cinématique CHKM95, décrivant la cinématique régionale en Suisse et à ses alentours. Avec CHTRS95 (et CHKM95), il est donc possible de décrire les variations de la position en 3D de points d'objets



stables sur la croûte terrestre sur plusieurs décennies. L'ellipsoïde de référence GRS80 est utilisé pour CHTRS95. Le point fondamental Z_0 est matérialisé par une cheville à calotte fichée dans les fondations du mât principal GNSS de la géostation de Zimmerwald, ses coordonnées ayant été calculées à partir d'ETRF93 (époque 1993.0).

CHTRS95 est réalisé par le cadre de référence CHTRF95 resp. les cadres suivants CHTRFyy.

A CHTRS95 est aussi associé un système de référence altimétrique global et rigoureux du point de vue de la théorie du potentiel (CHVN95), les valeurs du potentiel à l'origine à Zimmerwald résultant d'un rattachement au REUN /UELN et donc au marégraphe d'Amsterdam.

Des détails concernant la détermination de CHTRS95 et CHVN95 figurent dans [*Berichte aus der L+T n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie ; annexe A3*].

Les swisstopo Reports portant sur les campagnes CHTRF et leurs résultats sont rassemblés à l'annexe 2, au paragraphe 2.3.4 > Campagnes CHTRF. A l'annexe 2 également, au paragraphe 2.3.9, on retrouve les swisstopo Reports consacrés au projet « Swiss4D » resp. « Swiss4D-II », lequel fut lancé dans l'optique de la détermination du modèle cinématique CHKM95 (cf. § 2.9.3).

2.1.2.2 Systèmes locaux

ETRS89 devient un système de référence important en Europe qui trouvera surtout, et de plus en plus, à s'appliquer lorsque l'échange de données de SIG et le traitement de projets dépassent le cadre national. Les systèmes de référence nationaux locaux continueront toutefois à conserver l'importance qu'ils revêtent en pratique pour la mensuration officielle et la saisie des données de SIG.

C'est dans cette optique que GG95 a introduit le concept du choix de système dual avec des systèmes au positionnement global (à l'échelle européenne) et local (au plan national). Les systèmes partenaires sont liés entre eux par une transformation régulière, définie une fois pour toutes.

Le datum géodésique suisse CH1903 et la projection cylindrique conforme à axe oblique associée ayant son point fondamental à Berne, le 'système des coordonnées nationales', ont fait leurs preuves dans la mensuration au quotidien et dans la mensuration officielle. C'est pourquoi le système de référence de la mensuration nationale suisse, au positionnement local, a été conservé. En sa qualité de système de référence local, CH1903+ est défini de telle manière qu'il coïncide de façon approchée (au niveau métrique) avec le système géodésique de référence CH1903, en vigueur jusqu'alors. Le renouvellement vers CH1903+ consiste uniquement en une définition plus moderne des paramètres du datum, les axes de coordonnées dans l'espace (la référence en 3D dans l'espace) des deux systèmes étant déduits de CHTRS95 par trois translations fixes (3 décalages : dX, dY, dZ). Au contraire de CHTRS95, c'est l'ellipsoïde de Bessel de 1841 qui est utilisé pour le système local CH1903+. Le point fondamental est également Z_0 à Zimmerwald, les coordonnées de ce point étant définies de telle façon que l'origine P_0 du système de projection suisse reste quasiment inchangé à l'ancien site (ancien observatoire astronomique de Berne).

CH1903+ est aussi associé à un système altimétrique orthométrique rigoureux dont l'origine est (désormais) à Zimmerwald. L'horizon altimétrique (*vertical datum*) est fixé de telle manière que l'horizon antérieur du nivellement fédéral de 1902 (NF02) résulte de façon approchée de la compensation cinématique du réseau altimétrique national (RAN95) pour l'ancienne origine dans la rade de Genève (Repère Pierre du Niton).

CH1903+ est réalisé par le cadre de référence MN95. Des informations détaillées concernant la définition de CH1903+ et de son système de référence altimétrique figurent dans [*Berichte aus der L+T n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie; annexe A3*].

Aux côtés de CH1903+, le datum géodésique (et système de référence) CH1903 en vigueur jusqu'alors, dont le point fondamental P_0 se trouve à l'ancien observatoire astronomique de Berne, continuera à être utilisé pour un certain temps encore, avec un positionnement légèrement différent de l'ellipsoïde, mais avec les mêmes dimensions pour ce dernier (Bessel 1841), le même système de projection et le même cadre de référence (MN03).



2.1.3 Systèmes de projection

La **projection nationale suisse** est la « projection cylindrique conforme à axe oblique » avec l'axe de rotation dans le plan méridien, le grand cercle (cercle de tangence) passant par le point fondamental P_0 à l'ancien observatoire astronomique de Berne. Le datum géodésique (CH1903) a été introduit en 1903 par M. Rosenmund dans la mensuration nationale suisse de 1903 (MN03). C'est sur cette base et en utilisant l'ellipsoïde de Bessel de 1841 pour la projection qu'a été défini le système des coordonnées nationales de la Suisse dont l'origine se trouve à l'ancien point fondamental P_0 à l'ancien observatoire astronomique de Berne avec les valeurs $y = 600\,000$ m et $x = 200\,000$ m. Une description détaillée de cette projection cartographique, aussi appelée « Swiss Grid » en navigation GPS, complétée par des exemples de calcul figure dans [Berichte aus der L+T n° 8f – MN95 - 3^{ème} partie ; annexe A6].

La projection nationale suisse, avec ses très faibles déformations sur le territoire national, a fait toutes ses preuves pour tous les travaux en pratique, notamment dans le cadre de la mensuration officielle. C'est pourquoi il tombait sous le sens de la réutiliser pour la nouvelle mensuration nationale MN95 sur la base du système de référence CH1903+. Attention : cette projection ne peut être utilisée de manière judicieuse qu'en combinaison avec l'ellipsoïde de Bessel.

Pour les travaux de mensuration en pratique dans le système de référence européen ETRS89 et dans le système global de la Suisse CHTRS95, c'est la projection de Mercator transverse universelle (UTM), utilisable dans le monde entier, qui est mise en œuvre. Les coordonnées UTM en CHTRS95 sont comparables à celles en ETRS89 en première approximation (à quelques centimètres près) et peuvent être échangées dans toute l'Europe.

2.1.4 Transformations

2.1.4.1 Transformations en 3D

Pour la transformation en 3D de jeux de coordonnées géocentriques en 3D, on utilise généralement une transformation spatiale à sept paramètres en géodésie a) avec rotation autour de l'origine des coordonnées (modèle Bursa-Wolf) ou b) autour du barycentre des points de calage (modèle Molodensky-Badekas).

Une translation simple avec trois décalages est suffisante pour la transformation de coordonnées globales (ETRS89 ou CHTRS95) en coordonnées locales (CH1903+) sur la base de GG95 :

$$X_{(CH1903+)} = X_{(CHTRS95)} - 674,374 \text{ m}$$

$$Y_{(CH1903+)} = Y_{(CHTRS95)} - 15,056 \text{ m}$$

$$Z_{(CH1903+)} = Z_{(CHTRS95)} - 405,346 \text{ m}$$

Dans la plupart des cas, il faut encore procéder ensuite aux transformations standard des coordonnées cartésiennes géocentriques en coordonnées géodésiques sur l'ellipsoïde et enfin dans la projection cartographique.

2.1.4.2 Transformations en 2D (projection) ; FINELTRA

La mise à disposition d'une transformation adaptée entre les cadres de référence MN03 et MN95 est d'une importance décisive pour la mise en œuvre en pratique du changement prévu de système de référence dans la mensuration officielle (mais aussi partout où les géodonnées de base trouvent à s'appliquer). C'est pourquoi de gros efforts furent déployés en collaboration avec la D+M (projet DG/MN95) pour pouvoir proposer une solution logicielle appropriée pour la transformation.

C'est dans le cadre d'un mandat de recherche confié à l'IGP ETHZ (prof. A. Carosio) qu'une solution parfaitement adaptée au problème fut développée sous le nom de FINELTRA. Il s'agit d'une transformation linéaire avec des éléments finis. La zone de transformation est subdivisée pour cela en triangles dont les sommets sont les points de calage de la transformation (points d'appui de la transformation PAT). Les coordonnées des PAT sont aussi bien connues en MN03 qu'en MN95. La transformation au sein des triangles est linéaire, c.-à-d. affine.



Du point de vue mathématique, FINELTRA est continue et bijective. En d'autres termes, la transformation est réversible. On retrouve donc les mêmes coordonnées après plusieurs allers-retours de transformation (MN03 <-> MN95) et les différences entre coordonnées restent identiques aux PAT (aucun lissage). Le calcul est très simple et ne requiert pas une puissance de calcul très importante. La transformation n'est toutefois pas conforme, de sorte que les formes géométriques et les séries de directions s'en trouvent légèrement altérées. La méthode présente en revanche des avantages en termes d'organisation. La modification des paramètres (PAT) dans une zone est sans conséquence sur la transformation dans d'autres secteurs, si bien qu'il est aisément possible, au besoin, de subdiviser plus finement une grille en y introduisant de nouveaux triangles, sans toucher aux triangles existants. Cela permet un traitement séquentiel de la transformation à l'échelle de la Suisse entière.

Un premier jeu de données de transformation pour FINELTRA fut calculé en 1995. C'est le réseau de référence GNSS MN95 qui sert de base, de même que la compensation de diagnostic de la triangulation de 1^{er} et 2^{ème} ordre (cf. § 1.2). Le jeu de données DIA95 résulta d'une nouvelle compensation du réseau de diagnostic dans le cadre de référence MN95.

2.1.4.3 Transformations en 1D (altimétrie) ; HTRANS

Le besoin en méthodes de transformation est tout aussi pressant pour les cadres de référence altimétrique que pour les coordonnées planimétriques. Toutefois, la situation initiale est encore un peu plus complexe ici. Pour la détermination d'altitudes par GNSS, il faut en effet passer des coordonnées cartésiennes géocentriques (MN95) aux altitudes ellipsoïdales puis aux altitudes orthométriques (RAN95), après correction de la cote du géoïde (CHGeo2004). Et pour en arriver finalement dans le cadre des altitudes usuelles continuant à être utilisé pour la mensuration officielle (NF02), il faut procéder à une autre transformation plutôt complexe (HTRANS).

2.1.5 Etat actuel et développements futurs possibles

En termes de définition du système, on peut considérer les travaux dans le domaine partiel GG95 comme étant achevés. C'est en lien avec les nouvelles applications et les nouveaux services GNSS qu'un besoin se fait grandissant, celui de mieux connaître les transformations (resp. de disposer d'une meilleure documentation à leur sujet) entre CHTRS95 et les systèmes de référence globaux et continentaux (ITRS, WGS-84, ETRS, etc.).

Ces relations sont au premier plan aujourd'hui, alors que les transformations dans les systèmes des pays voisins revêtaient plutôt de l'importance par le passé.

Il convient par ailleurs de suivre les développements en matière de définition de systèmes de référence hors de notre domaine de spécialité. Des exemples connus sont what3words, GeoHash ou Open Location Code. Dans le sillage de la « démocratisation du positionnement et de la navigation », de tels systèmes ont de plus en plus les faveurs du grand public.

Tableau 2-1 : bases géodésique GG95 : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Les nouveaux systèmes de référence sont documentés, introduits et ont fait leurs preuves.• Les méthodes de transformation en planimétrie et en altimétrie sont disponibles. Programmes et services Web (transformation de coordonnées, calcul du géoïde, etc.) sont disponibles et conformes aux besoins de la clientèle.• Les modules de transformation sont aussi proposés pour être intégrés dans des SIG.	<ul style="list-style-type: none">• Accroître la notoriété d'ITRSxx / ETRS89 et UTM sur ETRS89 resp. CHTRS95 pour des applications dépassant le cadre national (par exemple des projets ferroviaires, des services de positionnement européens, etc.).• Suivre les développements en matière de <i>Spatial Reference Systems</i> et de projections cartographiques hors de notre domaine de spécialité (→ géolocalisation).



2.2 Station fondamentale géostation de Zimmerwald

2.2.1 Objectif stratégique, concept et contenu

Le lien entre le nouveau point fondamental de la mensuration nationale suisse et les systèmes de référence terrestres globaux est établi, surveillé en continu et garanti dans le temps et l'espace par l'intermédiaire d'un service d'observation GNSS et SLR permanent, resp. régulier à la géostation de Zimmerwald. La participation active à des projets de recherche internationaux en géodésie dans le domaine de la mesure de la Terre par les moyens les plus modernes s'effectue en collaboration avec l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne et d'autres partenaires. Les mesures géodésiques de la géostation fournissent une contribution scientifique importante à l'étude de la géodynamique globale (tectonique des plaques continentales) et du champ de pesanteur terrestre.

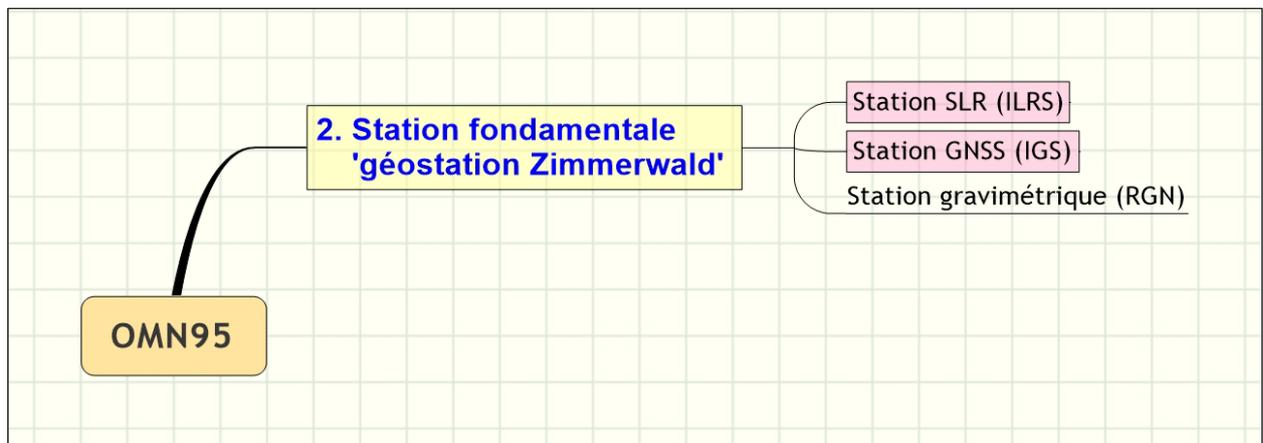


Figure 2-4 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 2 – station fondamentale 'géostation de Zimmerwald'

Une grande importance est accordée à la géostation de Zimmerwald dans le concept des bases géodésiques GG95. Elle constitue la réalisation physique du point fondamental géométrique Z_0 de la mensuration nationale moderne (cf. § 2.1). La définition des systèmes de référence terrestres locaux (ou du datum géodésique) se fonde sur ce point. Cela concerne aussi bien la définition géométrique des systèmes de référence en 3D CHTRS95 et CH1903+ que la fixation du système de référence altimétrique CHVN95 par rapport au géoïde et au champ de pesanteur. Le modèle cinématique CHKM95 est enfin positionné en ce point via la définition du vecteur des vitesses en 3D. Ce concept résulte du constat suivant : en procédant ainsi, le potentiel conséquent des moyens de mesure géodésiques concentrés à la géostation peut être utilisé directement et donc de manière optimale pour réaliser le cadre de référence local de la mensuration nationale.



Figure 2-5 : géostation de Zimmerwald ; ancienne coupole astronomique, mâts GNSS (au milieu), coupole SLR (à droite) et nouvelles coupoles CCD à l'arrière-plan.

La géostation de Zimmerwald (alors observatoire astronomique) a été créée et mise en place en 1956/1957 par l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB) placé sous la direction du professeur Dr M. Schürer [*Berichte aus der L+T* Nr. 7 – LV95 – Teil 2, *non traduit*]. L'observatoire astronomique n'a cessé de se développer et de s'étendre au fil du temps. Depuis les débuts de la géodésie par satellites dans les années 1960, la station a progressivement évolué vers une station d'observation des satellites, tant et si bien qu'elle fait aujourd'hui partie des stations de référence géodésiques les plus importantes au monde.

Avec ses observations, la géostation de Zimmerwald prend régulièrement part, en s'inscrivant généralement dans la durée, à des projets de recherche internationaux et à des campagnes d'observation géodésiques. Elle constitue notamment une station de référence ('*fiducial station*' resp. '*core station*') des réseaux de référence géodésiques internationaux de l'ILRS (International Laser Ranging Service), de l'IGS (International GNSS Service) et du réseau permanent EUREF-PN. Zimmerwald est par ailleurs exploitée comme une station ECGN (European Combined Geodetic Network). Et via la diffusion des résultats de mesure aux « services », la géostation de Zimmerwald participe également à GGOS (Global Geodetic Observing System), système d'observation de l'Association internationale de géodésie (IAG). GGOS représente à son tour l'IAG au sein de GEO (Group on Earth Observation) et constitue la contribution de l'IAG à GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).

La géostation de Zimmerwald, avec son service SLR et sa station permanente GNSS, a fait l'objet d'une documentation détaillée (en allemand) dans la deuxième partie des rapports consacrés à la définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse [*Berichte aus der L+T* Nr. 7 – LV95 – Teil 2, *non traduit*]. A l'occasion de son jubilé (« Les 50 ans de l'observatoire astronomique de Zimmerwald »), elle eut également droit à un article complet dans « *UniPress* », la publication consacrée à la recherche et à la science au sein de l'Université de Berne (n° 130, septembre 2006).

La géostation a connu plusieurs extensions au cours des trente dernières années et a été développée pour pouvoir prendre en charge de nouvelles méthodes d'observation. La cave gravimétrique fut ainsi construite en 1995 et comporte deux pièces bien à l'abri des vibrations. Trois plateformes stables en béton ont été aménagées à la cave et différents appareils de mesure peuvent y être installés. Depuis 1995, un gravimètre LaCoste&Romberg ET25 y est en service permanent pour observer les marées terrestres, dans le cadre d'une collaboration étroite entre l'AIUB, le 'laboratoire de géodésie et de géodynamique' (GGL) de l'IGP/ETH Zurich et l'Office fédéral de topographie swisstopo (cf. § 2.2.4). L'initiative pour ces observations permanentes date du projet de réseau géodésique combiné « CH-CGN » (cf. § 2.7). Le 7 octobre 1997, la pesanteur absolue fut mesurée pour la toute première fois dans la cave gravimétrique, par l'Istituto di Metrologia 'G. Colonnetti' (IMGC). La baie (rack) abritant les équipements et les récepteurs GNSS de la station AGNES de Zimmerwald, exploitée par swisstopo, se trouve dans la même pièce en sous-sol. Le



télescope laser et le service de poursuite (tracking) GNSS sont continuellement adaptés à l'évolution technique.

En 2006, un bâtiment annexe est venu agrandir l'observatoire astronomique de Zimmerwald (<https://wbar-chitekten.ch/architektur/universitaet-bern-neubau-sternwarte-zimmerwald>), servant entre autres aux installations de mesure de l'Institut de physique appliquée (IAP) de l'Université de Berne. En 2018, deux bâtiments indépendants supplémentaires, à dômes (pour l'observation, télescopes CCD notamment), furent mis en service. Ils servent surtout à la recherche optique, à l'observation et au catalogage de satellites désactivés et d'autres débris spatiaux (« *space debris* »). En outre, l'ancien télescope astronomique datant des premiers temps de la station a cédé sa place à un nouveau télescope multifonction (ZimMAIN = Zimmerwald Multiple Applications Instrument), pouvant aussi bien servir à la recherche de débris spatiaux qu'aux

observations astronomiques. Ce sont donc cinq télescopes qui sont en service au total aujourd'hui et du fait des nouvelles applications, la désignation officielle de la station est désormais « Swiss Optical Ground Station and Geodynamics Observatory Zimmerwald ».

La géostation de Zimmerwald revêtant une grande importance pour la mensuration nationale, swisstopo a signé un contrat avec l'AIUB pour gérer à la fois son extension et son exploitation conjointe. Si en 1993, le nouveau télescope laser et astronomique (ZIMLAT) avait déjà bénéficié d'un financement tripartite (Université de Berne / Fonds national suisse / swisstopo), c'est un contrat-cadre qui fut conclu en octobre/novembre 1995 pour régir la collaboration entre swisstopo (représentant la Confédération, resp. le DMF/DDPS) et l'AIUB (représentant le canton de Berne resp. l'Université de Berne). Il constitue la base légale visant à assurer une « collaboration à long terme, profitable aux deux parties, entre swisstopo et l'AIUB dans le domaine de la géodésie par satellites et de l'astronomie moderne ». Le contrat portait notamment (et porte toujours du reste) sur « les interventions du personnel, les droits des deux parties à utiliser les locaux, l'appareillage et les installations, les prestations de services et les conseils ainsi que l'échange de données de mesure et les résultats de recherche ». Les détails relatifs aux formes de collaboration concrètes dans le cadre de projets communs sont réglés dans des annexes. L'annexe 1, le contrat ayant trait à l'utilisation de la géostation de Zimmerwald et à la collaboration la concernant, régir la collaboration entre swisstopo et l'AIUB en matière d'instrumentation, de locaux et d'infrastructures pour l'exploitation du système laser (SLR) et de la station GPS/GNSS permanente. S'agissant du système laser, l'AIUB est compétent pour l'entretien et swisstopo pour la partie observation de son exploitation. Les opérateurs sont des membres du personnel de swisstopo ou des auxiliaires (des étudiants). Les stations permanentes GPS/GNSS sont financées, installées et exploitées en toute indépendance par swisstopo. Seul le droit d'utilisation des locaux est ici régi par le contrat. Une seconde annexe régir la collaboration entre swisstopo et l'AIUB dans le cadre du Center for Orbit Determination in Europe (CODE), lequel revêt une grande importance pour swisstopo tant pour le traitement que pour le positionnement des mesures GPS/GNSS.

Avec ses observations, la géostation de Zimmerwald prend régulièrement part à des projets de recherche internationaux, en s'inscrivant généralement dans la durée. La station est notamment une station permanente (*fiducial station*) de l'ILRS (International Laser Ranging Service), de l'IGS (International GNSS Service for Geodynamics) et de l'EPN (European Permanent Network). Zimmerwald est par ailleurs une station de l'ECGN (European Combined Geodetic Network). Et via la diffusion des résultats de mesure aux « services », la géostation de Zimmerwald participe également à GGOS (Global Geodetic Observing System), système d'observation de l'Association internationale de géodésie (AIG). GGOS représente à son tour l'AIG au sein de GEO (Group on Earth Observation) et constitue la contribution de l'AIG à GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).

Les mesures réalisées à la géostation de Zimmerwald permettent aussi de garantir et de surveiller en continu le lien géodésique entre le point fondamental de la mensuration nationale suisse et les systèmes de référence globaux internationaux.

La précision des méthodes d'observation géodésiques modernes étant du même ordre de grandeur (de niveau millimétrique) que les mouvements annuels des points d'origine tectonique, les vitesses (c.-à-d. les modifications de coordonnées par unité de temps) doivent également être déterminées en plus des coordonnées des stations.



Les méthodes de mesure principales représentées à Zimmerwald sont les suivantes :

- Satellite Laser Ranging (SLR) : mesures de distance par laser (depuis Zimmerwald et d'autres stations) vers des satellites, à partir desquelles les orbites des satellites et la position de la station sont déterminées dans un système de coordonnées géocentriques en 3D. La précision de mesure élevée (quelques millimètres) permet de déterminer la position avec une précision similaire.
- Une station GPS permanente est exploitée à Zimmerwald depuis 1992 et depuis 1999, l'observation est étendue aux satellites GLONASS. En 2007, un récepteur combiné GPS/GLONASS (GNSS) a été mis en service sur une seconde station. Ces récepteurs GNSS sont aussi des stations AGNES.
- Au moyen de caméras CCD montées sur le télescope SLR, l'AIUB effectue des observations astrométriques vers des astéroïdes, des satellites et des débris spatiaux proches de la Terre.
- Depuis 1995, le laboratoire de géodésie et de géodynamique (GGL) de l'ETH Zurich exploite un gravimètre LaCoste&Romberg ET-25 en partenariat avec swisstopo pour observer les marées terrestres.
- Deux fois par an, l'Institut fédéral de métrologie (METAS) effectue des mesures gravimétriques absolues en collaboration avec swisstopo à l'aide d'un gravimètre FG5.
- Le recours à d'autres méthodes de mesure a notamment été rendu possible par la construction d'une extension de l'Institut de physique appliquée de l'Université de Berne, où des appareils tels que des radiomètres à vapeur d'eau et des spectromètres solaires ont été installés.
- Les points géodésiques de référence et les repères de mesure locaux sont régulièrement surveillés par swisstopo à l'aide d'une mensuration terrestre (*micro geodetic network*).

Les principales méthodes de mesure représentées à Zimmerwald – SLR, GNSS et gravimétrie – vont être exposées plus en détail dans la suite.

2.2.2 Télémétrie laser sur satellites (SLR, Satellite Laser Ranging)

A la géostation de Zimmerwald, les mesures SLR sont effectuées avec le télescope ZIMLAT (= Zimmerwald Laser and Astrometry Telescope), en service depuis le 26 juin 1997 après plus de deux ans de construction. Ce télescope d'un mètre joue un double rôle : service moderne de mesure de distances par laser vers les satellites (SLR) et télescope astronomique pour déterminer surtout, à l'aide de caméras numériques (CCD), les positions et les luminosités d'objets de tous ordres proches de la Terre, notamment des débris spatiaux. L'exécution des mesures est largement automatisée, mais elle reste cependant placée sous la surveillance d'un opérateur. Les opérateurs sont tous des membres du personnel de l'AIUB et de swisstopo.



Figure 2-6 : télescope ZIMLAT

Le laser utilisé est de type titane-saphir à deux longueurs d'onde (bleu 423 nm et infrarouge 846 nm). La précision d'une mesure isolée va de quelques millimètres à quelques centimètres. Les mesures sont réalisées vers un grand nombre de satellites différents. Les classes principales englobent les satellites géodynamiques (ex. : LAGEOS), les satellites environnementaux (ex. : Envisat) et les satellites de navigation (ex. : GLONASS). Des distances vers plus de 70 satellites sont mesurées aujourd'hui.

La statistique globale du nombre d'observations des différentes stations SLR montre bien à quel point les mesures SLR exécutées à Zimmerwald sont fiables et stables. Si la station SLR de Yaragadee (Australie) domine le classement et distance largement ses poursuivantes, celle de Zimmerwald figure tous les ans à la deuxième ou à la troisième place. Il s'agit d'une performance remarquable, compte tenu des conditions climatiques régnant à Zimmerwald et à Yaragadee, en plein désert australien.



Zimmerwald SLR station as World's top class in week 13/2021

The Satellite Laser Ranging (SLR) Station of the Swiss Optical Ground Station and Geodynamics Observatory Zimmerwald operated by the Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB) was the most successful station worldwide in week 13 of this year. From March 28 to April 3 this SLR station No. 7810 of the International Laser Ranging Service (ILRS) was able to observe almost 400 passes of Low Earth Orbiters (LEOs), about 50 passes of the geodynamics satellites LAGEOS-1 and LAGEOS-2, and about 300 passes of High Earth Orbiters (HEOs) of the GNSS (Global Navigation Satellite System) like Galileo, Glonass, Etalon, Compass, or BeiDou satellites. This result confirms Zimmerwald's foremost position as the most productive SLR station in the northern hemisphere. This success is only possible thanks to the high degree of automatization and due to the fact that Zimmerwald Observatory is operating 24/7 all the year including holidays as Easter and Christmas.

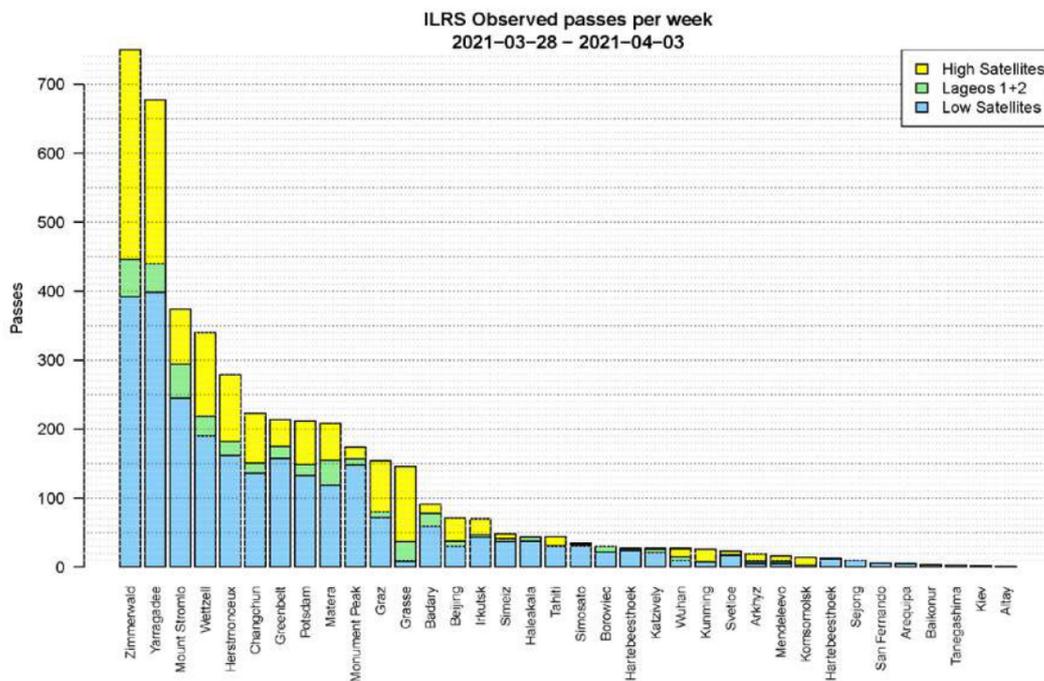


Figure 2-7 : classement des stations SLR au printemps 2021

Les données de mesure sont finalement transmises aux centres d'EUROLAS (= partie européenne du réseau global des stations SLR) et de l'ILRS (International Laser Ranging Service). Ces centres sont chargés de vérifier la qualité des données SLR reçues (retours renvoyés aux stations SLR compris) et d'archiver les données.

L'ILRS est de son côté un « centre technique » de l'IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) qui met les données SLR à disposition pour le calcul du cadre de référence global ITRF (= International Terrestrial Reference Frame).



2.2.3 Systèmes mondiaux de navigation par satellites (GNSS)

Un récepteur GPS était déjà en exploitation semi-permanente en 1989 à la géostation de Zimmerwald durant la campagne EUREF89 qui fut la première campagne de mesures GPS paneuropéenne. C'est en 1992 que l'exploitation d'un récepteur GPS devint permanente à Zimmerwald.



Figure 2-8 : mâts GNSS (ZIMM et ZIM2) [photos A. Wiget]

La première antenne GPS permanente fut montée sur un mât en acier haut de neuf mètres, afin de bénéficier d'un horizon aussi dégagé que possible (et de surplomber les coupoles entourant l'antenne de toutes parts). Ce concept fut aussi repris ultérieurement pour différentes stations du réseau GNSS automatique suisse (AGNES).

Avec l'intégration de GLONASS à AGNES en 2007, une station double fut également mise en place à Zimmerwald, une nouvelle antenne choke-ring multi-GNSS étant installée sur un deuxième mât (ZIM2).

Un splitter d'antenne a été installé à la nouvelle station, si bien que deux récepteurs sont exploités simultanément avec la même antenne GNSS. Actuellement, quatre récepteurs GNSS (ZIMM / ZIM2 / ZIM3 / ZIMJ) sont en service à Zimmerwald, en combinaison avec un récepteur test de l'AIUB.

La stabilité des mâts des antennes est vérifiée annuellement à l'aide de mesures terrestres (plombage). Aucun mouvement local significatif n'a pu être décelé jusqu'à présent.

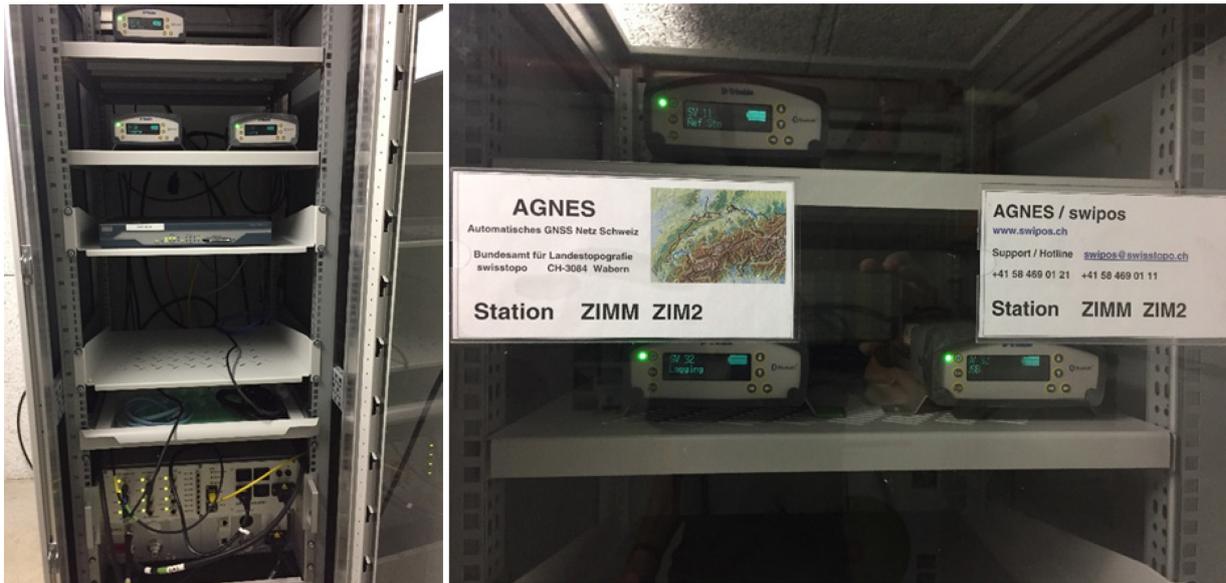


Figure 2-9 : récepteurs GNSS AGNES (baie/rack) et vue de détail des récepteurs GNSS ZIMM et ZIM2

Les données des stations permanentes ZIMM, ZIM2, ZIM3 et ZIMJ (jusqu'à l'automne 2020) viennent alimenter les réseaux de données internationaux avec une grande stabilité, où elles sont disponibles pour un large éventail d'applications au niveau global, européen et national :

- **IGS - International GNSS Service**

La géostation de Zimmerwald est une station de référence importante d'IGS/ITRS depuis 1992 (année de création de l'IGS). En sa qualité de station du *core network* (« very-high-performance stations, operating with a high degree for reliability ») resp. en tant que *fiducial site* (« where geodetic and, if feasible, geophysical measurements are made, continuously or periodically, meeting standards and specifications established for highly precise data »), la station satisfait des exigences particulières en termes de stabilité, de qualité des coordonnées de référence et de données de mesure¹. Les données des stations IGS sont enregistrées dans différents centres de données et sont traitées par plus de 30 centres d'analyse (Analysis Centers) à l'échelle mondiale. Le CODE (Center for Orbit Determination in Europe) est l'un de ces centres. Il est hébergé par l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB) et swisstopo en est partie prenante.

- En tant que station de l'**EPN (European Permanent Network)**.
- En tant que station du **réseau GPS/GNSS automatique suisse (AGNES)**.

2.2.4 Station gravimétrique (ECGN / RGN)

Depuis octobre 1995, un gravimètre LaCoste&Romberg ET25 est exploité par l'ETH Zurich dans la cave gravimétrique de Zimmerwald pour observer les marées terrestres, swisstopo étant chargé de veiller sur cet instrument. Ce gravimètre relatif mesure une valeur gravimétrique chaque seconde. Le PC auquel il est relié (fonctionnant actuellement sous Windows NT4.0) enregistre une valeur moyenne par minute. Le système est piloté par le logiciel installé LabView.

Deux objectifs sont assignés à ce gravimètre : contribuer en premier lieu à la détermination de l'influence des marées (Tide Models) pour la correction des gravimètres de terrain / de laboratoire et permettre ensuite – en lien avec les observations SLR et GPS – l'acquisition d'informations portant sur les paramètres d'élasticité de la croûte terrestre. Bien évidemment, le gravimètre ET25 participe également au suivi dans le temps des valeurs gravimétriques à Zimmerwald, conformément aux exigences d'ECGN.

¹ Définitions selon les National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 1991. International Network of Global Fiducial Stations: Science and Implementation Issues. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1855>.



La précision de l'ET25 est de l'ordre de 1 μ Gal et sa dérive (drift) est inférieure à 0,5 mGal par mois (indications du constructeur). Outre la valeur gravimétrique et l'heure, les valeurs de la nivelle, la pression ambiante et dans le gravimètre ainsi que la température et l'humidité ambiantes sont aussi enregistrées. La température interne du gravimètre est maintenue constante à 48,8°C.

Depuis le départ à la retraite du professeur E. Klingelé, c'est swisstopo qui se charge de la maintenance générale de l'ET25. Cette tâche englobe la sauvegarde des données, le contrôle du fonctionnement correct de l'appareil et la correction de l'heure et des nivelles. Les données sont transmises au GGL de l'ETH Zurich pour y poursuivre leur traitement (analyses (screening, sampling), prétraitement). Les fichiers mensuels réduits à une résolution de 10 minutes sont ensuite envoyés aux centres de données européens pour y être traités et intégrés à la modélisation des marées.

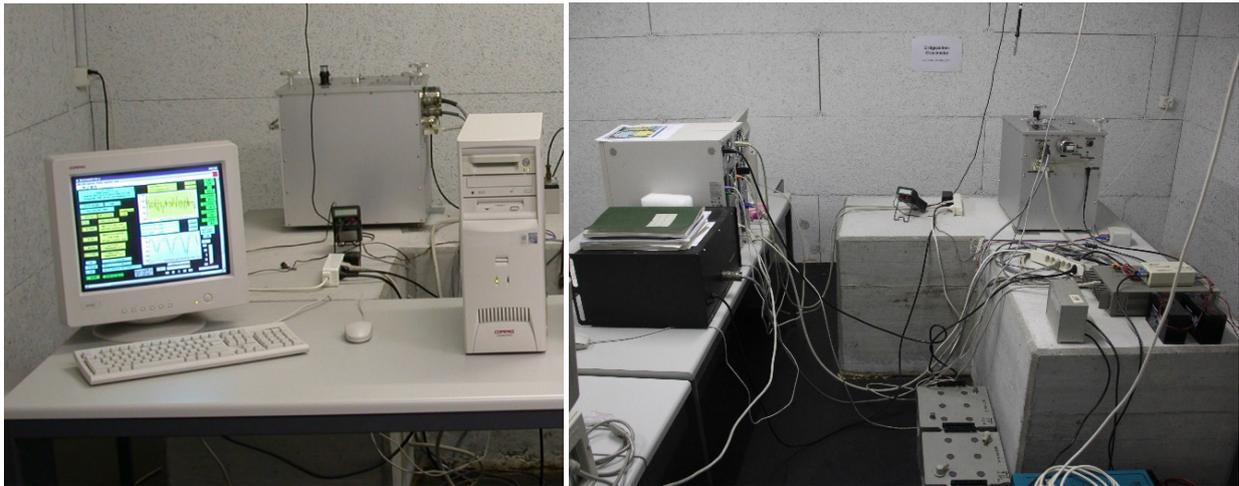


Figure 2-10 : géostation de Zimmerwald: station gravimétrique avec gravimètre ET25

Une fois par an au moins, l'Institut fédéral de métrologie (METAS) effectue des mesures gravimétriques absolues à Zimmerwald avec un gravimètre FG5, en partenariat avec swisstopo.

2.2.5 Etat actuel et développements futurs

Tableau 2-2 : station fondamentale : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• La contribution de la géostation de Zimmerwald est essentielle dans le cadre de la collaboration internationale (ILRS, EUROLAS, IERS), grâce à la productivité élevée du service SLR.• La station GNSS à Zimmerwald capte en permanence les signaux des principaux satellites GNSS et fournit les données aux réseaux de services GNSS dans le monde entier (IGS, EUREF-PN, AGNES, etc.).• Grâce aux mesures gravimétriques absolues régulièrement effectuées, à l'exploitation permanente d'un gravimètre pour l'observation des marées terrestres et à des mesures gravimétriques relatives par rapport à la station absolue de METAS, la station gravimétrique de Zimmerwald est intégrée au niveau mondial et constitue une 'Core Station' du projet européen ECGN.	<ul style="list-style-type: none">• Poursuite des mesures SLR de qualité élevée dans le cadre de coopérations et de réseaux / services internationaux.• Poursuite des mesures GNSS dans le cadre des réseaux et des services GNSS dans le monde entier et en tant que station de référence AGNES.• Poursuite des mesures gravimétriques absolues répétées en collaboration avec METAS.• Poursuite des mesures gravimétriques relatives régulières (rattachement à la station de METAS et au sein du RGN2004).• Nouvelle répétition du nivellement Berne-Zimmerwald.• Poursuite de la collocation d'autres mesures géodésiques au point fondamental.



- Exécution réussie d'autres mesures géodésiques : observations astronomiques pour la détermination de déviations de la verticale (caméra zénithale), nivellements réguliers (rattachement à RAN95), mesures par radiomètre à vapeur d'eau, etc. dans le cadre du projet CH-CGN.

- Renouvellement permanent et modernisation des instruments, des installations, de l'infrastructure et du système laser.

Références bibliographiques relatives à 2.2 :

Les swisstopo Reports concernant la station fondamentale resp. la géostation de Zimmerwald sont répertoriés à l'annexe 2.3.2.



2.3 Réseau GNSS permanent AGNES et service de positionnement swipos

2.3.1 Objectif stratégique, concept et contenu

Création et exploitation d'un 'réseau GNSS automatique suisse (AGNES)' se composant d'une constellation de stations GNSS permanentes réparties de manière à couvrir l'intégralité du territoire national. AGNES (système et établissement du réseau) sert à atteindre les objectifs suivants :

- a) réaliser les systèmes de référence (CHTRS95 resp. CH1903+) en temps réel, en les liant activement à la surface terrestre
- b) constituer la base de l'exploitation de services de positionnement de précisions différentes et de leur contrôle
- c) permettre la saisie de la cinématique de la croûte terrestre superficielle afin de servir de base de référence aux réseaux de déformation locaux (surveillance / monitoring)
- d) permettre la saisie de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère (GNSS météo, GNSS tomographique) au service de la prévision météorologique.

Exploitation d'un centre d'analyse permanent (PNAC) auquel les objectifs suivants sont assignés :

- a) traitement quotidien d'une partie du réseau permanent européen EUREF-PN dans le cadre de la collaboration internationale
- b) surveillance (monitoring) en continu du réseau AGNES et donc du cadre de référence par le traitement permanent des mesures GNSS
- c) calcul toutes les heures des 'zenith path delays' de l'atmosphère à partir des données GNSS d'un réseau européen en vue de leur utilisation par MétéoSuisse pour calculer des modèles de prévision météorologique.

Exploitation d'un service de navigation et de positionnement GPS couvrant tout le pays, sur la base d'AGNES, pour différentes applications et classes de précision (nom de marque swipos).

La direction de swisstopo introduisit le but suivant dans sa **stratégie 2020** : « swisstopo étend ses compétences et ses capacités dans le domaine du positionnement et de la localisation ». On décida ce qui suit au titre de la mesure A3.1 :

- swisstopo évalue le potentiel présent et à venir d'un large éventail de méthodes de géolocalisation (ex. : GNSS, PPP-RTK, GSM, Wi-Fi, IP, RFID, Bluetooth, ultrasons, pseudolites, navigation en intérieur) ;
- swisstopo rédige la feuille de route applicable au positionnement et à la localisation (ex. : navigation fluide / ininterrompue, navigation des véhicules, systèmes de transport intelligents, positionnement en intérieur).

Dans *CGS Volume 100* « The Future of National GNSS-Geomonitoring Infrastructures in Switzerland », l'IGP/ETH Zurich, le Service sismologique suisse et swisstopo relèvent ensemble l'importance du GNSS et du réseau permanent AGNES pour les **missions de surveillance (monitoring)** (*texte traduit pour les besoins du présent rapport*) : « Le réseau GNSS automatique suisse AGNES est un réseau multifonction automatisé de grande qualité qui permet, resp. vient en soutien, des applications dans les domaines de la mensuration nationale géodésique, du positionnement, de la géodynamique et de la météorologie. S'il fait jeu égal avec d'autres réseaux GNSS avancés en matière de distances entre stations et de qualité de l'instrumentation, des améliorations semblent envisageables en termes d'organisation (gestion et répartition des données), notamment pour les applications en temps réel et à court-terme, ainsi qu'au niveau de la coordination avec d'autres parties prenantes. On s'est par ailleurs aperçu que des renforcements supplémentaires des applications existantes et l'extension vers la sismologie et la surveillance sismologique locale confèreraient au réseau le potentiel requis pour apporter une contribution significative à l'évaluation de la menace sismique générale existant en Suisse. Si les recommandations exposées dans le présent document sont suivies, les processus tectoniques et sismiques actuels pourront être mieux compris. Il sera en outre possible d'apporter un précieux soutien à de futurs systèmes d'alerte précoce aux tremblements



de terre et à d'autres systèmes visant à caractériser rapidement des événements, en fournissant de nouveaux enseignements, des redondances et une fiabilité accrue. »

Les neuf 'recommandations' du comité d'experts font partie des développements futurs possibles formulés dans le Tableau 2-4 (cf. § 2.3.5).

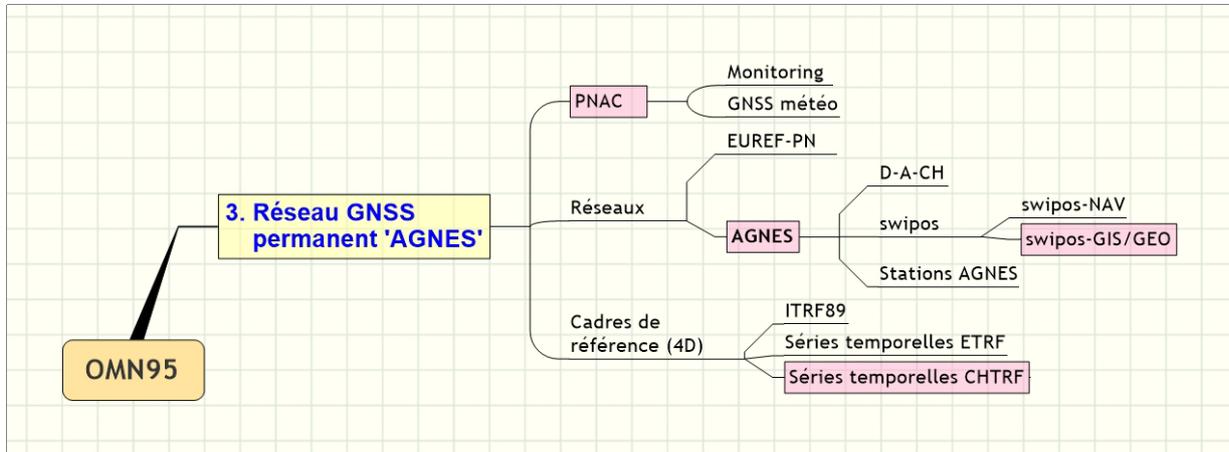


Figure 2-11 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 3 – réseau GNSS permanent AGNES

2.3.2 Réseau GPS/ GNSS automatique de la Suisse – AGNES

Les réseaux GNSS en exploitation permanente comportant des stations GNSS installées de manière stable font aujourd'hui partie des composantes d'infrastructure les plus importantes d'une mensuration nationale moderne. Ils permettent la réalisation active des systèmes de référence terrestres locaux et globaux et servent de base à l'exploitation de services de positionnement. En Suisse, c'est le réseau GNSS automatique suisse (AGNES, Automatisches GNSS Netz Schweiz), resp. swipos (Swiss Positioning Service), mis en place à partir de 1998, qui garantit cela. Au lieu d'être accordé de façon classique via des fiches signalétiques de points et des coordonnées précises, l'accès aux cadres de référence terrestres est assuré aux utilisateurs en temps réel, par des mesures de référence GNSS diffusées sur le réseau de téléphonie mobile. Le pays entier est ainsi couvert avec une qualité homogène et contrôlable. Dans la durée, les observations GNSS en continu contribuent aussi à mieux déterminer le modèle cinématique CHKM95 pour le système de référence géodésique suisse CHTRS95 et servent à des applications scientifiques en géodynamique ou pour la recherche atmosphérique (GNSS météorologique). AGNES est par conséquent un réseau de référence polyvalent pour la mensuration nationale et pour bien des types de mensurations, de positionnements et d'applications SIG en Suisse.

C'est à l'issue d'une étude préliminaire très complète que le réseau pilote AGNES put être mis en exploitation permanente à l'été 1998, en comportant cinq stations (Zimmerwald, Pfänder (A), Muttentz (FHBB), Zurich (ETHZ) et Jungfrauoch). Quatre stations supplémentaires (Locarno Monti, Davos, Lausanne [EPFL] et Andermatt/Gütsch) furent installées et mises en service durant le second semestre, si bien que neuf stations permanentes étaient disponibles à la fin de l'année 1998. Le réseau AGNES était complet en 2002, c.-à-d. qu'il couvrait la Suisse entière. Il se composait de 31 stations GNSS permanentes régulièrement réparties dans tout le pays (Figure 2-12). Lors de l'extension à des récepteurs GPS/GLONASS en 2007, les récepteurs purement GPS furent laissés en service sur dix stations pour des raisons de continuité et on doubla simplement les stations. 41 récepteurs sont ainsi opérationnels à l'heure actuelle. En outre, 19 stations proches de la frontière dans les pays voisins sont intégrées à AGNES resp. swipos. Les données des différentes stations AGNES sont transmises en ligne au centre de calcul et de contrôle de swisstopo via un réseau de communication protégé. Ce système garantit la surveillance permanente des stations AGNES et transmet un message d'erreur si les données d'une station font défaut, sont lacunaires ou entachées d'erreurs.

En association avec les centres d'analyse des réseaux permanents (PNAC), AGNES sert encore à diverses autres fins aujourd'hui. La surveillance (monitoring) automatique permet de contrôler en permanence le



fonctionnement correct du système et du réseau établi. Les séries temporelles de coordonnées générées servent par ailleurs à des fins scientifiques, dans le contexte de l'étude des mouvements de l'écorce terrestre. Et dans le même temps, les mesures livrent des informations intéressantes sur la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère.

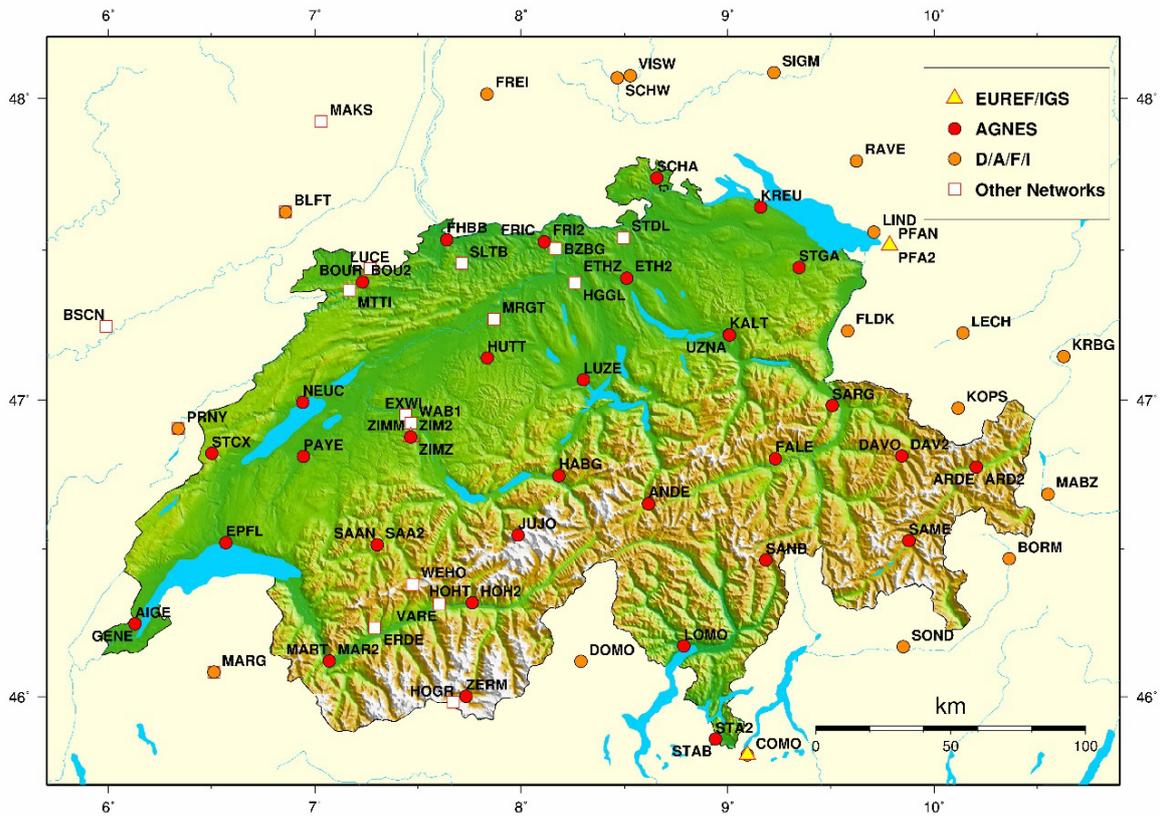


Figure 2-12 : stations AGNES / des pays voisins resp. d'institutions tierces traitées par swisstopo

2.3.3 PNAC

En 1998, swisstopo lança le développement d'un centre de traitement GNSS, baptisé PNAC (Permanent Network Analysis Center), alors que le réseau permanent suisse (AGNES) était en cours de mise en place.

Des solutions du réseau sont calculées toutes les heures et tous les jours pour le réseau dans le PNAC de swisstopo (Tableau 2-3). Le nombre de stations incluses a continuellement augmenté, puisque le traitement ne se limite pas aux seules stations AGNES, mais englobe aussi les stations déjà citées des pays voisins, les stations permanentes du réseau européen EPN et certaines stations de tiers. Le PNAC de swisstopo est l'un des centres d'analyses européens à participer au traitement de l'EPN (solution 1). Les solutions 2 et 3 servent à la surveillance des cadres de référence suisses en temps quasi-réel ainsi qu'à des applications et à des études scientifiques (géodynamique et météorologie GNSS). Les produits principaux sont constitués par des jeux de coordonnées des stations déduits en continu pour la surveillance des cadres de référence et par des paramètres de la troposphère déterminés via GNSS (appelés *zenith total delays*) pour aider les prévisions météorologiques.

Tableau 2-3 : solutions du réseau de stations GNSS permanentes au sein de swisstopo

Solution du réseau	Stations (2007 -> 2010)	Périodicité	Délai
1. Réseau partiel EUREF (EPN)	31 -> 50	quotidienne	de 14 à 21 jours
2. Réseau partiel EUREF + AGNES	89 -> 118 (41 AGNES)	quotidienne	de 14 à 21 jours
3. Réseau partiel EUREF + AGNES	80 -> 115 (41 AGNES)	horaire	1 h 45 min.

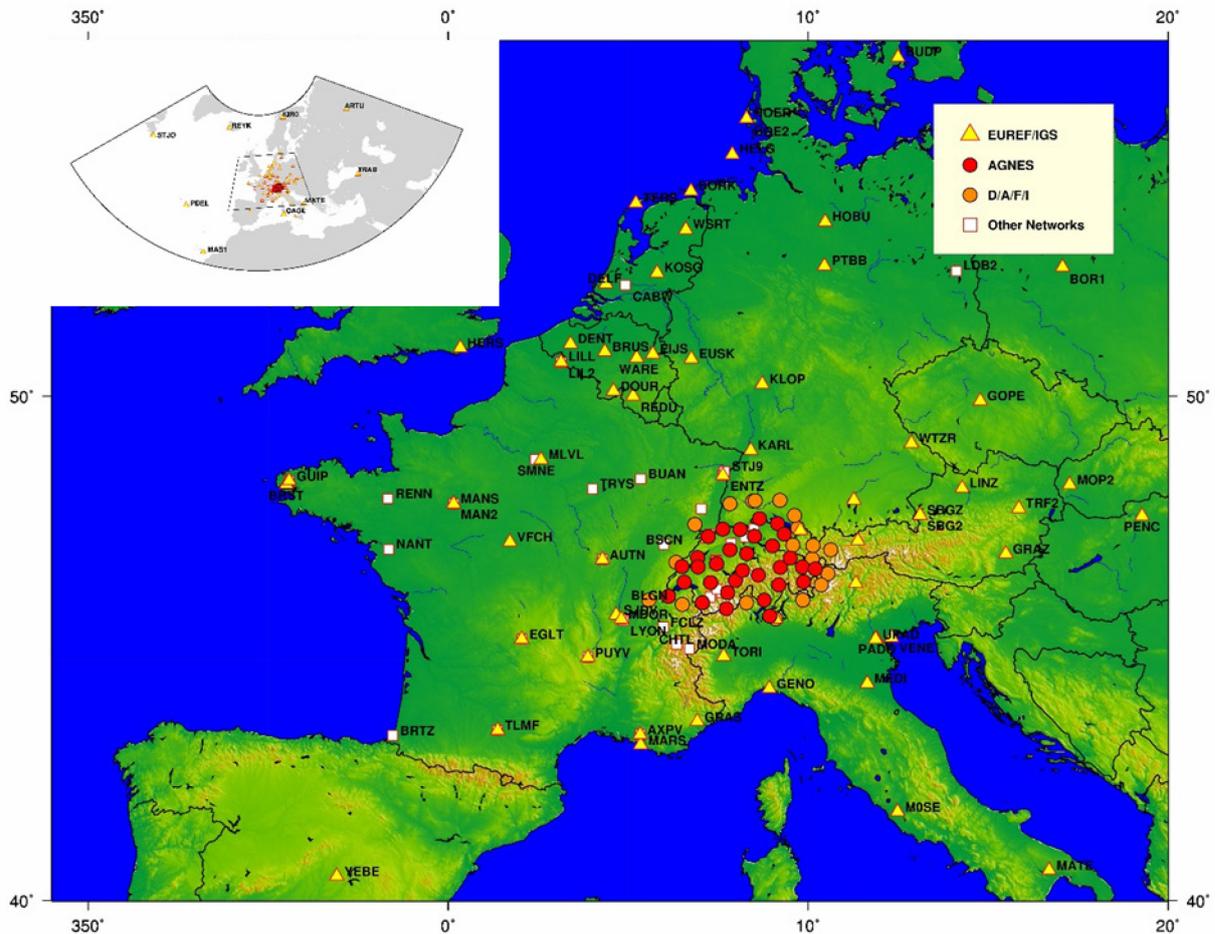


Figure 2-13 : stations GNSS permanentes en Europe traitées par swisstopo

Tous les calculs sont effectués avec le logiciel bernois (Bernese Software BSW), version 5.0. De précieuses synergies découlent par ailleurs du fait que les mêmes modules logiciels sont utilisés à l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB) et au sein de swisstopo, les deux institutions coopérant du reste étroitement à la poursuite de leur développement. swisstopo participe également au CODE (Center for Orbit Determination in Europe), hébergé par l'AIUB, qui procède à des traitements quotidiens du réseau global permanent de l'IGS (International GNSS Service). Parmi les autres partenaires de CODE, on compte l'office fédéral allemand de cartographie et de géodésie (BKG) ainsi que l'Institut géographique national (IGN) français.

Le PNAC de swisstopo est aussi un centre d'analyse d'EPN (EUREF Permanent Network). Il participe en outre à de nombreux projets GNSS internationaux. En voici deux exemples :

- COST Action 716 : Exploitation of ground based GPS for climate and numerical weather prediction applications.
- Le projet TOUGH (Targeting the Optimal Use of GPS Humidity) de l'UE qui consiste en une étude scientifique des possibilités du GPS en météorologie.

D'autres informations concernant le PNAC peuvent être trouvées dans les rapports annuels que la Géodésie/swisstopo adresse à EUREF, Reference Frame Sub Commission for Europe. Ces *National Reports of Switzerland* (EUREF) destinés à EUREF sont présentés lors des symposiums annuels d'EUREF et sont publiés sur son site Internet : http://www.euref.eu/euref_symposia_meetings.html.



Une vue d'ensemble est fournie dans l'article d'E. Brockmann intitulé : *Stabilité du cadre de référence de coordonnées suisse*, publié dans *cadastre*, la revue spécialisée consacrée au cadastre suisse, n° 28, décembre 2018, p. 11–13.

2.3.4 Swipos (Swiss Positioning Service)

La mise en place d'un service de positionnement de haute précision couvrant le pays entier sur la base de GPS différentiel et fondé sur des stations permanentes faisait d'emblée partie intégrante du concept MN95. Il visait (et vise) principalement à mettre à disposition le nouveau cadre de référence en temps réel pour un nombre élevé d'utilisateurs et d'applications.

Au-delà des applications qu'il permet en mensuration nationale et dans le domaine de la recherche (atmosphérique et en géodynamique), AGNES est d'abord la base sur laquelle repose swipos® (Swiss Positioning Service). C'est par l'intermédiaire de ce service de positionnement GNSS public que les utilisateurs accèdent aux données contrôlées des stations AGNES et des stations étrangères proches de la frontière qui sont alors les données de référence GNSS pour leurs applications pratiques. Les clients (via leurs récepteurs GNSS) peuvent obtenir les données en temps réel en ligne (applications temps réel) du serveur de swisstopo par GSM ou accéder hors ligne (applications de post-traitement) aux données de référence en recourant à un service de téléchargement de données.

On distingue deux niveaux de précision distincts pour ces services de positionnement en temps réel :

- **swipos-NAV OUC (ondes ultra-courtes) /RDS :**
Service DGPS d'une précision de 0,5 à 2 m. Pour swipos-NAV, les données de correction d'une station de référence GPS étaient émises en OUC/RDS par la SRG SSR Idée Suisse. L'utilisateur devait être équipé d'un décodeur spécial. Ce service était disponible sur l'intégralité du territoire suisse à partir de janvier 2000.

Depuis janvier 2004, swipos-NAV est proposé via GPRS/NTRIP. Le flux de données peut être capté sans authentification.
- **swipos-GIS/GEO :**
Dans le cas de swipos-GIS/GEO, l'accès se fait par Natel/GSM via un numéro commercial en 0900. Dès que l'utilisateur est connecté au serveur central, le récepteur GPS lui transmet sa position approchée (au format NMEA). A l'aide de cette dernière, la centrale calcule une « station de référence virtuelle » (VRS) pour l'emplacement actuel de l'utilisateur, la VRS étant interpolée – en simplifiant – à partir des données en temps réel des trois stations AGNES les plus proches et servant ensuite à déterminer la position précise en mode différentiel. Grâce à la formation de cette moyenne, l'influence de certaines erreurs systématiques (orbites des satellites, ionosphère et troposphère) peut être significativement réduite, ce qui accroît d'autant la précision de détermination de la position. Les données VRS sont retournées au format RTCM aux utilisateurs qui peuvent alors déterminer leur position avec une précision centimétrique (avec un temps d'initialisation de 30 secondes habituellement). L'utilisateur de swipos-GIS/GEO n'a plus besoin de gérer sa propre station de référence, il peut effectuer des mesures à tout moment avec un seul récepteur GPS.

Le 1^{er} mars 2001, swisstopo avait démarré une exploitation pilote de swipos-GIS/GEO sur le Plateau (Mittelland), dans le Jura et en Valais. Cette expérience visait à mettre swipos-GIS/GEO à la disposition d'un cercle d'utilisateurs élargi, à acquérir de l'expérience et à identifier d'éventuels problèmes puis à y remédier. La condition requise pour utiliser swipos-GIS/GEO était de posséder un récepteur GPS compatible RTK pouvant être associé à un module Natel/GSM. Le récepteur devait par ailleurs pouvoir transmettre sa position approchée au format NMEA à l'établissement de la connexion avec le serveur. Les données de correction étaient transmises au format RTCM (type 18,19) pour swipos-GIS/GEO. Les récepteurs géodésiques courants du marché proposés par les principaux fabricants remplissaient ces conditions. L'accès se faisait via le numéro commercial 0900 55 00 50, le prix se montant à 0,36 franc/minute (hors coûts de communication). Pour les clients ayant des exigences particulières (comme des services cantonaux du cadastre, des entreprises assurant un service public, etc.), d'autres solutions pouvaient aussi être proposées sur demande pour l'accès aux données.



Depuis janvier 2005, swipos-GIS/GEO est aussi proposé via GPRS/NTRIP. Les flux de données associés s'appellent VRS-LV95 et VRS-LV03 pour les cadres de coordonnées MN95 et MN03 (cf. ci-après). Ces flux de données exigent une authentification et la position approchée de l'utilisateur.

Enfin, les données de toutes les stations AGNES peuvent aussi être téléchargées (isolément) au format RINEX depuis un serveur central pour des applications de post-traitement, la durée de mesure et l'intervalle de données pouvant être définis par l'utilisateur.

Le développement de swipos (Swiss Positioning Service) resp. de ses services a été inlassablement poursuivi par le domaine Géodésie de swisstopo en étroite collaboration avec le développeur du logiciel (Trimble Ltd.), si bien qu'il a été constamment possible de respecter les exigences toujours plus fortes en matière de disponibilité, de fiabilité et de précision. Aujourd'hui, swipos est devenu une norme de fait en mensuration, à l'instar d'autres services de positionnement commerciaux. Si le recours à swipos se limitait quasi-exclusivement aux domaines des points fixes et de la MO dans les premiers temps (vers 2002), son champ d'application s'est clairement déporté vers le secteur de la construction et le guidage de machines aujourd'hui (dont les engins agricoles et les dameuses). Au total, on est passé de 11 licences en 2002 à près de 3000 en 2020. Les clients sont aussi régulièrement informés des développements et des étapes d'extension prévus via la newsletter « swipos-News ».

Une particularité de swipos réside dans les transformations en temps réel entre les différents cadres de référence planimétriques et altimétriques en Suisse. Grâce à elles, les clients peuvent travailler au choix dans l'« ancien » (MN03) ou dans le « nouveau » (MN95) cadre de référence planimétrique. S'agissant des cadres altimétriques, il est possible d'opter pour les altitudes usuelles officielles NF02 ou pour les altitudes orthométriques de RAN95. Si les transformations en temps réel ont été introduites, c'est pour permettre aux utilisateurs de swipos de travailler dans l'ancien et dans le nouveau cadre de référence durant l'introduction de MN95. Cela visait notamment à favoriser l'acceptation du nouveau cadre de référence.

Le délai transitoire accordé selon l'OGéo pour le CCR des géodonnées de base ayant expiré à la fin de l'année 2020, swisstopo a cessé de proposer la transformation en temps réel entre MN95 et MN03 à cette échéance. La transformation entre les altitudes RAN95 et NF02 est maintenue, NF02 continuant à être le cadre de référence altimétrique officiel pour la MO. Une analyse rapide de l'utilisation actuelle de swipos montre que près de 25% des clients continuent à travailler en MN03, alors que les professionnels de la mensuration ont quasiment tous opté pour le cadre de référence MN95 aujourd'hui.

D'autres questions se posent désormais pour swipos : le service peut-il être ouvert à des usages grand public ? Si oui, jusqu'à quel point ? Ou doit-il plutôt rester réservé aux professionnels des secteurs de la mensuration et de la construction ? Par usages grand public, on entend ici des applications dont se servent des milliers d'utilisateurs et on pense notamment aux véhicules autonomes. Dans de tels cas, les services fondés sur le « Positionnement de point précis (PPP) » sont mieux adaptés, les données de correction pouvant être radiodiffusées, donc captées par un nombre quasiment illimité d'utilisateurs. swipos, qui est un service de type VRS (station de référence virtuelle), nécessite en revanche qu'une liaison de données bidirectionnelle soit établie lors de chaque accès d'un utilisateur. En outre, l'industrie automobile ne peut pas s'appuyer sur des services nationaux pour les véhicules autonomes, elle a besoin de services d'ampleur continentale voire mondiale.

Une forme de collaboration possible consisterait à livrer des données GNSS des stations AGNES à des services commerciaux, des données de stations de référence stables et bien surveillées ne pouvant qu'intéresser les fournisseurs de tels services. En règle générale, ces derniers utilisent un nombre de stations supérieur à celui strictement nécessaire pour la solution PPP et créent ainsi la redondance requise. A titre d'essai, swisstopo fournit actuellement les données de deux stations AGNES au service « SAPA » (Safe and Precise Augmentation) de la coentreprise SAPCORDA '78 fondée en 2017. Ces services d'ampleur continentale recourent d'ordinaire au système ETRS89 en Europe et sont donc compatibles avec CHTRS95, dans une plage de quelques centimètres.



2.3.5 Etat actuel et développements futurs possibles

Tableau 2-4 : réseaux GNSS permanents (AGNES) : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Réalisation du cadre de référence national d'une précision centimétrique, en temps réel et hors ligne, en couvrant intégralement le territoire suisse via AGNES.• Le service de positionnement swipos est disponible en permanence sur tout le territoire national. Le positionnement en temps réel est précis, fiable et rationnel (peu coûteux). Les zones frontalières avec l'Allemagne et l'Autriche sont couvertes sans aucune lacune. L'application a les faveurs du public et le cercle d'utilisateurs s'élargit rapidement.• AGNES et swipos se fondent sur le GNSS.• Le centre d'analyse des réseaux permanents PNAC de swisstopo surveille AGNES et donc le cadre de référence CHTRF en permanence (surveillance indépendante de swipos).• Le PNAC contribue à la collaboration internationale via le traitement quotidien d'une partie d'EU-REF-PN.• Les 'zenith path delays' issus d'un réseau AGNES étendu sont calculés toutes les heures et fournis à MétéoSuisse pour les prévisions météorologiques.• Les séries temporelles (coordonnées et vitesses) des stations AGNES sont calculées en continu et mises à disposition pour étudier la cinématique de la croûte terrestre.	<ul style="list-style-type: none">• Densification locale du réseau de base d'AGNES par de nouvelles stations, adaptées à des études géodynamiques, notamment là où l'activité sismique est plus forte.• Optimisation du réseau, les stations inadaptées et instables étant remplacées par des stations stables de catégorie « A » (ancrées dans la roche).• Meilleure répartition en altitude des stations dans les régions de montagne, d'où de meilleures performances dans les vallées alpines, notamment au niveau altimétrique.• Collocation de stations AGNES sélectionnées avec des stations sismiques et des capteurs météorologiques.• Géoservices de surveillance : déformation de terrains ou d'ouvrages, étude de mouvements de l'écorce terrestre (3D) en temps réel ; chaîne de traitement permettant d'exploiter des fréquences de données GNSS élevées (100 Hz) avec des temps de latence minimaux (en collaboration avec le Service sismologique suisse), (cf. <i>CGS volume 100</i>)• Mise en place d'un centre de données national pour le traitement et l'analyse GNSS.• Poursuite du développement de la météorologie GNSS (tomographie).• Développement, optimisation et soutien d'un large éventail de méthodes de positionnement et de géolocalisation (GNSS, PPP-RTK, LBS, GSM, Wi-Fi, IP, RFID, Bluetooth, ultrasons, pseudolites, navigation en intérieur) pour une navigation et un positionnement fluides et ininterrompus dans le temps et l'espace à l'échelle du pays entier (en intérieur comme en extérieur).• Coopération avec les services de positionnement et de navigation à l'échelle de l'Europe entière.

Références bibliographique relatives à 2.3 :

Une liste de swisstopo Reports et d'autres publications (venant s'ajouter à celles déjà citées) concernant le réseau GNSS permanent AGNES et les services de positionnement swipos figure à l'annexe 2.3.3.



2.4 Réseau de référence GNSS réseau national MN95

2.4.1 Objectif stratégique et documentation

Dans l'optique de la réalisation des systèmes de référence terrestres locaux et globaux en Suisse, swisstopo établit, étend et actualise un réseau de référence GNSS moderne, de haute précision, couvrant le pays entier en étant matérialisé de façon stable et durable. C'est par la mesure initiale du réseau et sa répétition périodique à l'aide des méthodes de mesure GNSS les plus modernes que des cadres de référence en 3D rapportés à leur époque de mesure (CHTRFyy) sont déterminés de manière fiable et avec une précision prouvée. Les points de référence font l'objet d'un entretien, sont mis à jour, documentés en conjonction avec les cadres de référence (jeux de coordonnées en 3D), puis mis à la disposition des utilisateurs sous une forme adaptée.

La définition du réseau national GNSS a été décrite en détail et avec soin dans les « *Berichte aus der L+T* » suivants, dont un seul (n°8f) a été traduit en français :

- *Bericht L+T 6 – LV95 – Teil 1* : surtout au chapitre 5, relatif au projet et au concept de réalisation du réseau national GPS
- *Bericht L+T 8f – MN95 – 3^{ème} partie* : surtout au chapitre 3, portant sur les systèmes et les cadres de référence terrestres locaux et au chapitre 6 relatif aux cadres de référence global CHTRF95 et local MN95
- *Bericht L+T 11 – LV95 – Teil 5* : réseau national GPS : établissement du réseau, reconnaissance et conception du réseau, matérialisation, documentation et mise à jour
- *Bericht L+T 12 – LV95 – Teil 6* : réseau national GPS : mesures GPS entre 1988 et 1994
- *Bericht L+T 13 – LV95 – Teil 7* : réseau national GPS : traitement des mesures GPS réalisées entre 1988 et 1994, détermination des cadres de référence CHTRF95 et MN95
- *Bericht L+T 15 – LV95 – Teil 9* : réseau national GPS : densification et lien avec la mensuration nationale antérieure, transformation MN03 ↔ MN95

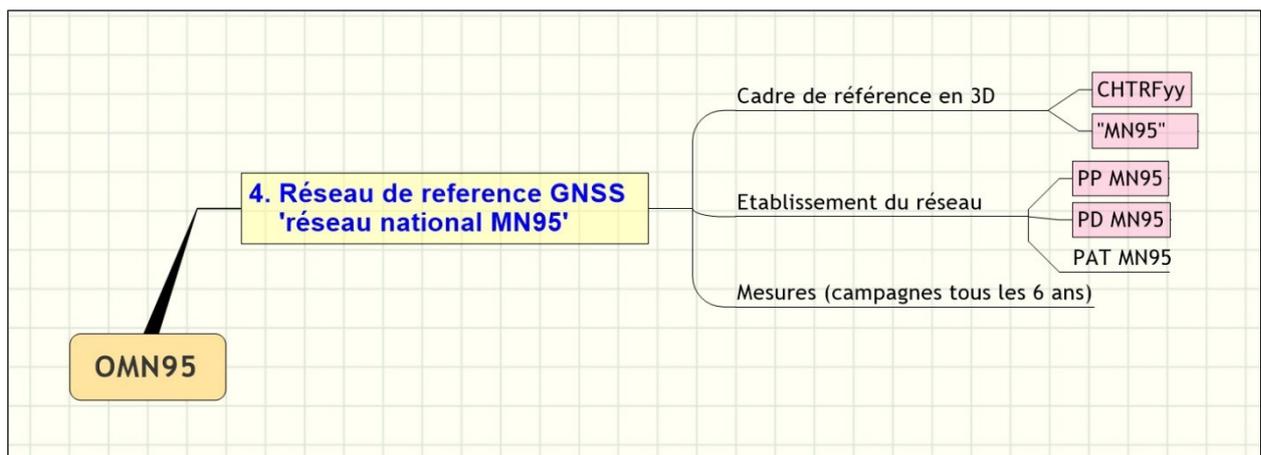


Figure 2-14 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 4 – réseau de référence GNSS « réseau national MN95 »



2.4.2 Etablissement du réseau

Le projet du réseau de référence GNSS MN95 de la Suisse (alors appelé 'réseau national GPS MN95') date de 1988. Ce réseau devait respecter les critères suivants :

- 1) Un rattachement optimal à la station fondamentale de Zimmerwald et aux quatre autres stations EUREF Chrischona, Pfänder, Monte Generoso et La Givrine.
- 2) La couverture territoriale complète de la Suisse avec une répartition régulière et une densité uniforme des points du réseau ; distance entre points pour une résolution sans problème des ambiguïtés de phase dans le cas aussi de récepteurs L1 : entre 15 et 25 km sur le Plateau (Mittelland) et dans le Jura, de 20 à 30 km dans les Alpes.
- 3) Une sélection adaptée des sites des points en termes de sécurité (si possible sur des terrains publics) et de pérennité (pour une durée d'au moins 50 ans), du point de vue de la géologie (notamment de l'adéquation du sous-sol), de l'accessibilité du point par des véhicules tout au long de l'année et d'une réception satellite libre de toute perturbation (horizon dégagé, absence de signaux parasites ou de surfaces réfléchissantes) ; matérialisation optimale et repérage.

Les points MN95 doivent permettre de se prononcer concernant d'éventuelles modifications tectoniques en Suisse. C'est pourquoi la stabilité des sites de points prévus fut évaluée par le géologue Peter Heizmann (Dr, alors Hydrologie et géologie nationale, OFEG). En général, l'évaluation se faisait au bureau, sur la base de la carte géologique. Au besoin, une visite était effectuée sur site en utilisant le « Pavoni-mètre » et une sonde de battage (cf. *Berichte aus der L+T* Nr. 11 – LV95 – Teil 5, p. 8s].

- 4) La mise en relation avec les réseaux antérieurs de la mensuration nationale MN03 (triangulation de 1^{er} ou 2^{ème} ordre) et avec les points fixes du nivellement fédéral (NF02) resp. du réseau altimétrique national RAN95.

La mise en place du réseau national GPS MN95 (le réseau de référence GNSS MN95 aujourd'hui), la matérialisation des points de référence et les mesures GPS du réseau principal eurent lieu par étapes, avec une subdivision en quatre réseaux partiels. Les **104 points principaux** (stations EUREF incluses) furent mesurés en même temps que des points de rattachement (à MN03 et à NF02) lors de campagnes de mesures annuelles entre 1989 et 1992 ainsi que lors de campagnes complémentaires jusqu'en 1994. Tous les points sont matérialisés par un repère centrique (une cheville à calotte). 34 de ces repères sont directement fixés dans la roche apparente, 22 sont matérialisés sur un socle en béton ancré dans la roche, 3 sont implantés sur un bloc de rocher massif, 14 sur une construction stable et 31 sur un grand socle en béton bien ancré dans le terrain. Tous les points principaux sont dotés d'un repérage excentrique, soit directement au moyen de chevilles excentriques (trou d'un diamètre de 5 mm), soit via une dalle enterrée portant des chevilles excentriques. Une densification du réseau de référence par **104 points de densification** supplémentaires eut ensuite lieu jusqu'en 1998. Cette extension intervint aussi par étapes et fut traitée en fonction des urgences et des besoins des utilisateurs (mise en place des réseaux de PF de la MO).

Aujourd'hui, ce sont donc **208** points de référence mesurés, matérialisés de façon stable, aisément accessibles, compatibles GNSS et documentés en détail qui servent de base à la quasi-totalité des applications de mensuration en Suisse. En conjonction avec le réseau permanent GNSS AGNES, ces points réalisent les nouveaux **cadres de référence CHTRF et MN95**, ce dernier ayant succédé à la triangulation nationale MN03 (du 1^{er} au 3^{ème} ordre) (cf. concept).

La partie principale du réseau national GPS MN95 a été établie et mesurée pour la première fois entre 1989 et 1994. Ces coordonnées peuvent être attribuées à l'époque moyenne de 1992. A partir de là, le réseau complet (réseau principal et réseau de densification) a été remesuré conjointement avec le réseau GNSS permanent AGNES tous les six ans, donc en 1998, 2004, 2010, 2016 et 2022. Les campagnes de mesures sont intitulées CHTRFyy (Swiss Terrestrial Reference Frame, yy désignant l'année de la mesure). Les coordonnées résultantes des points principaux et des points de densification définissent conjointement avec celles des stations AGNES les réalisations spécifiques aux époques concernées des cadres de référence officiels CHTRF du système CHTRS. Les **cadres de référence CHTRFyy** définis dans le système de référence CHTRS95 global, lié au temps, sont ainsi réalisés.



Les résultats des campagnes CHTRFyy servent d'une part à contrôler le cadre de référence MN95 en principe statique et forment d'autre part la source de données principale, aux côtés des données RAN95, pour les études cinématiques de la mensuration nationale et pour le calcul du modèle cinématique en 3D CHKM95 (cf. § 2.9).

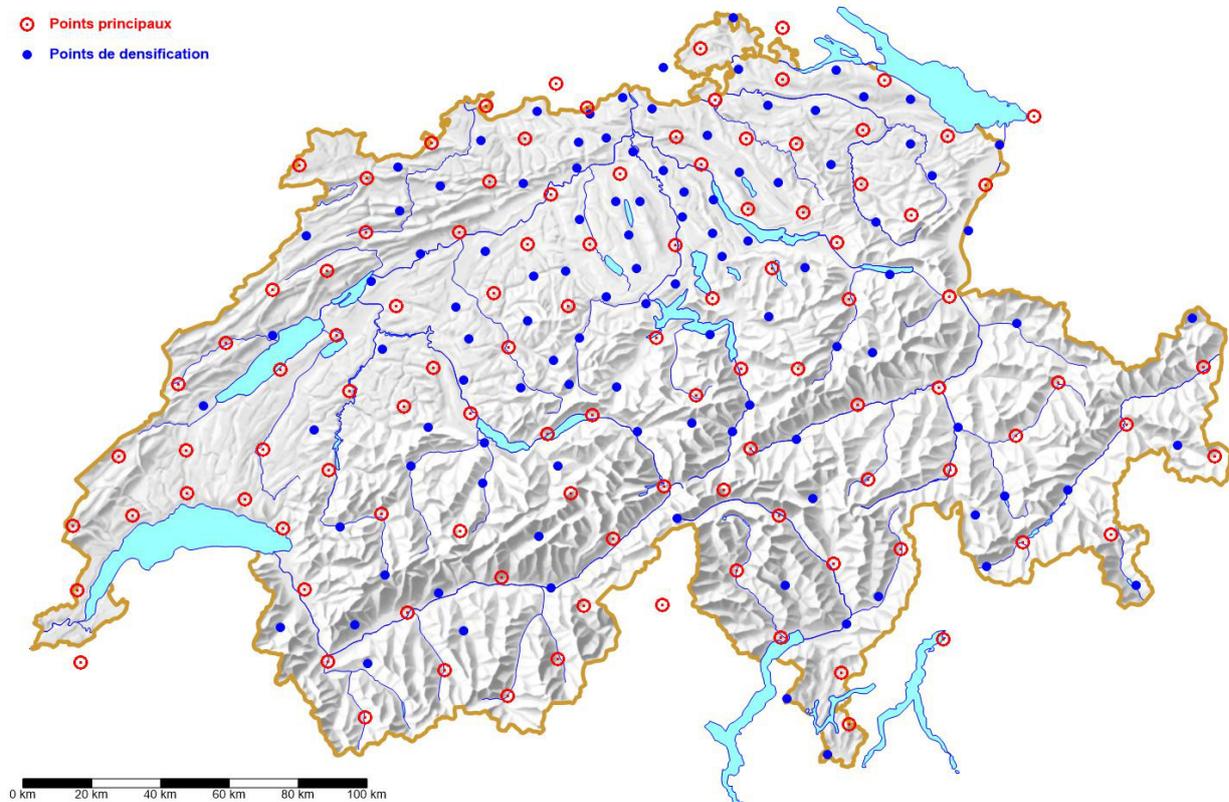


Figure 2-15 : vue d'ensemble des points du réseau de référence GNSS MN95

2.4.3 Comparaison avec MN03, changement de cadre de référence de MN03 vers MN95 et services de transformation

Des mesures de comparaison effectuées sur des points de mensuration aisément accessibles de la triangulation nationale initiale (MN03) couplées à l'intégration des résultats de la compensation de diagnostic de la triangulation du 1^{er} / 2^{ème} ordre (DIA95, cf. § 1.2) ont permis de mettre en évidence des déformations systématiques dans la MN03 centenaire atteignant jusqu'à 1,5 m par endroits. En revanche, la précision (1 sigma) des coordonnées planimétriques du nouveau cadre de référence MN95 est inférieure à 1 cm à l'échelle nationale. Avec la mensuration nationale MN95, la précision planimétrique s'est donc accrue d'un facteur 100 par rapport à MN03.

Les données des points fixes de la mensuration nationale et de la mensuration officielle (catégories 1 et 2) sont toutes gérées par swisstopo au sein d'une banque de données centrale, le service des données sur les points fixes (FPDS), à laquelle les cantons peuvent également accéder directement. Les coordonnées et les fiches signalétiques sont par ailleurs mises à la disposition de tous gratuitement via le « visualiseur de données du FPDS ».

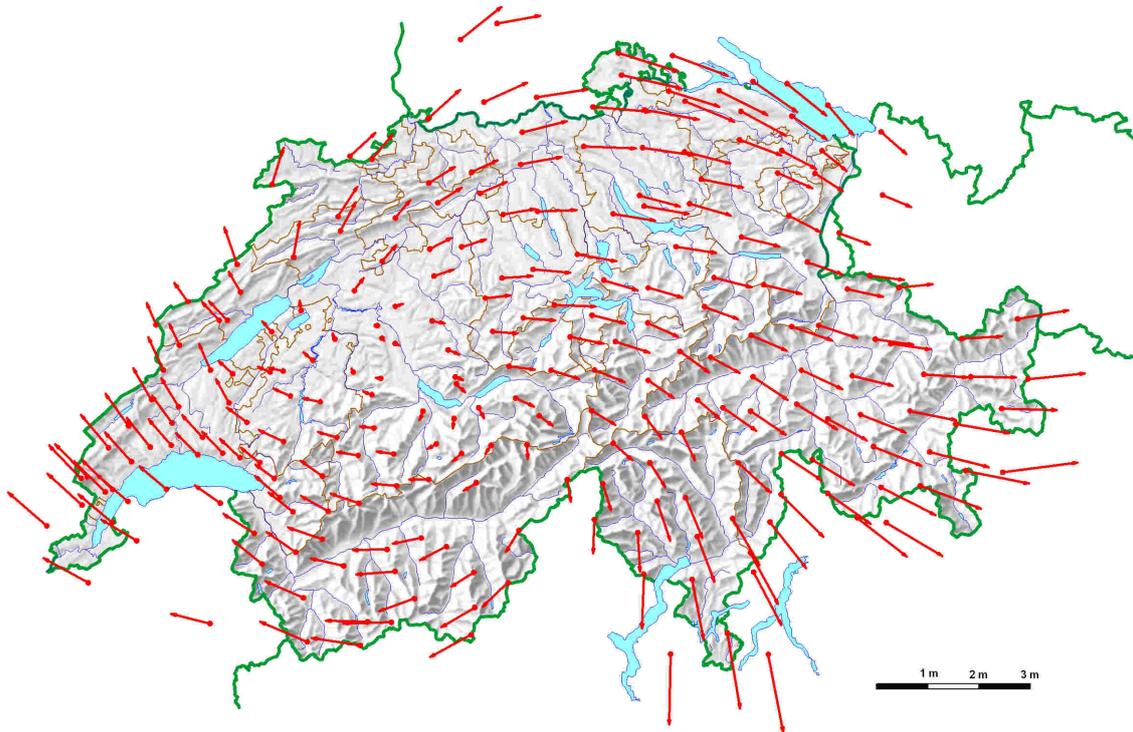


Figure 2-16 : vecteurs des différences entre MN03 et MN95

Peu de temps après son établissement, la précision homogène de niveau centimétrique du cadre de référence MN95 dans le pays entier lui permettait déjà de satisfaire les exigences propres à des mensurations primordiales de grands projets d'ingénierie et d'installations d'infrastructure telles que celles des tunnels de base du Lötschberg et du Saint-Gothard (NLFA, resp. projet AlpTransit).

L'introduction d'un nouveau cadre de référence a un impact fort sur l'utilisation et la gestion de l'ensemble des géodonnées qui se fondent encore très largement sur les bases originelles de la MN03. C'est en étroite collaboration avec les responsables de la mensuration officielle (Direction fédérale des mensurations cadastrales, Conférence des services cantonaux du cadastre (CSCC), désormais CGC) et avec des représentants des hautes écoles et des organisations professionnelles que ce nouveau contexte de départ a été analysé et que des propositions de solution ont été élaborées afin que le changement de cadre de référence se passe dans les meilleures conditions. Avec l'algorithme FINELTRA (transformation affine par des éléments finis) développé à l'ETHZ dans les années 1990 et le jeu de données « CHENyx06 » (cf. ci-après) correspondant à un maillage triangulaire couvrant la Suisse entière, c'est un outil adapté qui est désormais disponible pour cela. En déterminant des points de contrôle et de densification, les services cantonaux des mensurations ont grandement contribué à la qualité élevée de ce jeu de données de transformation, ce que la couche métier SIG spécialement développée à cette fin par swisstopo a très bien permis de mettre en évidence.



La définition des triangles ainsi constituée a finalement été désignée par

CHENyx06

Cette abréviation a été formée selon la logique suivante :

- CH** Territoire suisse
- EN** Valeurs Est (E) et Nord (N) des coordonnées en MN95
- yx** Valeurs y et x des coordonnées en MN03
- 06** Année d'établissement, soit 2006

Le maillage se compose au total de

11'882 triangles et

5'944 points d'appui de la transformation (PAT).

Les différents maillages triangulaires établis par les cantons (cf. exemple de la Figure 2-17) ont été vérifiés par le domaine Géodésie (groupe Données géographiques/MN95) avant d'être réunis en un jeu de données étendu au pays entier, le maillage triangulaire national CHENyx06. Il a été remédié aux contradictions décelées aux limites cantonales en partenariat avec les cantons concernés. Les détails à ce sujet sont décrits dans [swisstopo-Doku 21 – MN95 - 13^{ème} partie]. Pour que le maillage couvre en revanche l'intégralité du périmètre du Modèle topographique du paysage (MTP) de swisstopo, il a fallu compléter la solution existante des cantons par des triangles supplémentaires. Le maillage a été complété pour cela par quatre points d'appui de la transformation (PAT) virtuels, situés en dehors des limites du périmètre du MTP, et des triangles supplémentaires ont été définis vers ces points le long de la frontière nationale (cf. Figure 2-18). Les coordonnées MN95 de ces PAT virtuels ont été choisies de manière qu'il n'existe plus aucune déformation entre MN03 et MN95. La figure suivante présente le maillage triangulaire du canton de Neuchâtel, à titre d'exemple.

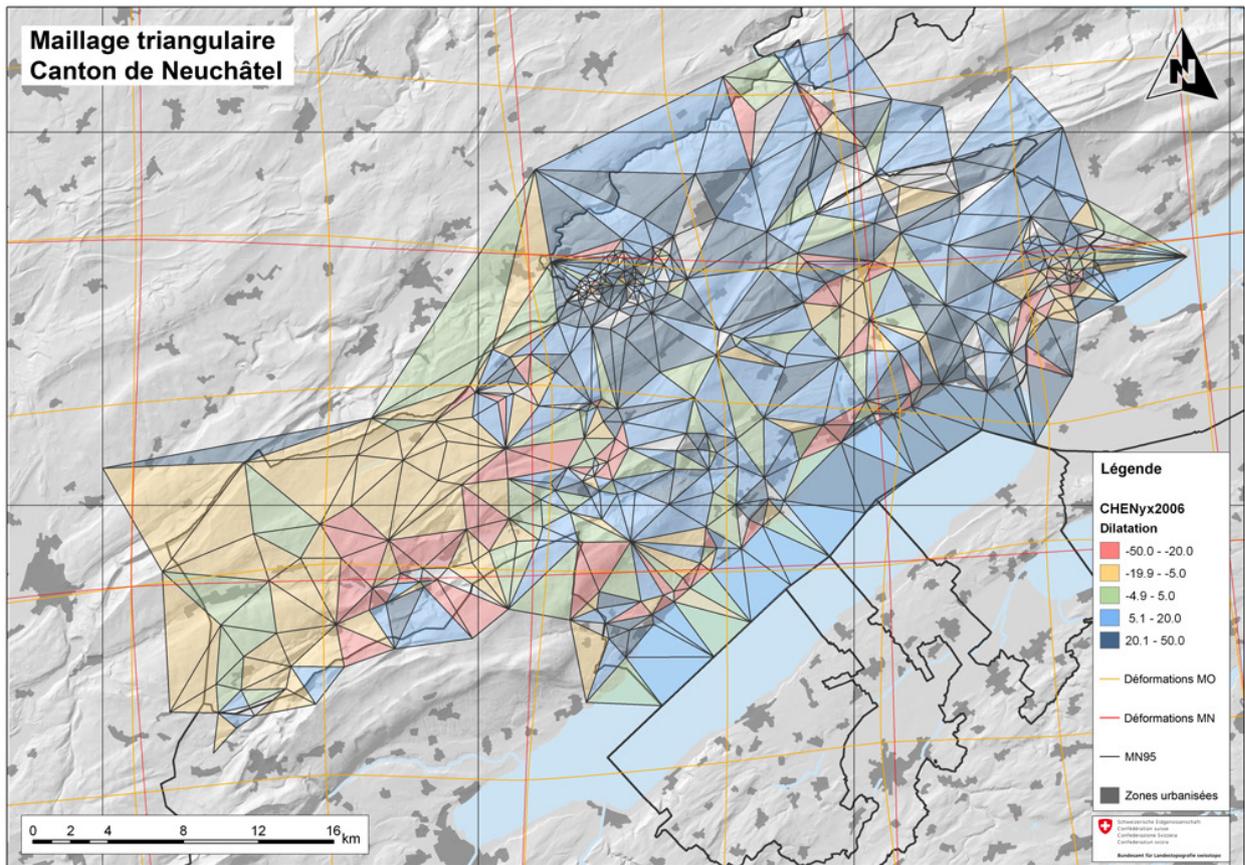


Figure 2-17 : maillage triangulaire du canton de Neuchâtel (avec une densification locale dans deux zones), le paramètre de déformation « Dilatation » indiquant une expansion ou un tassement du triangle par la transformation MN03 → MN95.

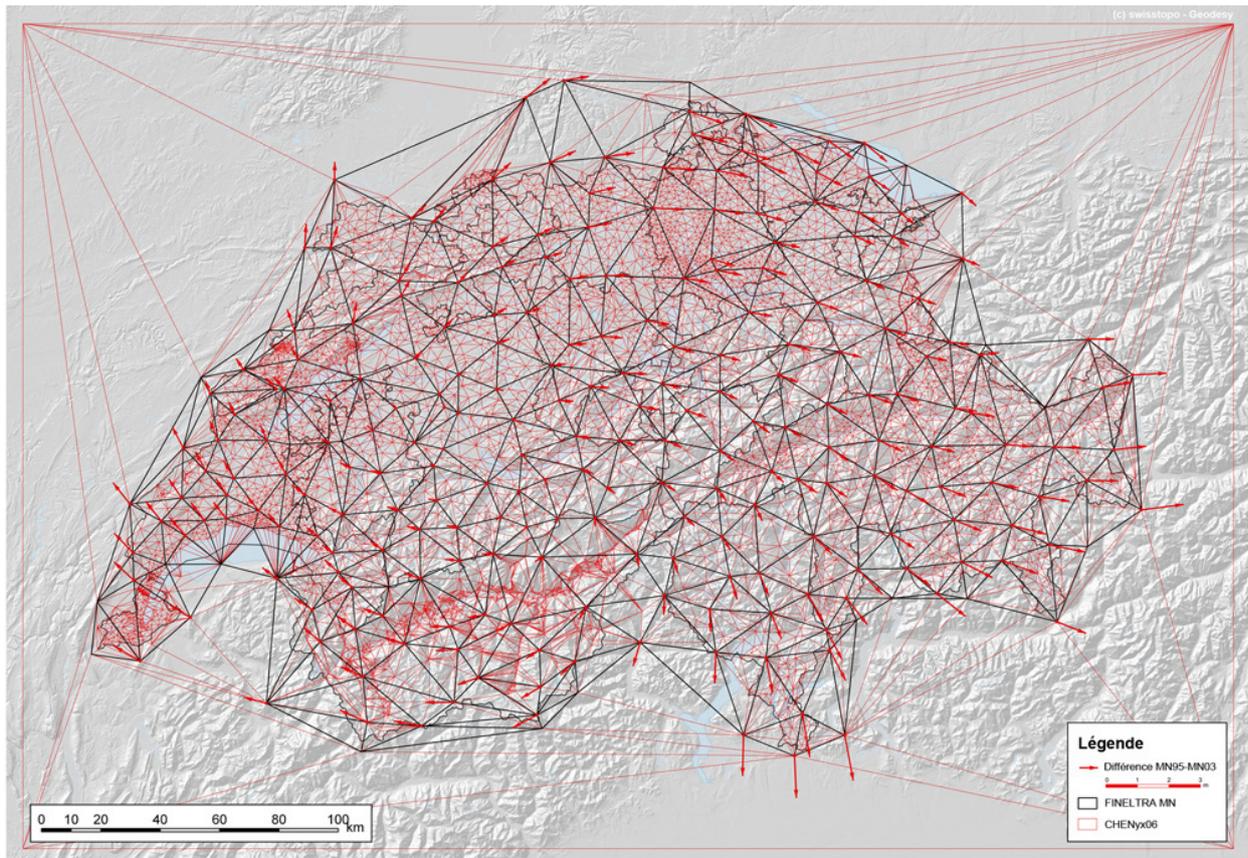


Figure 2-18 : le maillage triangulaire au niveau de la mensuration nationale (FINELTRA-MN) est reconnaissable en noir. Achevé dans les années 1990, il permettait de transformer des géodonnées de MN03 vers MN95 et inversement avec une précision d'un décimètre environ. Ce maillage triangulaire a été systématiquement densifié par les cantons (triangles en rouge) et unifié par swisstopo au sein du jeu de données CHENyx06.

Avec l'algorithme FINELTRA, resp. avec CHENyx06, c'est une transformation permettant de changer de cadre de référence avec une précision élevée qui est mise à disposition. La précision de transformation moyenne de CHENyx06 est de 3 cm. Elle a pu être déduite de façon empirique à l'aide de points de contrôle. En revanche, les propriétés géométriques et topologiques ne sont pas toujours conservées avec cette approche par les éléments finis, la transformation affine ne conservant ni les angles ni les distances. D'autres approches étaient par conséquent requises, permettant de minimiser les déformations dues à la transformation en fonction de la précision des données et des exigences géométriques. swisstopo a développé des variantes de réalisation appropriées en 2009. Les producteurs et les utilisateurs de géodonnées ont notamment pu bénéficier du soutien optimal apporté par le logiciel REFRAME de swisstopo lors du changement de cadre de référence. Ce logiciel regroupe toutes les transformations géodésiques pertinentes en Suisse sous une même interface utilisateur et est également disponible en tant que géoservice public.

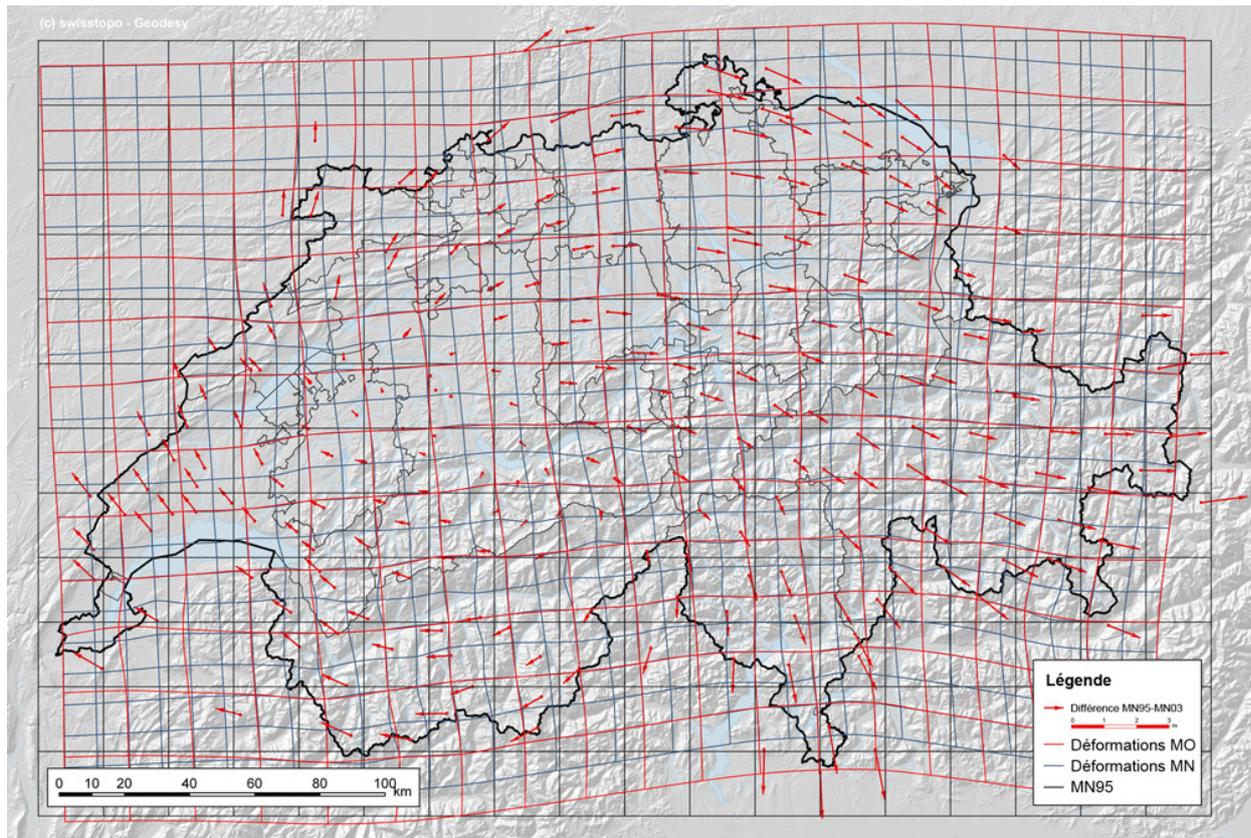


Figure 2-19 : déformations du cadre de référence de 1903 actuellement utilisé par rapport au nouveau cadre de référence de 1995 quasiment exempt d'erreurs (MN95 = grille de référence noire) : MN03 = grille rouge avec les déformations issues de la mensuration nationale MN et grille bleue contenant en plus les déformations locales issues des mensurations officielles. Les flèches rouges pointent de MN03 (en rouge) vers MN95 (en noir) et indiquent ainsi la direction et l'ampleur de la correction locale.

La plupart des utilisateurs de la nouvelle mensuration nationale MN95, extérieurs au domaine de la mensuration, ne percevaient pas l'ampleur du gain de précision (d'un facteur 100 environ) par rapport à celle de MN03. Seules les nouvelles coordonnées MN95 à sept chiffres (exprimées en mètres) attiraient leur attention. Toutefois, divers comptes rendus dans des médias et certains cantons, via des courriers d'information directement adressés aux propriétaires fonciers, pointèrent du doigt les modifications de surfaces résultant du changement de cadre de référence (cf. § 2.10.6). Pour fixer les idées, swisstopo produisit donc des représentations graphiques des modifications de surfaces absolues et relatives par canton, resp. par commune.



Absolute Differenzen pro Kanton in ha
Différences absolues par canton en ha

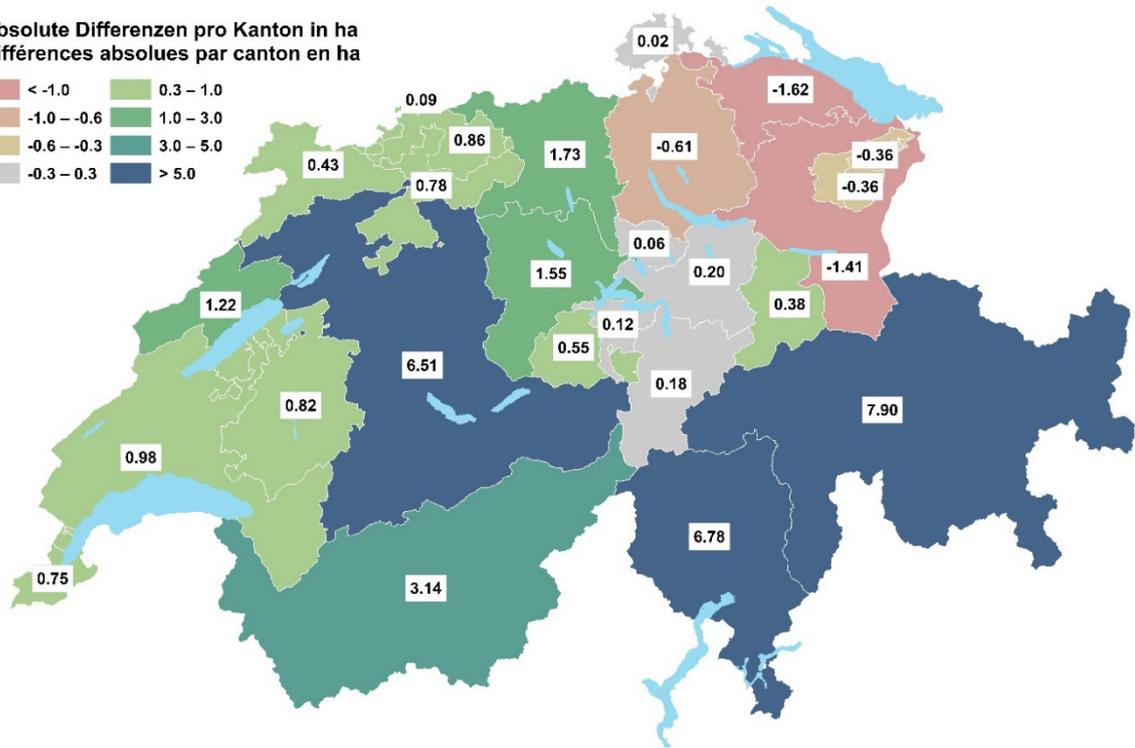
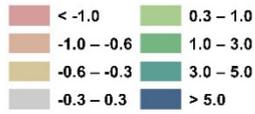


Figure 2-20 : différences de surfaces absolues par canton [en ha] à la suite du changement de cadre de référence MN03 → MN95

Relative Differenzen pro Kanton in ppm (0.0001%)
Différences relatives par canton en ppm (0.0001%)

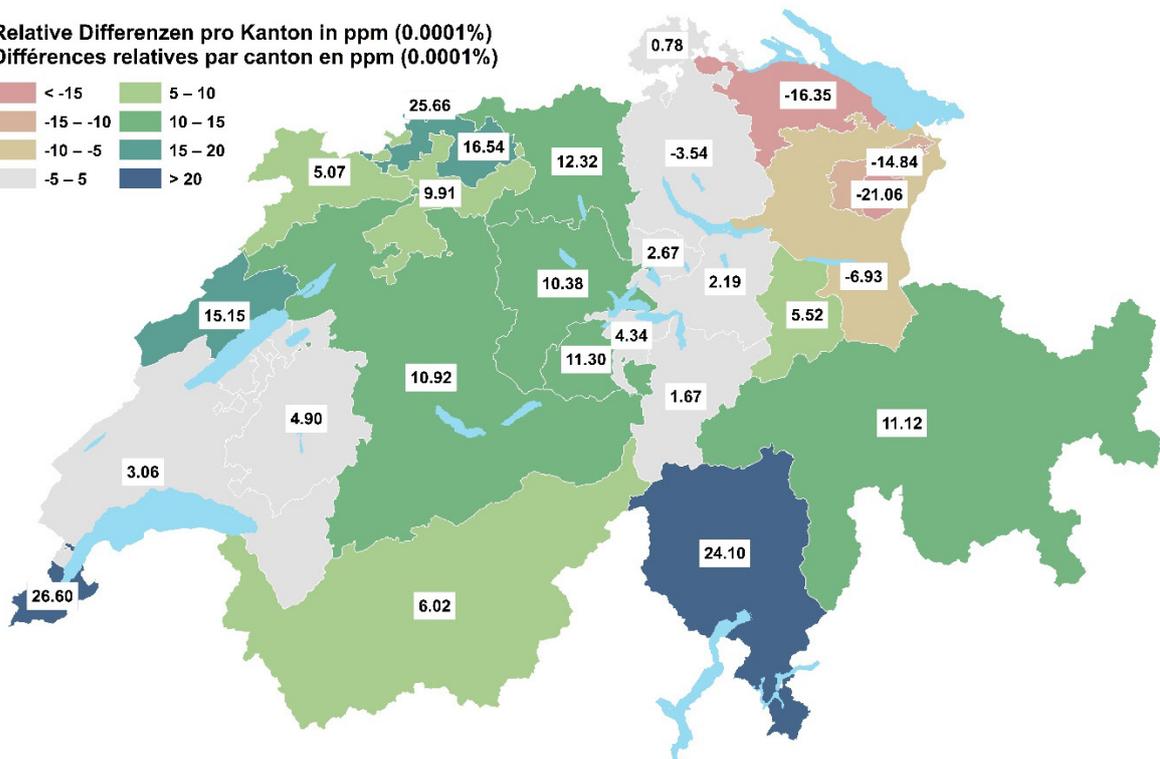
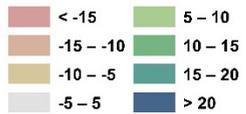


Figure 2-21 : différences de surfaces relatives par canton [en ppm] à la suite du changement de cadre de référence MN03 → MN95



2.4.4 Etat actuel et développements futurs possibles

Tableau 2-5 : réseau de référence GNSS MN95 (réseau national MN95) : état et développements futurs possibles

Etat en 2022	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Mise en place du réseau de référence GNSS achevée.• Six époques de mesure (selon un cycle de six ans : 1989–94 (valeur moyenne : 1992) / 1998 / 2004 / 2010 / 2016 / 2022) et les cadres de référence associés CHTRFyy sont disponibles.• La qualité des stations et des coordonnées est prouvée. Des séries temporelles sont disponibles.• La documentation est complète (rapports, FPDS).• La mise à jour et la maintenance sont garanties et contrôlées dans le cadre de la gestion de la qualité du domaine.	<ul style="list-style-type: none">• Extension par des points de référence dans des zones intéressantes du point de vue géologique / tectonique et dans les pays voisins.• Poursuite des études cinématiques et détermination d'un modèle cinématique de la Suisse (cf. § 2.9).• Documentation du sous-sol géologique des points MN95 et de leur adéquation pour des études néotectoniques.• Au besoin, évolution de points MN95 intéressants pour en faire des stations permanentes GNSS.

Références bibliographiques relatives à 2.4 :

Une liste exhaustive de swisstopo Reports et de publications relatives au réseau de référence GNSS réseau national MN95 (réseaux spéciaux inclus) ainsi qu'à CHTRF figure à l'annexe 2.3.4.



2.5 Réseau gravimétrique national RGN2004

2.5.1 Objectif stratégique et concept

Base de l'ensemble des travaux gravimétriques et notamment de la détermination du géoïde et du calcul d'un cadre de référence altimétrique rigoureux (RAN95), le réseau gravimétrique de base existant est renouvelé et complété. Les données de mesure gravimétriques existantes font l'objet d'une compensation incluant de nouvelles mesures absolues et relatives, les résultats étant documentés sous l'appellation de « réseau gravimétrique national RGN ». Le RGN fait partie intégrante de la mensuration nationale, de sorte qu'il incombe à swisstopo d'en assurer l'entretien et la tenue à jour. Les données sont gérées et rendues accessibles aux utilisateurs.

Tous les travaux relevant de la mensuration nationale gravimétrique en Suisse sont regroupés sous l'intitulé de réseau gravimétrique national (RGN), si bien que ce dernier est à considérer comme un élément supplémentaire des œuvres de la mensuration nationale OMN95 (Marti et Schneider, 2004). S'il vise en premier lieu à servir de référence pour le nouveau système altimétrique RAN95, rigoureux et lié au champ de pesanteur, le RGN sert également de base pour le relevé gravimétrique national et pour d'autres projets géologiques et géophysiques. Ces saisies de données denses sur des zones bien définies sont principalement utilisées en géophysique (exploration de sites de stockage souterrains, etc.). En mensuration nationale, elles jouent surtout un rôle pour la détermination du géoïde, l'interpolation de la pesanteur et la réduction gravimétrique des nivellements (calcul de cotes géopotentielle) lors de la détermination des altitudes dans le cadre de RAN95.

Un réseau gravimétrique national (réseau gravimétrique de base) moderne se fonde sur quelques mesures gravimétriques absolues de haute précision avec une incertitude de mesure combinée de l'ordre de $3 \mu\text{Gal}$ ($= 3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$). Ce réseau gravimétrique de base d'ordre 0 sert de colonne vertébrale et peut être densifié pour former les réseaux gravimétriques du 1^{er} au 3^{ème} ordre, via des mesures relatives précises répétées vers d'autres points. Les gravimètres absolus modernes sont régulièrement comparés entre eux lors de campagnes internationales et fournissent la pesanteur directement, sans erreurs systématiques notables, avec une précision élevée. Le rattachement à un réseau d'ordre supérieur est rendu superflu par ce mode opératoire. L'Institut fédéral de métrologie (METAS) possède le seul gravimètre absolu de Suisse et est en mesure de réaliser le canevas primordial d'un réseau gravimétrique de base suisse. Cet instrument à chute libre du type FG5 de MicroG-Lacoste répond aux normes actuelles applicables à la mesure de référence absolue dans le cadre de la mensuration nationale gravimétrique.

Outre le réseau gravimétrique de base, les mesures gravimétriques nécessaires à la correction gravimétrique et à la compensation rigoureuse de réseaux de nivellement font elles aussi partie intégrante du réseau gravimétrique national. Ces mesures effectuées sur des points principaux et auxiliaires du nivellement fédéral sont indispensables pour calculer des cotes géopotentielle, des altitudes orthométriques et des altitudes normales. Ces points, avec leurs valeurs gravimétriques mesurées, font partie intégrante d'un cadre altimétrique moderne (RAN95) et sont également documentés dans ce contexte.

Les données gravimétriques de référence du RGN font partie de l'« Infrastructure nationale de données géographiques (INDG) » en tant que géodonnées de base et sont rendues accessibles au public en tant que telles. La maintenance et la tenue à jour du RGN sont par ailleurs garanties.

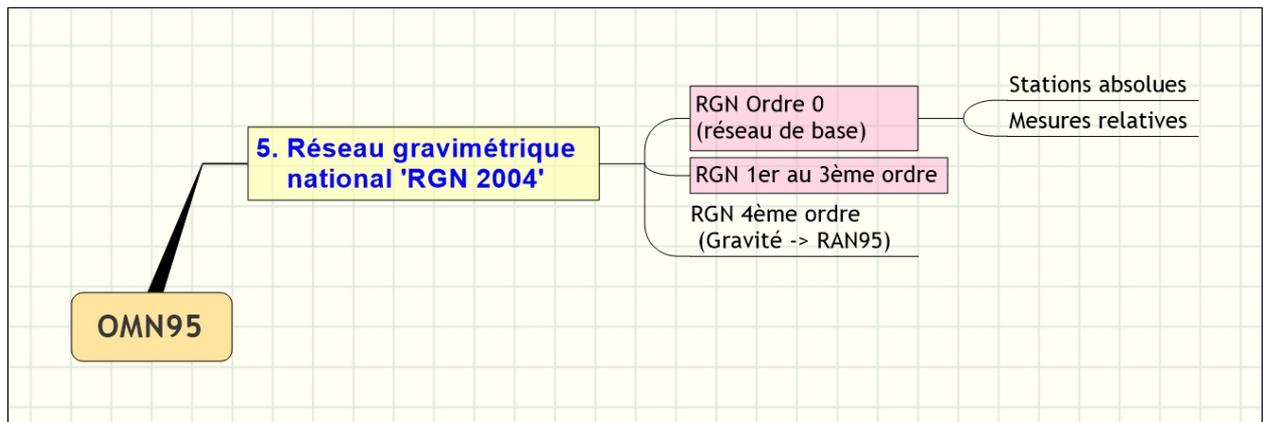


Figure 2-22 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 5 – réseau gravimétrique national RGN 2004

2.5.2 Rappel historique

La géodésie et la mensuration nationale se penchèrent sur la question de la pesanteur dès le début du 20^e siècle. En 1902, lorsqu'ils définirent le système altimétrique pour la mensuration nationale, les professionnels savaient pertinemment qu'une définition rigoureuse d'un système altimétrique devait impérativement tenir compte du champ de pesanteur. Des raisons pratiques qui ne seront pas développées plus avant ici expliquent le fait que ces principes n'aient pas pu être respectés lors de la réalisation du système par le nivellement fédéral et le cadre des altitudes usuelles NF02.

Le premier réseau gravimétrique de base national de la Suisse vit le jour en 1953 (RG53) sous la direction de la CGS (Hunziker, 1959). Il comportait 123 stations coïncidant majoritairement avec des PFA1 (sauf quelques stations sur des aéroports pour la liaison avec l'étranger). Il fut réalisé au moyen de gravimètres relatifs statiques de type Worden et sa précision était d'environ 0,1 mGal. Des mesures gravimétriques systématiques furent effectuées pour la première fois en 1956 le long du nivellement fédéral, pour le calcul d'altitudes orthométriques rigoureuses et pour les besoins du réseau de nivellement européen REUN (UELN aujourd'hui).

Les mesures gravimétriques exécutées dans les années 1960 et 1970 donnèrent naissance au « Swiss National Gravity Net » (SNGN) qui fut publié en 1983 (Fischer, 1983). Il comportait 112 points (surtout des PFA1) et fut réalisé à l'aide de gravimètres relatifs Lacoste&Romberg. Il put se fonder sur des mesures absolues pour la toute première fois, entreprises entre 1978 et 1980 à Zurich, Brigue, Coire et Interlaken. Depuis 1974, des mesures gravimétriques étaient aussi réalisées systématiquement sur les lignes du nivellement fédéral observées la même année.

Une refonte complète du réseau gravimétrique de base (RG95) eut lieu entre 1993 et 1995 [Arnet et Klingelé, 1997]. Les cinq stations absolues mesurées en 1994 (Zurich, Coire, Lausanne, Pratteln et Monte Ceneri) formaient sa colonne vertébrale. Ces mesures furent réalisées en 1994 par nos collègues autrichiens du BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) avec leur gravimètre absolu JilaG-6. On se servit de gravimètres Lacoste&Romberg pour la densification. On ne privilégia plus les PFA1 comme points de densification du 1^{er} et 2^{ème} ordre, mais les points principaux du réseau GPS MN95, si bien que RG95 n'est que faiblement relié aux réseaux gravimétriques antérieurs.

Pour des développements complets relatifs à l'historique de la gravimétrie en Suisse, on voudra bien se reporter aux [swisstopo Report 04-08] ainsi qu'à [swisstopo-Doku 23 – LV95 – Teil 15: Das Landeschwerenetz LSN2004, non traduit]



2.5.3 Mise en place du RGN

La mise en place du réseau gravimétrique national a débuté en 2004. Ce réseau très hiérarchisé sert de base aux mesures gravimétriques locales, telles qu'elles sont requises pour la correction du nivellement fédéral ou pour des projets géophysiques. Il se fonde pour l'essentiel sur son prédécesseur RG95 (réseau gravimétrique de base de 1995), les points détruits dans l'intervalle n'ayant cependant pas tous été remplacés. La colonne vertébrale (réseau d'ordre 0) du réseau gravimétrique national est formée par des mesures gravimétriques absolues sur une dizaine de points répartis dans toute la Suisse (cf. Figure 2-23). Ces points stables et durablement matérialisés sont observés en collaboration avec l'Institut fédéral de métrologie (METAS) à l'aide de son gravimètre à chute libre FG5 (numéro de série 209, converti en FG5x en 2012). La précision qu'une mesure absolue peut atteindre se monte à quelques μGal ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ms}^{-2}$). Les stations absolues sont également reliées entre elles pour contrôle par des mesures gravimétriques relatives. Elles sont effectuées avec un instrument Scintrex CG-5 depuis 2005. La précision de ces mesures est peu ou prou du même ordre de grandeur que celle des mesures absolues. Le RGN2004 est densifié par un réseau de 1^{er} ordre qui se compose d'environ 15 points stables et aisément accessibles du RAN et du réseau MN95. Seules des mesures gravimétriques relatives sont exécutées en ces points. Une densification supplémentaire (réseau de 2^{ème} ordre) s'appuie pour l'essentiel sur l'ensemble des points principaux MN95.

Toutes les mesures gravimétriques absolues et relatives du RGN sont compensées ensemble. Des paramètres de dérive (drift) et des facteurs d'échelle pour les différents gravimètres font partie des inconnues du calcul en plus des valeurs gravimétriques des points. L'écart-type d'une valeur gravimétrique est aujourd'hui compris entre 2 et 8 μGal pour des points stables.

La mise en relation du RGN avec MN95 et le RAN a notamment permis de faire l'économie de travaux de documentation et d'entretien supplémentaires. Le RGN a aussi pu être intégré sans grande charge de travail supplémentaire dans le service de données sur les points fixes (FPDS). Il est ainsi publié.

2.5.4 RGN d'ordre 0

RG95 se fondait sur des mesures gravimétriques absolues sur cinq stations en Suisse (Lausanne, Pratteln, Zurich, Monte Ceneri, Coire). Ces points devaient tous continuer à être utilisés pour le RGN. Malheureusement, le point de Pratteln a été détruit tout comme l'ancien point absolu à Brigue. Une solution de remplacement a été mise en place à proximité immédiate dans les deux cas. Pour compléter les stations absolues existant déjà, on ajouta des points pour le RGN à Zimmerwald, à Wabern (au METAS), à Andermatt (en remplacement des points difficilement accessibles de Bözberg et Guspisbach dans le tunnel routier du Saint-Gothard) et à Zerne. Ces dix points étaient complétés par les sept points de la ligne de calibration Interlaken-Jungfrauoch, par trois points au CERN, par le point dans le laboratoire de roches du Mont Terri, par trois points de rattachement en Autriche et deux autres en Allemagne. Ces 26 points forment le RGN d'ordre 0 (cf. Figure 2-23). La station absolue à Milan faisant le lien avec le réseau italien a été détruite et ne peut plus être utilisée. Si le lien avec le réseau français est bel et bien établi, les mesures absolues françaises ne sont pas considérées comme faisant partie intégrante du RGN d'ordre 0 parce qu'elles sont de moindre précision.

Une station absolue doit être installée dans un bâtiment clos, FG5 n'étant pas un appareil de terrain. Les points sont de préférence mis en place dans des installations militaires, des locaux de la protection civile et des églises dans l'espoir qu'ils bénéficient ainsi d'une conservation à long terme. Ils doivent être à l'abri des vibrations (à bas bruit) et hors des zones d'eaux souterraines. Les stations absolues se trouvant généralement dans des espaces clos, des excentres accessibles librement sont mis en place à proximité immédiate, liés à la station absolue par des mesures relatives de haute précision. Le gradient de pesanteur vertical doit être mesuré sur toutes les stations absolues, pour permettre l'association avec les mesures relatives.

Un accord a été conclu avec le METAS, afin qu'une mesure par an soit effectuée à Zimmerwald (en tant que contribution à ECGN) et qu'une à deux autres stations soient observées chaque année. Le but est que les mesures absolues sur une station soient répétées tous les dix ans au moins et que leur écart-type dans la compensation globale soit inférieur à 3 μGal . Il a pu en être ainsi jusqu'à présent.

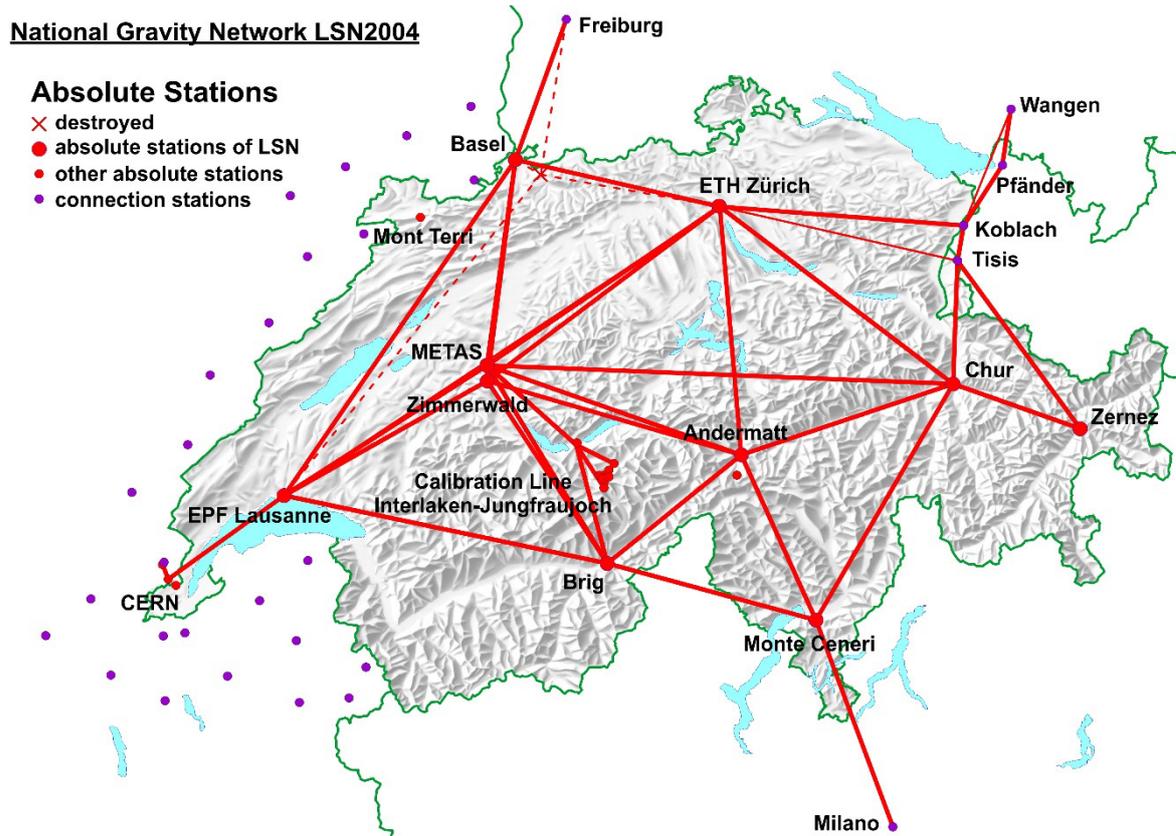


Figure 2-23 : réseau gravimétrique d'ordre 0 du RGN et stations absolues supplémentaires

2.5.5 RGN de 1^{er} et 2^{ème} ordre

Les points du RGN de 1^{er} et 2^{ème} ordre sont déterminés au moyen de mesures relatives. La distinction entre points du 1^{er} et du 2^{ème} ordre repose sur des raisons historiques et a été reprise telle quelle de RG95. Les points du 1^{er} ordre sont stables, stationnables très facilement et sont mesurés un peu plus souvent que les points de 2^{ème} ordre. C'est pourquoi ils ont aussi tendance à obtenir de meilleurs écarts-types dans la compensation globale.

Le RGN de 1^{er} ordre est constitué de 17 points. Cinq d'entre eux sont des points principaux de MN95 (dont l'un est aujourd'hui détruit) et douze sont des PFA1 pour la liaison avec le RAN et des réseaux gravimétriques plus anciens. La précision des valeurs gravimétriques compensées des points du 1^{er} ordre et de l'ordre de 2 à 4 μGal .

Le réseau de base de 2^{ème} ordre est formé pour l'essentiel par les points principaux de MN95. Deux PFA1 à Sankt-Margrethen et Vinadi viennent encore s'y ajouter en tant que liaisons supplémentaires avec le réseau gravimétrique autrichien, de même les quatre points (PFA2) de la base d'étalonnage de Mollendruz de l'Université de Lausanne. La précision de ces points, comprise entre 2 et 10 μGal (avec une moyenne de 5 μGal), est à peine moins bonne que celle des points du 1^{er} ordre.

Les mesures relatives dans le RGN commencèrent en 2005 et eurent pour but principal jusqu'en 2009 d'assurer la liaison entre les nouvelles stations absolues (Brigue, Bâle, Andermatt, Zerne) et le reste du réseau. Ces mesures furent effectuées jusqu'en 2007 avec l'instrument Scintrex CG-5 de l'Université de Lausanne. A partir de 2009, c'est le CG-5 acquis conjointement par swisstopo et l'ETH Zurich qui fut mis en œuvre et à partir de 2012, on entreprit une nouvelle mesure systématique de l'ensemble du réseau, de l'ordre 0 au 2^{ème} ordre. La première mesure fut achevée en 2015. Tous les points ont désormais été mesurés deux fois au moins. L'objectif est d'observer chacun des points tous les cinq ans au moins et d'atteindre un écart-type inférieur à 8 μGal .



RGN de l'ordre 0 au 2^{ème} ordre

- Stations absolues (ordre 0)
- Points de 1^{er} ordre
- Points de 2^{ème} ordre
- Stations de connexion
- Points détruits

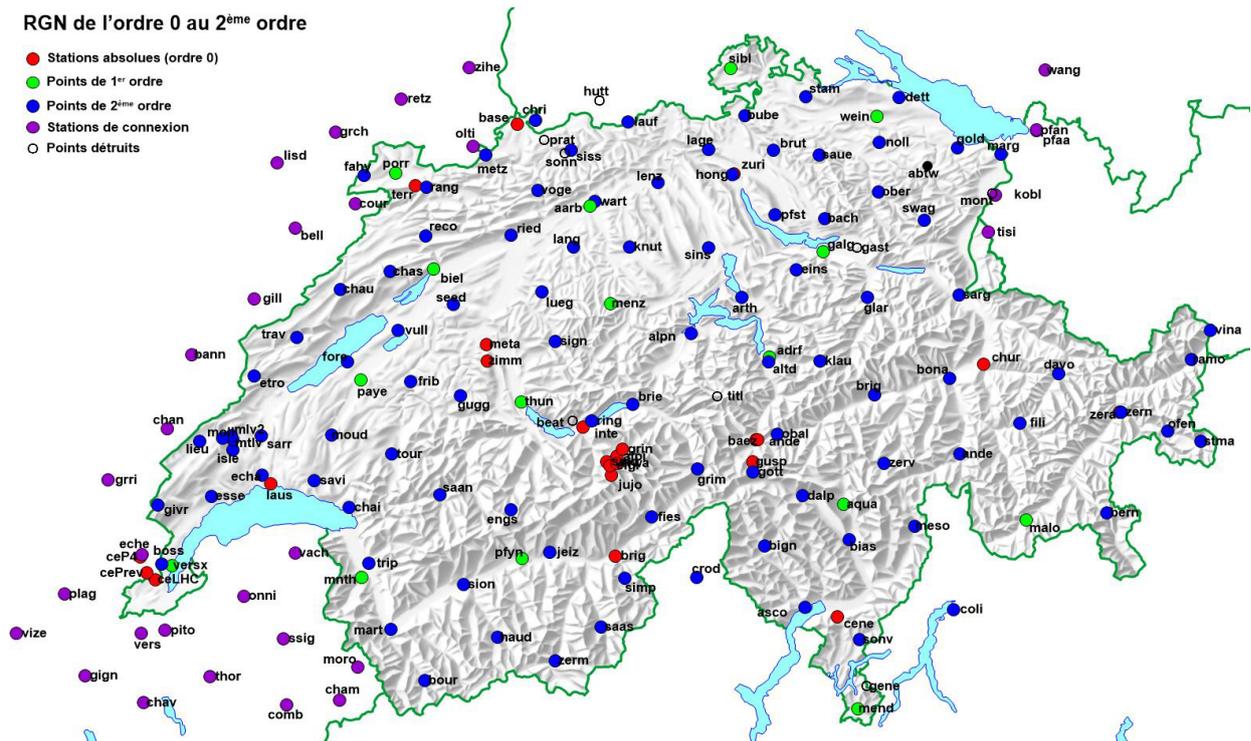


Figure 2-24 : réseau gravimétrique national de l'ordre 0 au 2^{ème} ordre

2.5.6 RGN de 3^{ème} ordre

En guise d'extension du concept de 2004 [swisstopo Report 04-08], on commença dès 2015 à densifier le RGN et un RGN de 3^{ème} ordre fut introduit. Cette extension visait un double objectif : raccourcir les trajets pour des campagnes de mesures locales, mais d'abord et avant tout améliorer la liaison avec les réseaux gravimétriques plus anciens. Il s'agissait non seulement de pouvoir évaluer la précision et de pouvoir transformer des mesures gravimétriques plus anciennes, mais également de parvenir à détecter des modifications de la pesanteur dans la durée.

C'est pourquoi le RGN de 3^{ème} ordre se compose principalement de PFA1 (et de PFA2) déjà utilisés dans des réseaux gravimétriques de base antérieurs. Dans les régions dépourvues de réseaux de PFA, ce sont surtout des points de densification de MN95 qui ont été utilisés. Les points de 3^{ème} ordre sont eux aussi intégrés à la compensation globale du RGN. Certains de ces points n'étant cependant pas très stables et n'ayant pas encore été observés souvent, il est très fréquent que leurs écarts-types soient bien éloignés de ceux des points de 2^{ème} ordre.

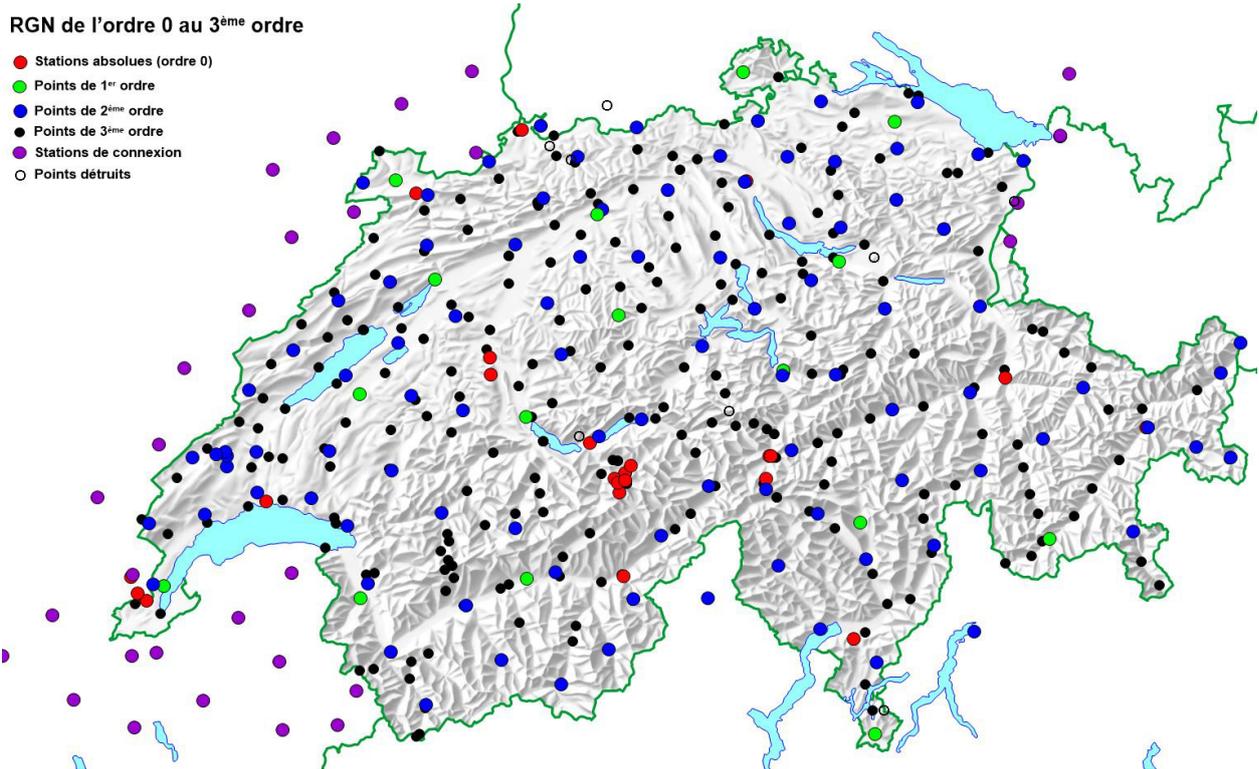


Figure 2-25 : RGN de l'ordre 0 au 3^{ème} ordre (état en 2020)

2.5.7 Ligne de calibration Interlaken–Jungfrauoch

Si le facteur d'échelle d'un gravimètre relatif est déterminé par le fabricant, il doit cependant faire l'objet de contrôles réguliers et d'une adaptation au besoin. C'est généralement une ligne de calibration (base d'étalonnage) gravimétrique qui sert à cette opération, dotée de stations gravimétriques absolues et d'un écart en pesanteur aussi marqué que possible, objectif qui est atteint le plus simplement via une forte dénivelée entre les stations.

Une base d'étalonnage a donc été mise en place dès 1980 entre Interlaken et la Jungfrauoch, les deux extrémités de la ligne ayant fait l'objet de mesures absolues. La base d'étalonnage a été complétée par cinq points intermédiaires en lesquels seules des mesures relatives ont été réalisées. Au total, l'écart gravimétrique sur la ligne de calibration dépasse 600 mGal.

Les activités sur la base d'étalonnage ont repris en 2010, dans le cadre d'un projet commun de swisstopo, de l'ETH Zurich et du METAS. Entre 2010 et 2015, des mesures absolues furent effectuées sur sept stations (Interlaken, Grindelwald, Alpiglen, Kleine Scheidegg, Eigergletscher, Eigerwand, Jungfrauoch). Les stations ont été mises en place en des lieux aisément accessibles, à proximité des anciennes stations de 1980, donc principalement aux arrêts du chemin de fer de la Jungfrau entre Grindelwald et la Jungfrauoch (Marti, 2017).

Une première campagne de mesures d'une certaine ampleur menée avec des gravimètres relatifs eut lieu en 2013 avec trois types de gravimètres différents (Scintrex CG-5, ZLS Burris, LaCoste&Romberg). Lors d'une autre campagne à mentionner ici, menée en 2017, les quatre instruments de type CG-5 disponibles en Suisse (ETHZ/swisstopo, Uni Lausanne, Uni Neuchâtel, RBR/geo2x) purent être comparés entre eux.

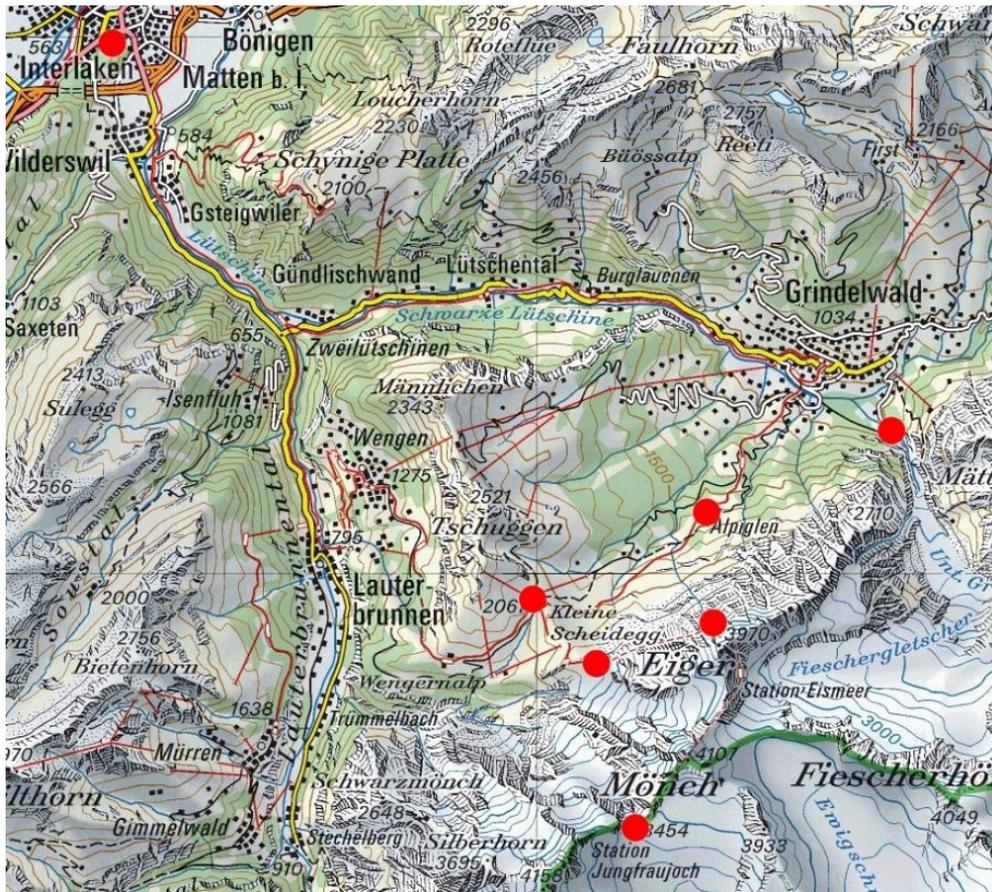


Figure 2-26 : stations absolues de la base d'étalonnage Interlaken-Jungfrauoch

2.5.8 Pesanteurs pour le RAN (RGN de 4^{ème} ordre)

Outre le réseau gravimétrique de l'ordre 0 au 3^{ème} ordre, les mesures gravimétriques effectuées sur des points du RAN font elles aussi partie intégrante du RGN. Ces mesures sont nécessaires pour calculer des cotes géopotentielles et déterminer des altitudes normales et orthométriques à partir d'elles. Depuis 1974, des mesures gravimétriques sont réalisées, en principe la même année, sur les lignes du RAN qui font l'objet d'un nouveau nivellement. Il n'est pas nécessaire ici que des mesures gravimétriques soient effectuées sur tous les points du RAN. Sur les points en lesquels aucune pesanteur n'est mesurée, la valeur gravimétrique est déduite par interpolation de mesures réalisées sur des points environnants, avec une précision d'environ 1 mGal, ce qui est suffisant pour calculer des cotes géopotentielles de précision submillimétrique. La règle empirique suivante s'applique : une pesanteur doit être mesurée chaque kilomètre environ et en terrain accidenté, tous les 30 mètres de dénivellée (écart gravimétrique de 10 mGal).

Les mesures gravimétriques pour le RAN ne sont pas intégrées dans la compensation globale du RGN, mais sont traitées comme des campagnes isolées. Elles prennent toutefois appui sur des points du RGN de l'ordre 0 au 2^{ème} ordre.

Jusqu'à aujourd'hui, des pesanteurs ont été mesurées sur environ 7000 PFA1 et points auxiliaires du RAN. Depuis 2018, des mesures gravimétriques sont disponibles sur l'intégralité des lignes du RAN (lignes principales et secondaires). Ces mesures sont documentées dans le service de données sur les points fixes (FPDS), pour les PFA concernés.

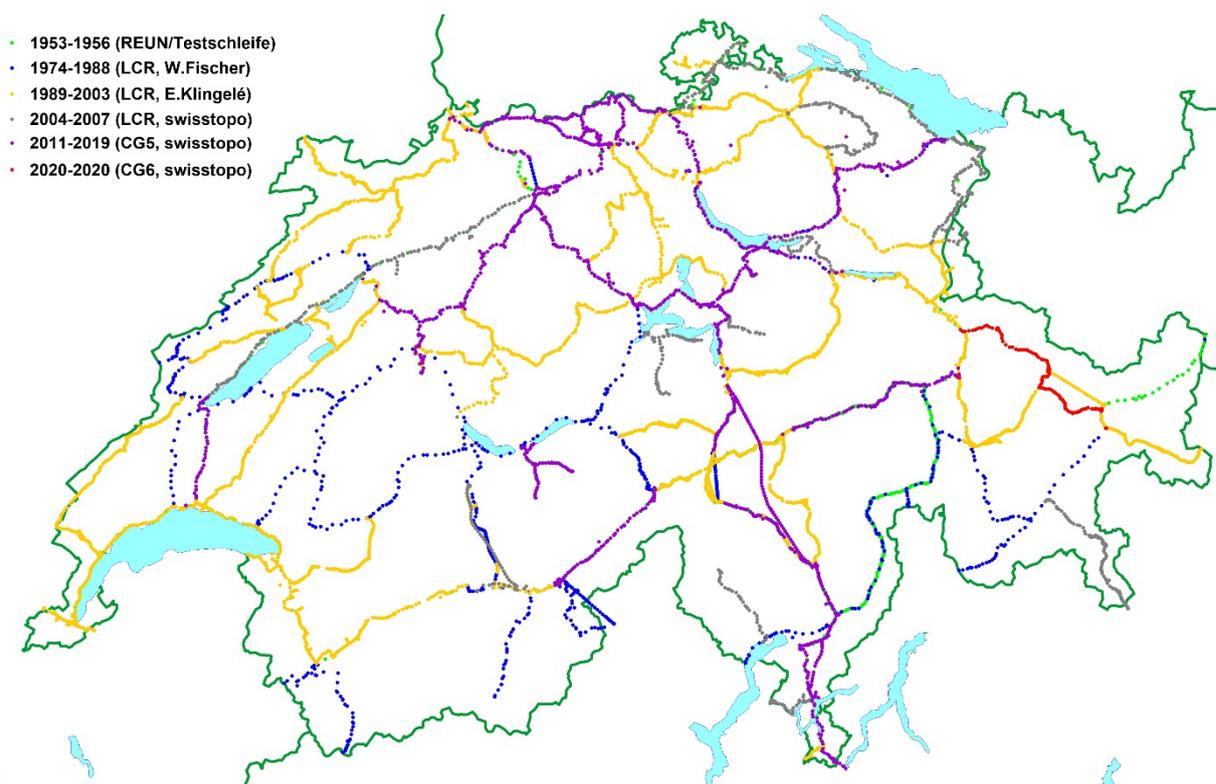


Figure 2-27 : mesures gravimétriques pour le RAN (état en 2020)

2.5.9 Etat actuel et développements futurs possibles

La mise en place du RGN est achevée. Toutes les stations absolues nécessaires sont bien en place et ont été mesurées une fois au moins, tout comme la ligne de calibration Interlaken-Jungfrauoch. Tous les points de 1^{er} et de 2^{ème} ordre ont été observés deux fois au moins jusqu'à présent. L'intégration d'un réseau de 3^{ème} ordre a également permis d'assurer une bonne liaison avec des réseaux gravimétriques plus anciens. Après chaque campagne de mesures d'une certaine ampleur, une compensation globale de l'ensemble du réseau, de l'ordre 0 au 3^{ème} ordre, est effectuée en standard. Les valeurs gravimétriques sont principalement documentées et rendues accessibles à tous via map.geo.admin.ch, où les valeurs les plus récentes sont toujours publiées.

Les mesures absolues doivent aussi continuer à être répétées tous les dix ans pour contrôler la stabilité des stations et mettre en lumière des modifications de la pesanteur sur le temps long. Les points du 1^{er} au 3^{ème} ordre doivent également être observés régulièrement pour garantir la bonne conservation du réseau dans la durée.

Les mesures gravimétriques pour le RAN doivent se poursuivre. Le premier objectif est de remplacer les mesures datant des années 1950 par de nouvelles mesures de meilleure qualité.



Etat actuel et développements futurs possibles

Tableau 2-6 : réseau gravimétrique national RGN2004 : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Le RGN2004 est en place et a été intégralement mesuré pour la première fois.• Les résultats de la compensation sont disponibles et sont publiés sur map.geo.admin.ch.• Des mesures gravimétriques sont disponibles sur toutes les lignes du RAN depuis 2018.• swisstopo est en mesure d'exécuter de manière indépendante la totalité des mesures relatives.• La collaboration avec le METAS pour les mesures gravimétriques absolues est bien établie.	<ul style="list-style-type: none">• Répétition des mesures absolues avec une périodicité de dix ans.• Entretien du réseau par des mesures relatives régulières.• Détermination de modifications de la pesanteur sur le temps long en lien avec le modèle cinématique CHKM95.• Remplacement des anciennes mesures gravimétriques pour le RAN.• Création d'une banque de données de toutes les mesures gravimétriques de Suisse.

Références bibliographiques relatives à 2.5 :

Les swisstopo Reports et d'autres publications concernant des mesures gravimétriques, le réseau gravimétrique de base et le réseau gravimétrique national RGN2004 figurent à l'annexe 2.3.5.



2.6 Réseau altimétrique national RAN95

2.6.1 Objectif stratégique

Dans le cadre des œuvres de la mensuration nationale OMN95, swisstopo élabore un nouveau réseau altimétrique national (RAN95) rigoureux du point de vue de la théorie du potentiel, tenant compte de la modification des altitudes dans le temps et rattaché aux cadres de référence altimétriques européens. Pour sa réalisation, les mesures du nivellement fédéral de toutes les époques sont réunies au sein d'une compensation cinématique, intégrant aussi des mesures gravimétriques et GNSS (MN95, AGNES) ainsi qu'un modèle du géoïde. Le cadre résultant (RAN95) est considéré comme étant la référence primaire de la mensuration nationale. Tant que la MO en aura besoin, le cadre de référence altimétrique antérieur déformé (système des altitudes usuelles NF02) en sera déduit.

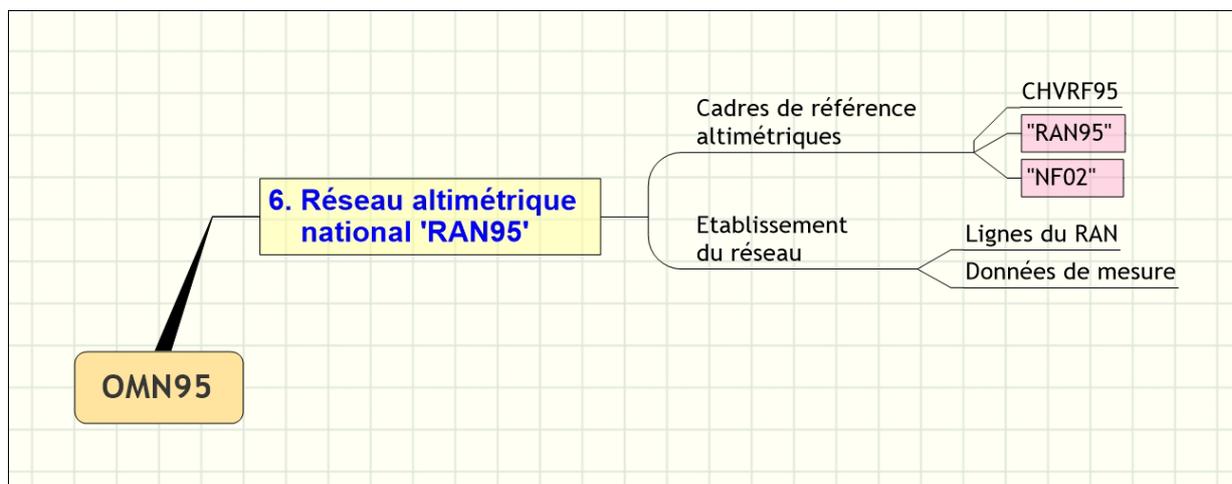


Figure 2-28 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 6 – réseau altimétrique national RAN95

2.6.2 Travaux relatifs au projet partiel du réseau altimétrique national RAN95

Il était prévu d'emblée, avec le projet « Mensuration nationale 1995 », d'introduire un cadre de référence altimétrique moderne, fondé sur un système altimétrique rigoureux du point de vue de la théorie du potentiel. Le réseau altimétrique national RAN95 devait permettre une bien meilleure utilisation des méthodes de mesure de la géodésie par satellites pour la détermination des altitudes, en conjonction avec le nouveau modèle du géoïde. Il n'a jamais été question de procéder à une nouvelle mesure de toutes les lignes du nivellement fédéral. Le nouveau réseau altimétrique national RAN95 s'appuie pour l'essentiel sur les mesures de nivellement et sur les mesures gravimétriques, majoritairement répétées à plusieurs reprises, effectuées entre 1903 et aujourd'hui sur les lignes du nivellement fédéral (cf. Figure 2-29).



National Levelling Network Measurements 1903 - 2021

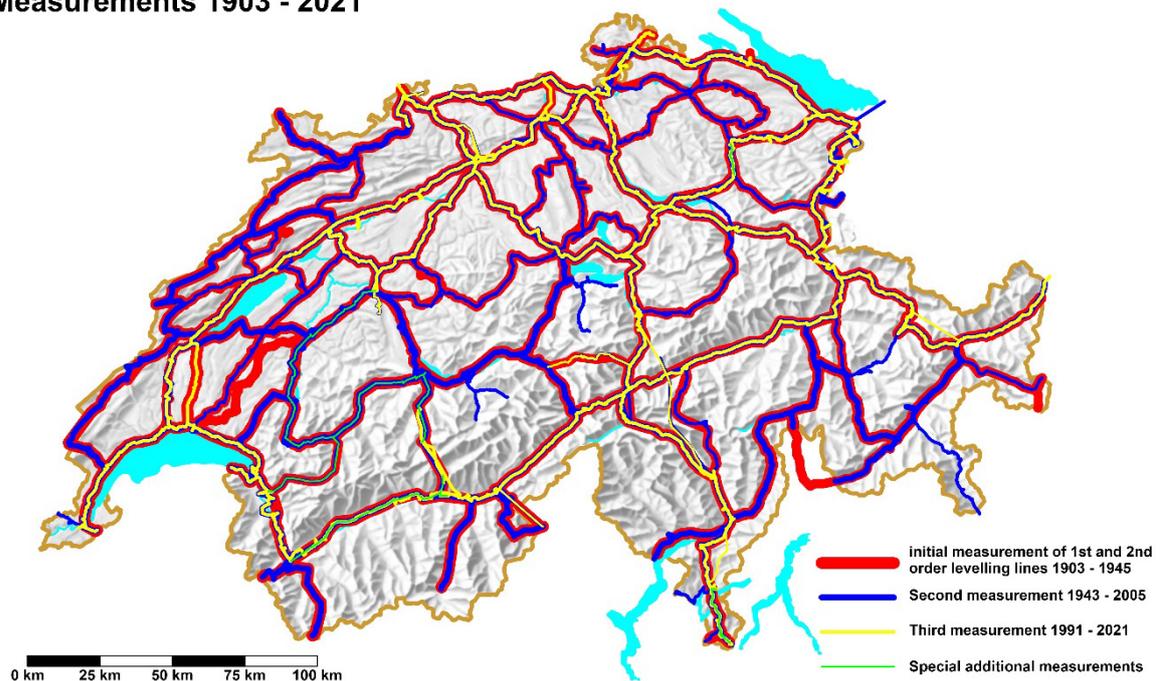


Figure 2-29 : mesures effectuées dans le réseau altimétrique national entre 1903 et 2021

C'est surtout pour pouvoir disposer d'une base altimétrique solide pour les projets d'ingénierie d'envergure (comme les deux tunnels de base du Saint-Gothard et du Lötschberg traversant les Alpes, AlpTransit) qu'une sérieuse impulsion a été donnée à la numérisation des mesures du nivellement fédéral à partir de 1996. Contrairement aux altitudes usuelles de la mensuration officielle MO (cadre de référence officiel, nivellement fédéral NF02), les altitudes de RAN95 sont calculées et compensées de façon rigoureuse au sens de la théorie du potentiel comme des altitudes orthométriques par rapport au géoïde. Si les variations spatiales du champ de pesanteur terrestre sont prises en compte, les mouvements tectoniques récents aux points de mesure sont aussi modélisés en soumettant les mesures répétées du nivellement fédéral à une compensation cinématique (cf. Figure 2-30).

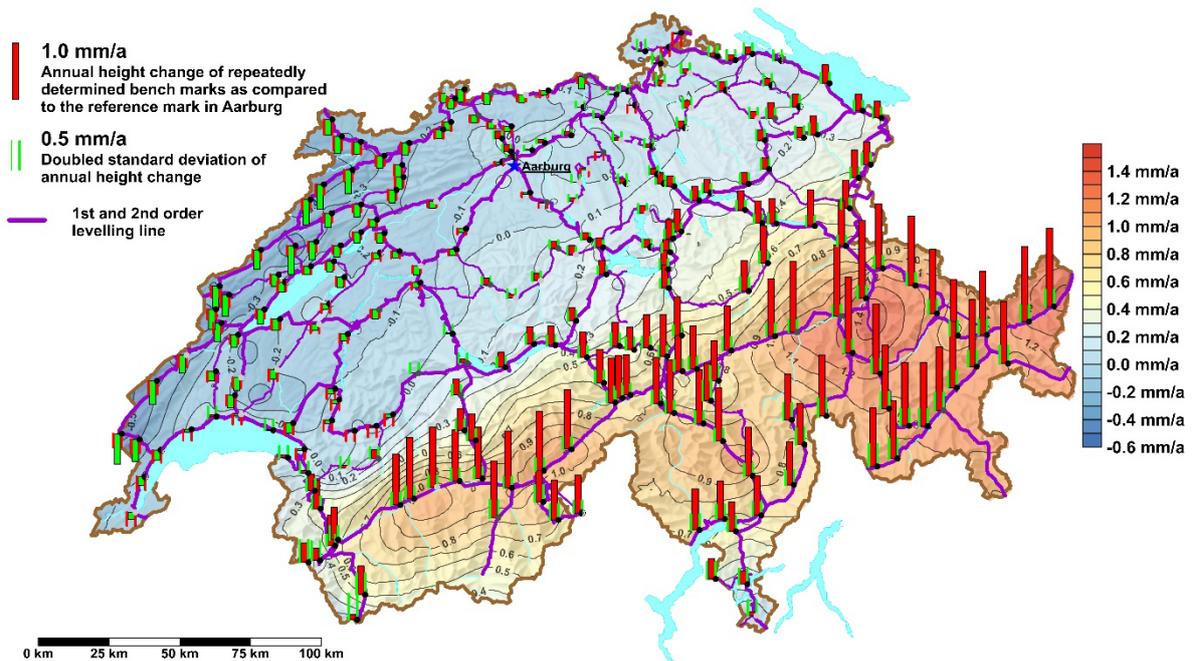


Figure 2-30 : modifications d'altitudes récentes à partir des mesures du nivellement fédéral (état en 2021)

RAN95 peut cependant être considéré comme un cadre statique (en dépit du soulèvement alpin atteignant jusqu'à 1,5 mm/an). Avec le modèle cinématique de RAN95 (modèle RCM04), les altitudes sont converties à l'instant de référence $t_0 = 1993.0$. L'horizon altimétrique n'a pas été modifié, de manière parfaitement délibérée. Le potentiel gravimétrique (autrement dit l'altitude orthométrique du point fondamental à Zimmerwald) a été déterminé de telle sorte que le Repère Pierre du Niton conserve l'altitude de 373,6 m et un statut d'origine virtuelle. Par rapport à Zimmerwald, les altitudes résultantes présentent des erreurs moyennes maximales de 2 cm à l'échelle du pays entier. Le bénéfice majeur de RAN95 réside toutefois dans l'interaction parfaitement fluide entre les altitudes ellipsoïdales de MN95 et le modèle du géoïde (Figure 2-31).

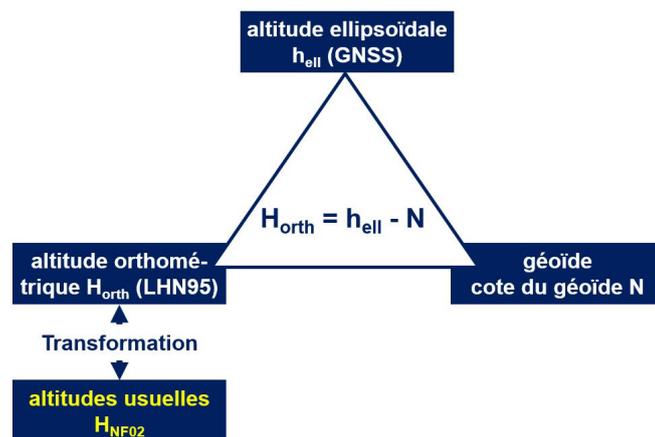


Figure 2-31 : liens entre le géoïde, l'ellipsoïde, RAN95 et les altitudes usuelles NF02

Pour parvenir à une parfaite cohérence entre le modèle du géoïde, les altitudes orthométriques RAN95 et les altitudes ellipsoïdales, des altitudes RAN95 ont été calculées pour 193 points GNSS / de nivellement, ce qui a abouti à un positionnement quasi-contraint du modèle du géoïde (cf. chapitre Modèle du géoïde CHGeo2004).



Les questions suivantes se posent notamment en cas d'introduction officielle éventuelle de RAN95 en pratique en mensuration (mensuration officielle, SIG, etc.) :

- Les coordonnées MN95 peuvent être identifiées clairement au moyen de marqueurs spécifiques (False Northing / False Easting), évitant ainsi tout risque de confusion avec les données de la MN03. Cette approche n'est cependant pas transposable aux altitudes. Les valeurs altimétriques dans les cadres de référence NF02 et RAN95 ne se différencient les unes des autres qu'au niveau décimétrique (cf. Figure 2-32), si bien qu'un risque élevé de confusion existe lors de l'utilisation au sein de listes et sur des plans.
- Un autre problème résulte de la cinématique néotectonique de la croûte terrestre superficielle qui devient clairement perceptible au bout de quelques années à peine pour un cadre de référence altimétrique de précision millimétrique. Si l'on introduisait le cadre de référence altimétrique RAN95 en 2023 de manière statique avec l'instant de référence $t_0=1993.0$, des écarts systématiques de l'ordre de 6 cm déjà apparaîtraient pour la dénivelée entre Saignelégier (JU) et Bonaduz (GR) (cf. Figure 2-30).
- Un système altimétrique moderne de la Suisse devrait être eurocompatible, c.-à-d. adapté ou rattaché au futur système de référence altimétrique européen (EVRS) aussi bien en termes de choix du système (normal ou orthométrique) que de datum altimétrique (horizon de référence).

Les responsables de la mensuration nationale ne parvinrent pas à imposer leurs vues en 2001 pour remplacer les altitudes usuelles NF02 par RAN95. Indépendamment de cette décision, il était prévu dès l'origine de proposer une possibilité de conversion approchée entre RAN95 et le cadre des altitudes usuelles NF02. Le logiciel de transformation HTRANS est disponible depuis 2005 et est aussi intégré aujourd'hui dans le programme REFRAME. Les différences entre RAN95 et NF02 sont représentées sur la Figure 2-32 en 1430 points d'appui du réseau altimétrique national.

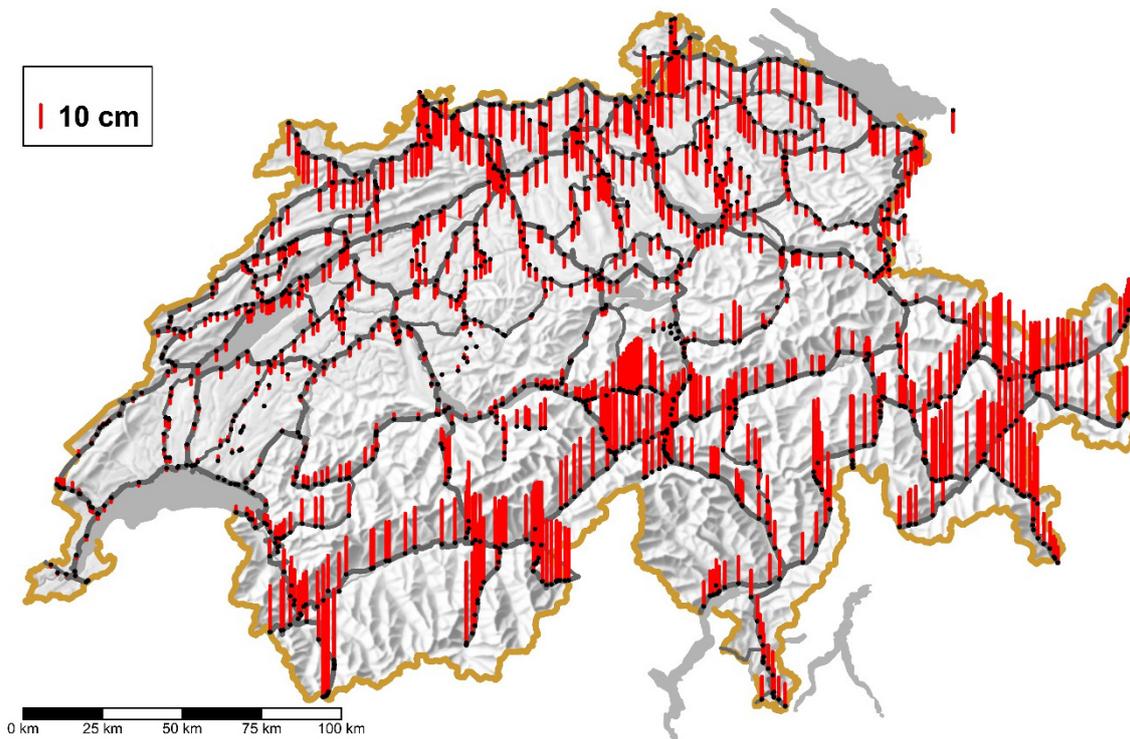


Figure 2-32 : les lignes du réseau altimétrique national avec les différences entre RAN95 et NF02 en 1430 points d'appui environ

Les résultats du calcul du nouveau cadre de référence altimétrique RAN95 ont été à la base de la réussite des jonctions, au niveau altimétrique, dans les trois tunnels de base d'AlpTransit que sont le Lötschberg (38 km, 2005), le Saint-Gothard (57 km, 2010) et le Ceneri (15 km, 2016). Pour chacun de ces trois tunnels de base, il a été possible de se fier aux mesures de nivellement et aux mesures gravimétriques disponibles



ainsi qu'aux calculs pour RAN95. Seuls quelques nivellements de rattachement locaux au réseau altimétrique national aux portails prévus ont dû être effectués en complément [Schlatter et. al. 2016].

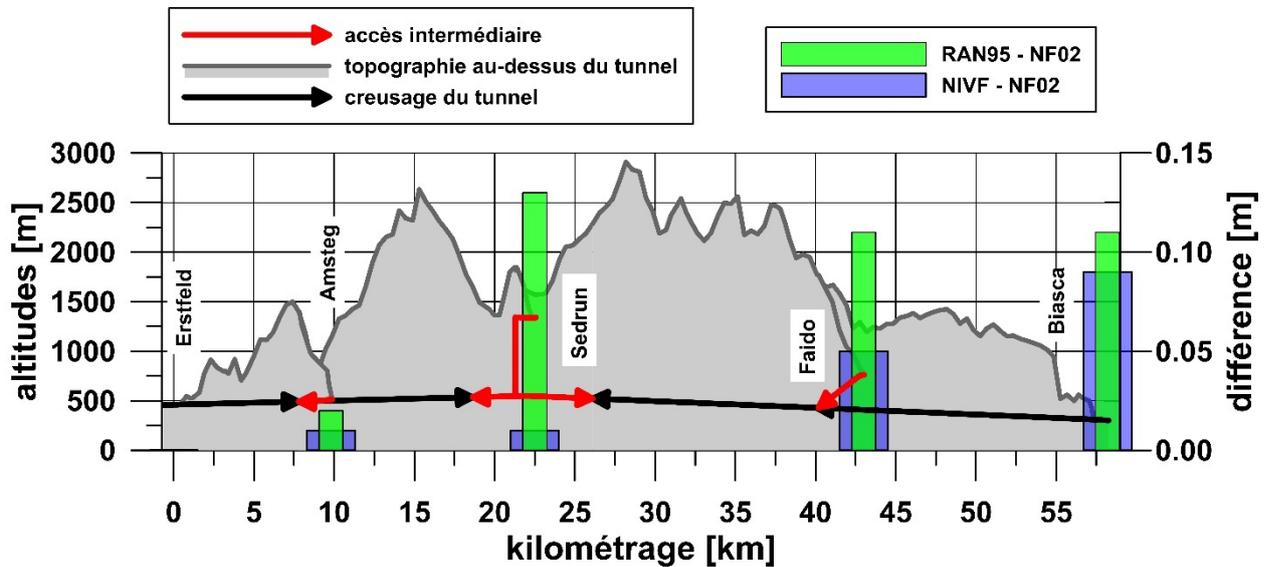


Figure 2-33 : profil en long du tunnel de base du Saint-Gothard avec les points d'attaque intermédiaires (en rouge), les différences RAN95 – NF02 et les « altitudes de nivellement observées (NIVF) » – NF02

On sait moins en revanche que les altitudes usuelles toujours en cours de validité (NF02) reposent en grande partie sur les mesures du Nivellement de précision de 1864 à 1891 entrepris par la Commission géodésique suisse (CGS). Exception faite de quelques points où le tassement est prononcé, les altitudes sur les points qui existent encore ne s'écartent que de quelques centimètres des valeurs d'alors (Figure 2-34). Ainsi, les travaux de la CGS d'il y a 150 ans marquent toujours de leur empreinte les altitudes usuelles (NF02) en Suisse aujourd'hui.

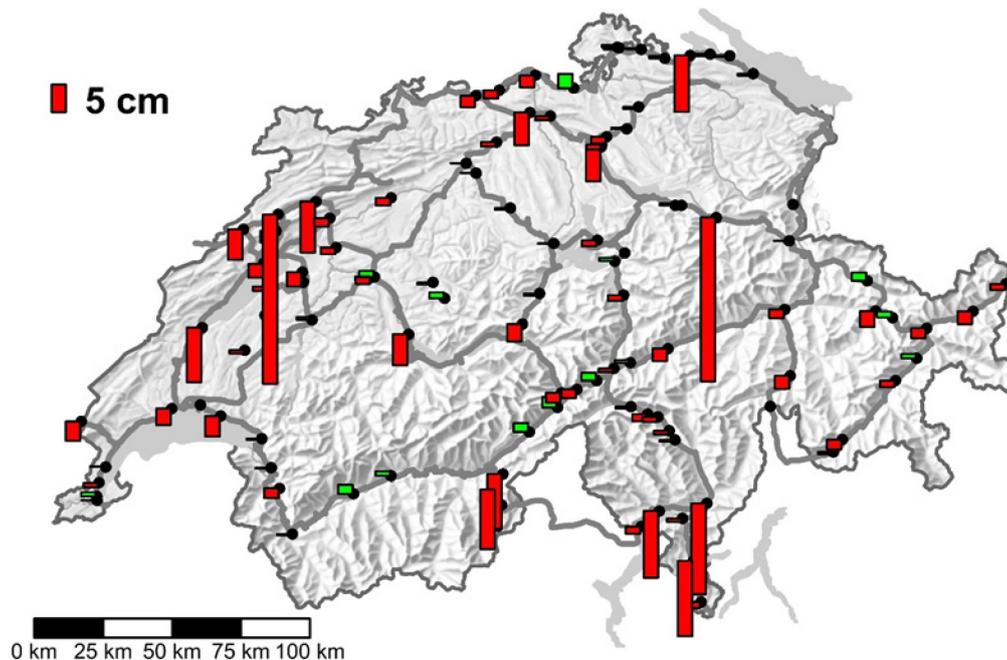


Figure 2-34 : différences entre les altitudes usuelles officielles actuelles NF02 et les altitudes du Nivellement de précision (1864-1891) de la Commission géodésique suisse CGS



Les travaux pour le nouveau réseau altimétrique national sont décrits en détail dans la *Publication de la CGS n° 72* [Schlatter 2007] et dans les deux *swisstopo Dokus n° 20* [Schlatter et Marti 2007] et n° 21 [Vogel et. al. 2009].

2.6.3 Etat actuel et développements futurs possibles

Tableau 2-7 : réseau altimétrique national RAN95 : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développement futur possible
<ul style="list-style-type: none">• Le concept pour un système et un cadre de référence altimétrique rigoureux est disponible.• La méthode pour la compensation rigoureuse, cinématique du RAN a été développée.• Les données de mesures du NF depuis 1902 ont été saisies et éditées.• Le réseau RAN95 établi a été revu, son état est bon et il a été documenté.• Les nouvelles mesures requises ont été effectuées (toutes les lignes ont au moins été mesurées à deux époques différentes).• Le cadre de référence (altitudes des points principaux) est calculé et a reçu le 'feu vert' officiel.• Le projet est documenté (rapport de la CGS, swisstopo-Doku).• swisstopo participe activement aux travaux relatifs au système de référence altimétrique européen (EVRS) et à sa réalisation concrète.	<ul style="list-style-type: none">• swisstopo élabore les bases requises pour un nouveau système altimétrique, prenant modèle sur les systèmes globaux et européens, pour la future mensuration nationale et les géodonnées de base.• swisstopo participe aux clarifications menées en amont de l'introduction officielle d'un nouveau système altimétrique pour la mensuration officielle et toutes les mensurations en Suisse.• Les altitudes de tous les PFA1 (altitudes de tous les points intermédiaires) sont calculées et publiées sur la base d'un nouveau système altimétrique (ou du RAN95 existant).• Le recours aux GNSS (Galileo) pour la détermination des altitudes est clarifié (remplacement éventuel du nivellement fédéral).

Références bibliographiques relatives à 2.6 :

Pour les rapports techniques / swisstopo Reports et d'autres publications portant sur le réseau altimétrique national RAN95, cf. annexe 2.3.6.



2.7 Réseau géodésique combiné CH-CGN

2.7.1 Objectif stratégique

Collocation des différentes méthodes et activités de mesure géodésiques (SLR, GNSS, nivellement et gravimétrie, astrogéodésie, etc.) au point fondamental de Zimmerwald. Association et intégration des différents réseaux de la mensuration nationale (AGNES, MN95, RAN95 et réseau gravimétrique national RGN) via un nivellement GNSS au sein d'un réseau de référence national combiné (CH-CGN), compatible avec les réseaux de référence européens de rang supérieur (ECGN, EPN, EUREF, EUVN, etc.). Une compensation globale des données altimétriques géométriques et liées au champ de pesanteur, incluant le modèle du géoïde, donne naissance aux trois jeux de données cohérents suivants : CHTRFxx-C, RAN95-C et CHGeo2004-C.

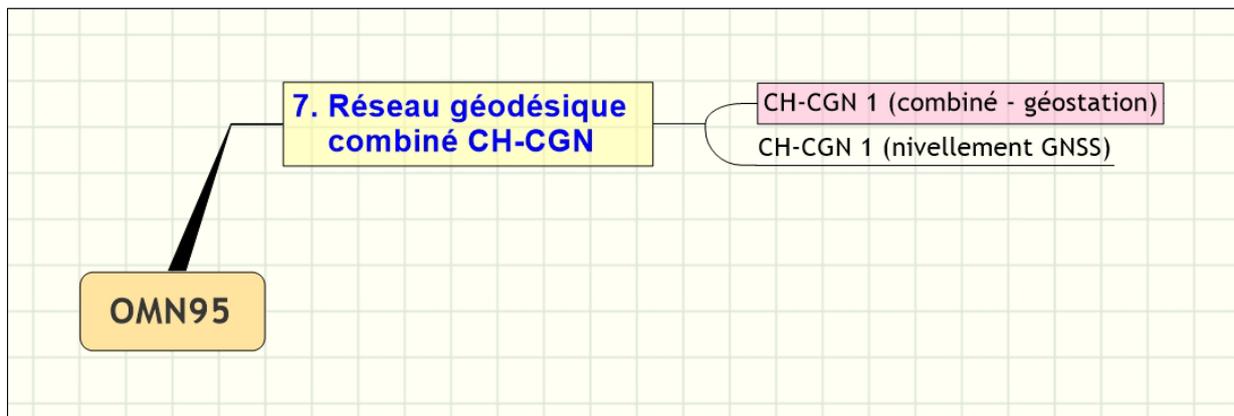


Figure 2-35 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 7 – réseau géodésique combiné CH-CGN

2.7.2 Réseau géodésique combiné européen ECGN (European Combined Geodetic Network)

C'est lors de son symposium de 2002 au Portugal que la sous-commission EUREF de l'Association internationale de géodésie (AIG), au sein de laquelle tous les instituts géodésiques d'Europe sont représentés, lança le projet international destiné à développer un réseau géodésique combiné européen (ECGN, European Combined Geodetic Network). Le projet avait pour but de combiner des réseaux de mesures spatiaux (géométriques) avec des réseaux fondés sur le champ de pesanteur pour définir un système de référence intégré homogène. ECGN est considéré comme étant une contribution européenne à GGOS (Global Geodetic Observing System).

Un réseau européen de stations ECGN devait d'abord être mis en place, stations en lesquelles des déterminations de position permanentes, de haute précision, devaient être effectuées via VLBI, SLR et GNSS. Des mesures périodiques avec des gravimètres absolus (au niveau du microgal) ou des mesures permanentes avec des gravimètres supraconducteurs devaient être entreprises en ces mêmes stations. Il fut ensuite question de développer la méthode de compensation combinée des différentes données de mesure, afin de parvenir notamment à une détermination cohérente des altitudes et de modéliser également des modifications dans le temps.

Outre les stations CORE effectives d'ECGN, où plusieurs techniques de mesure géodésique sont mises en œuvre, ce réseau se compose pour l'essentiel des éléments suivants :

- le réseau GNSS permanent européen (EPN)
- le réseau de nivellement européen (UELN)
- les stations GPS / de nivellement du réseau vertical européen, (EUVN et EUVN-DA, European Vertical Network)
- les modèles du géoïde européens (EGG)
- les stations marégraphiques principales
- les stations gravimétriques absolues



- le réseau gravimétrique européen (UEGN)
- les gravimètres permanents (surtout supraconducteurs, pour observer les marées terrestres).

Les mesures locales (Local Ties) au niveau des stations CORE sont également essentielles par le fait qu'elles relient entre elles les différentes techniques d'observation au moyen de micro-réseaux géodésiques de haute précision.

2.7.3 Géostation de Zimmerwald

Les activités géodésiques à la géostation de Zimmerwald, qui est une station CORE d'ECGN, font notamment partie de la contribution suisse à ce dernier réseau. Jusqu'en 2003, ces travaux se concentraient principalement sur les méthodes de mesure spatiales (SLR et GNSS). Des mesures gravimétriques absolues n'avaient été entreprises auparavant qu'à l'occasion d'une action ponctuelle conduite en 1997. Des mesures gravimétriques relatives permanentes dans le cadre d'observations des marées terrestres sont effectuées depuis 1995. Depuis 2004, des mesures gravimétriques absolues sont généralement réalisées annuellement par METAS et sont également injectées dans le réseau gravimétrique national en tant qu'observations (RGN2004). La géostation a été rattachée au nivellement fédéral avec une ligne NF de Wabern à Zimmerwald pour la toute première fois en 1995, l'opération ayant été répétée deux fois depuis lors. Les mesures locales (Local Ties) à la station sont régulièrement entreprises.

Une autre contribution de la Suisse à ECGN est constituée par la participation active à des projets européens tels qu'EPN ou UELN.

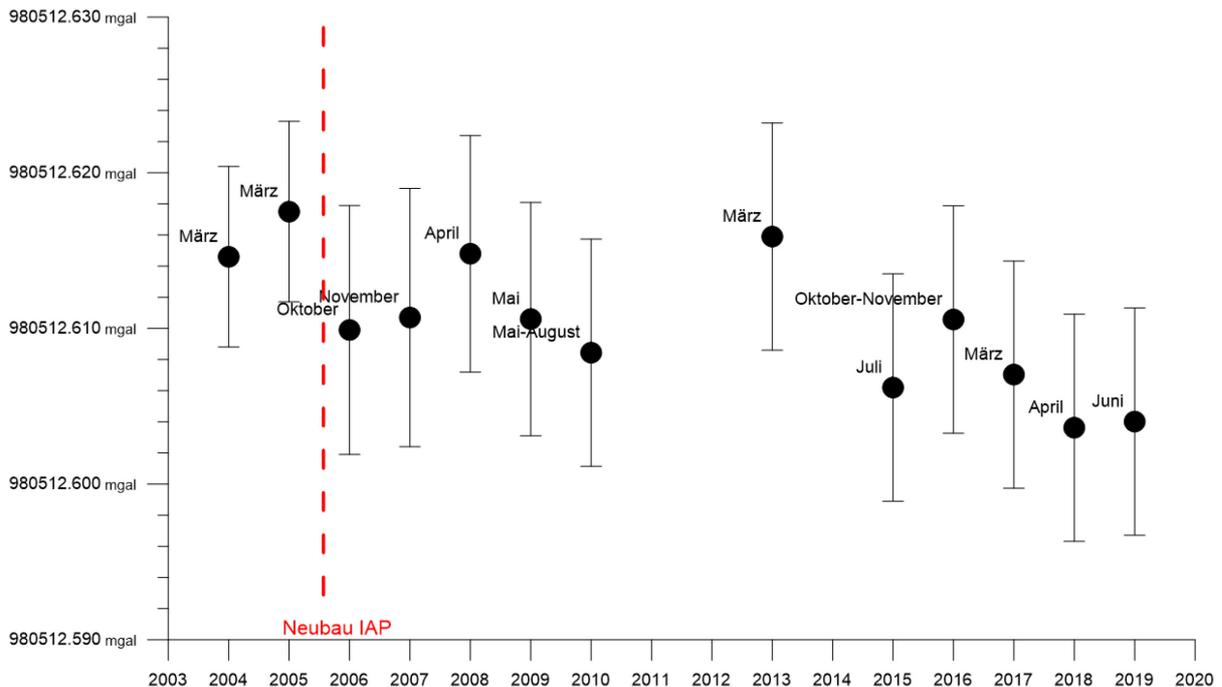


Figure 2-36 : mesures gravimétriques absolues à Zimmerwald depuis 2004



Earth-Tide Measurements January/February 2009 Zimmerwald

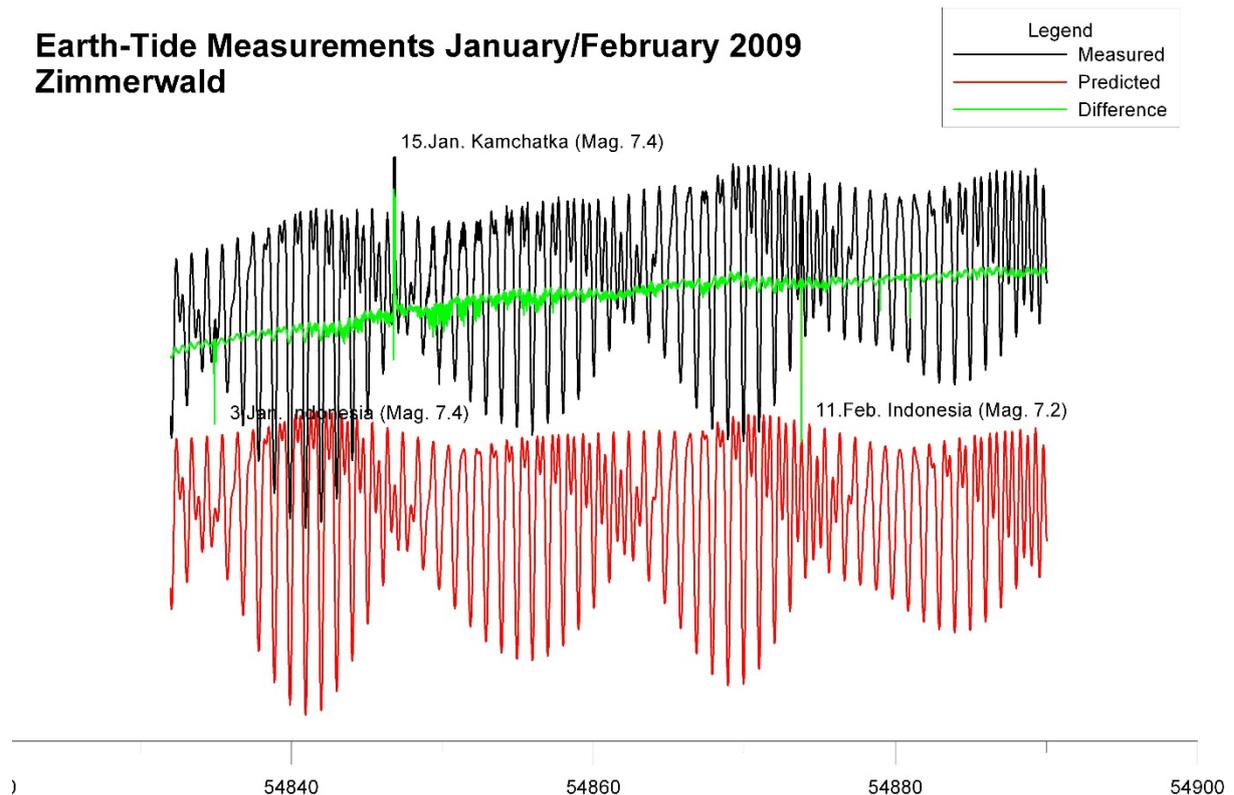


Figure 2-37 : données du gravimètre Lacoste&Romberg ET25 (marées terrestres) sur deux mois à Zimmerwald

2.7.4 Réseau combiné CH-CGN

Bien évidemment, les objectifs d'ECGN se déclinent aussi au niveau national. Les différents réseaux géodésiques doivent être combinés et réunis au sein d'un réseau global cohérent. C'est non seulement la composante altimétrique qui est au centre de l'attention ici, mais également le champ de vitesses.

Conformément au concept « Combined Geodetic Network », les différents réseaux géodésiques (GNSS, de nivellement, gravimétrie, astrogéodésique, etc.) doivent être regroupés, en y intégrant la modélisation du géoïde, pour former un réseau de référence géodésique de la mensuration nationale cohérent « CH-CGN » [swisstopo-Report 04-19]. Le lien entre les données de référence en 3D purement géométriques (GNSS) et les mesures géodésiques liées au champ de pesanteur est essentiel ici. On parvient par exemple à déterminer simplement des profils du géoïde (GNSS / nivellement) via la collocation du nivellement et de la gravimétrie avec le positionnement GNSS. Il est important dans ce cadre que les différents groupes d'observations (réseaux partiels) soient aussi dénués que possible d'erreurs systématiques et soient positionnés de manière absolue avec une précision suffisante.

Pour garantir la cohérence entre les altitudes ellipsoïdales dans le réseau national GNSS MN95, les altitudes orthométriques de RAN95 et les cotes du géoïde de CHGeo2004, leurs mesures et leurs données ont été combinées dans le réseau baptisé « Swiss Combined Geodetic Network (CH-CGN) ». Il se compose des points GPS / de nivellement disponibles (au nombre d'environ 200 aujourd'hui). Il s'agit d'une part des stations MN95 et AGNES rattachées au réseau altimétrique national et d'autre part de points fixes altimétriques aussi observés par GNSS et dont les altitudes ont été calculées de manière rigoureuse dans RAN95.



Figure 2-38 : points GNSS / de nivellement de la Suisse

La plupart de ces points ont servi à calculer le modèle du géoïde CHGeo2004, la cohérence avec MN95 et RAN95 résultant alors de l'affectation d'un poids élevé à ces observations. C'est pourquoi la comparaison entre CHGeo2004, les altitudes MN95 et RAN95 en ces points n'est plus très intéressante. La comparaison avec une variante du calcul du géoïde pour laquelle les points GNSS / de nivellement sont omis ou affectés d'un poids très faible est autrement plus parlante. Lors d'une telle comparaison, la précision du modèle du géoïde de 1 à 3 cm dans la majeure partie de la Suisse a pu être confirmée. Il n'y a qu'en Basse-Engadine que des écarts systématiques pouvant atteindre 20 cm sont apparus.

Les résidus sur les points GNSS / de nivellement peuvent être pris en compte dans une compensation globale via les matrices de variance/covariance complètes des différentes solutions (GNSS, nivellement et géoïde) considérées comme étant indépendantes les unes des autres, en étant ainsi répartis sur les jeux de données concernés. Le mode opératoire exact est décrit dans [Marti, 2016, chapitre 8] ou [Schlatter 2007, chapitre 10]. Il s'est avéré dans ce cadre que la solution GNSS se voit attribuer un poids très élevé en raison du nombre très important d'observations et qu'elle ne peut quasiment rien se voir imputer au niveau des résidus, exception faite de quelques rares stations moins bien déterminées. Le nivellement fédéral est également un jeu de données très robuste localement et ne peut expliquer une composante systématique des résidus que dans des secteurs marginaux. Le modèle du géoïde reste ainsi le seul jeu de données en capacité d'absorber la majeure partie des résidus du GNSS / nivellement. C'est aussi la raison pour laquelle on renonça au traitement des résultats de cette compensation globale lors de la publication de CHGeo2004 et cela explique pourquoi la totalité des résidus sont généralement attribués au modèle du géoïde. Les différences par rapport à une répartition rigoureuse sur les divers jeux de données étaient trop faibles. Il n'y a qu'en quelques points GNSS nettement moins bien déterminés que le poids a été tellement réduit que de faibles résidus GNSS / de nivellement ont subsisté et ont alors été intégralement attribués aux mesures GNSS. Les altitudes orthométriques RAN95 et les altitudes ellipsoïdales MN95 restent ainsi indépendantes les unes des autres et sont reliées les unes aux autres de manière rigoureuse par CHGeo2004. Aux points GNSS / de nivellement en lesquels l'altitude orthométrique peut aussi bien être calculée à partir de RAN95 que du GNSS et du géoïde, la préférence doit être donnée à la valeur issue du nivellement.



Une autre combinaison parlante peut être réalisée sur les points GNSS / de nivellement postérieurs à la publication de CHGeo2004. Le GNSS, le nivellement et le modèle du géoïde y sont indépendants les uns des autres et permettent de se prononcer objectivement quant au niveau de cohérence atteint pour les altitudes. Entre 2005 et 2014, près de 20 points GNSS / de nivellement supplémentaires ont été ajoutés au moyen de mesures dans le nivellement fédéral et de campagnes GNSS limitées. En moyenne, on observe des résidus restants de 1,7 cm sur ces points entre GNSS, RAN95 et CHGeo2004. Cela témoigne du degré de cohérence déjà atteint et confirme la précision générale du modèle du géoïde, comprise entre 1 et 3 cm. En quelques rares secteurs (comme Malcantone ou le Val Müstair), les différences restent supérieures et atteignent 7 cm au plus (point MN95 de Monteggio).

2.7.5 Mouvements verticaux

Les modifications des altitudes dans le temps constituent un problème pour la cohérence entre GNSS et RAN. Le nivellement et la gravimétrie permettent de déterminer les mouvements verticaux sur le temps long avec une très grande fiabilité. Ces vitesses ne peuvent cependant être calculées que par rapport à un point de référence quelconque que l'on suppose stable (Aarburg). Pour RAN95, toutes les altitudes orthométriques ont été ramenées à l'instant 1993.0.

Aujourd'hui, le GNSS permet également une très bonne détermination des mouvements verticaux. Si cela vaut pour les stations permanentes, c'est aussi vrai, désormais, pour bon nombre de points MN95. Les vitesses sont exprimées dans un cadre absolu par rapport à la « partie stable de l'Europe ». Toutefois, il n'en était pas encore ainsi pour le calcul du géoïde de CHGeo2004. CHTRF2004 était encore une solution statique sans estimation de vitesses. La validité des altitudes ellipsoïdales résultantes était limitée à l'époque de leur détermination.

Du seul fait de ce traitement différencié des vitesses, des incohérences excédant 1 cm se font jour dans le modèle du géoïde CHGeo2004. Et il va de soi que le modèle du géoïde n'est pas invariant dans le temps, en toute rigueur, bien qu'il soit beaucoup moins sujet aux variations que le GNSS ou le nivellement. Mais nous sommes encore très loin, en Suisse, d'une détermination de la modification du géoïde dans le temps.

Une démarche adaptée pour déterminer la modification du géoïde dans le temps consisterait à comparer les vitesses issues du GNSS et celles résultant du RAN. La différence serait alors la vitesse du géoïde. Une première difficulté surgit toutefois dès ce stade, puisque les deux champs de vitesses sont positionnés différemment. Si les vitesses GNSS sont exprimées globalement par rapport à la partie stable de l'Europe, les vitesses issues du RAN se rapportent au point de référence d'Aarburg. Cette différence peut être évaluée sommairement aujourd'hui (Aarburg se soulève dans le cadre européen d'environ 0,9 à 1,2 mm/an), mais la fiabilité de cette estimation reste sujette à caution. Les deux réseaux servant à déterminer les mouvements verticaux sont encore très mal reliés l'un à l'autre dans le temps, parce que les stations GNSS ont 30 ans au plus et que les mouvements tectoniques faibles décelés par des nivellements répétés n'apparaissent qu'au bout d'une cinquantaine d'années.

Les différences dans la vitesse verticale résultant de la comparaison de mesures GNSS et RAN doivent aussi être compatibles avec les modifications du champ de pesanteur. On devrait donc aussi retrouver ces modifications dans les mesures gravimétriques (RGN) et même peut-être dans les déviations de la verticale. On ne dispose toutefois pas de données fiables à ce sujet pour l'instant.

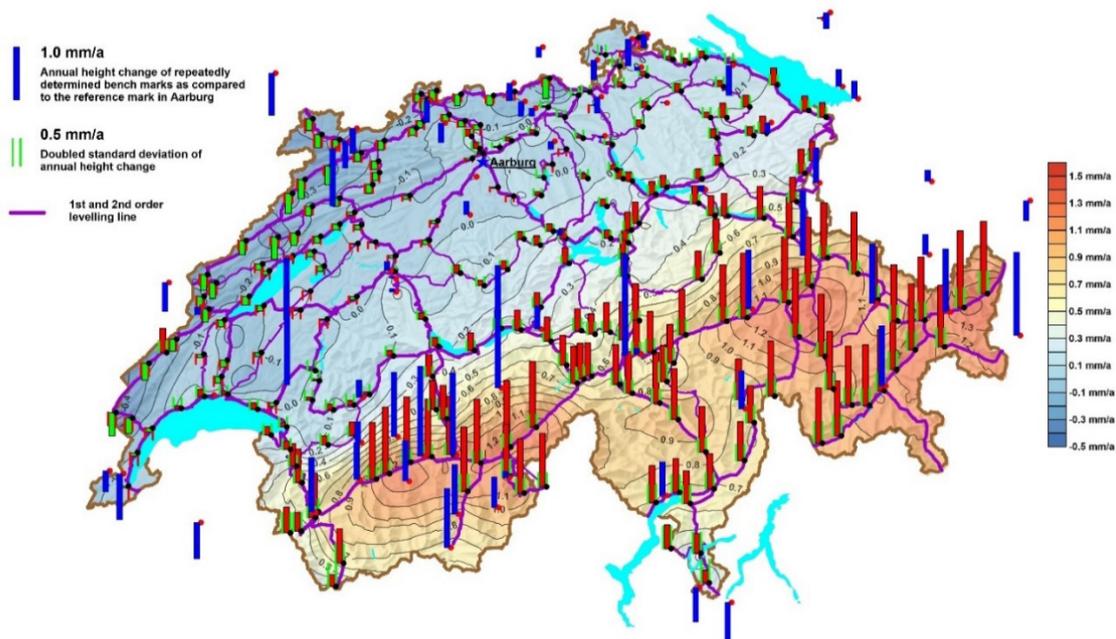


Figure 2-39 : mouvements verticaux à partir du RAN (en vert et en rouge) et des stations permanentes GNSS (en bleu, réduits de 0,9 mm/an)

2.7.6 Etat actuel et développements futurs possibles

Tableau 2-8 : réseau géodésique combiné CH-CGN : état et développements futurs possibles

Etat en 2016	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none"> • CH-CGN 1 : la géostation de Zimmerwald est une « Core-Station » du projet européen ECGN qui vise à relier entre elles les mesures liées au champ de pesanteur et les mesures géométriques. • Neuf méthodes de mesure différentes sont réunies (collocation) au point fondamental dans le cadre d'une collaboration (coordonnée par la CGS) entre swisstopo, le METAS, l'AIUB et l'ETHZ. • CH-CGN 2 : la combinaison GNSS - nivellement (+gravimétrie) en des points sélectionnés des réseaux de référence est réalisée. • Le réseau de référence GNSS, le nivellement et la gravimétrie (RAN95) ainsi que le modèle du géoïde (CHGeo2004) sont réunis au sein d'une compensation combinée. Les cadres de référence et les modèles cohérents permettent une véritable combinaison GNSS - nivellement - gravimétrie. 	<ul style="list-style-type: none"> • CH-CGN 1 : la collaboration européenne se poursuit avec des contributions de la Suisse. Dans ce cadre, la combinaison des mesures SLR avec les mesures GNSS ainsi qu'avec le nivellement et la gravimétrie est visée. • CH-CGN 2 : la poursuite de la densification du réseau de référence combiné (réseau de référence GNSS et RAN95), la nouvelle mesure des altitudes GNSS et la poursuite du développement du modèle du géoïde (CHGeo20xx) permettent une cohérence des altitudes au niveau subcentimétrique. • Remplacement du nivellement de densification par des déterminations d'altitudes GNSS. • L'ancien cadre de référence NF02 (altitudes usuelles) n'est plus déduit qu'indirectement de RAN95, par transformation. • Champ de vitesses cohérent à partir du GNSS, du nivellement et de la pesanteur.

Références bibliographiques relatives à 2.7 :

Pour la liste des swisstopo Reports concernant les réseaux géodésiques combinés CH-CGN / ECGN, cf. annexe 2.3.7. Pour les publications portant sur la cinématique de la mensuration nationale, resp. la géodynamique, cf. annexe 2.1.3.



2.8 Modèle du géoïde CHGeo2004

2.8.1 Objectif stratégique

En Suisse, des mesures géodésiques et des modèles de masses affinés servent au relevé du champ de pesanteur. Le modèle du géoïde de la Suisse CHGeoxx continue à être développé et affiné en permanence.

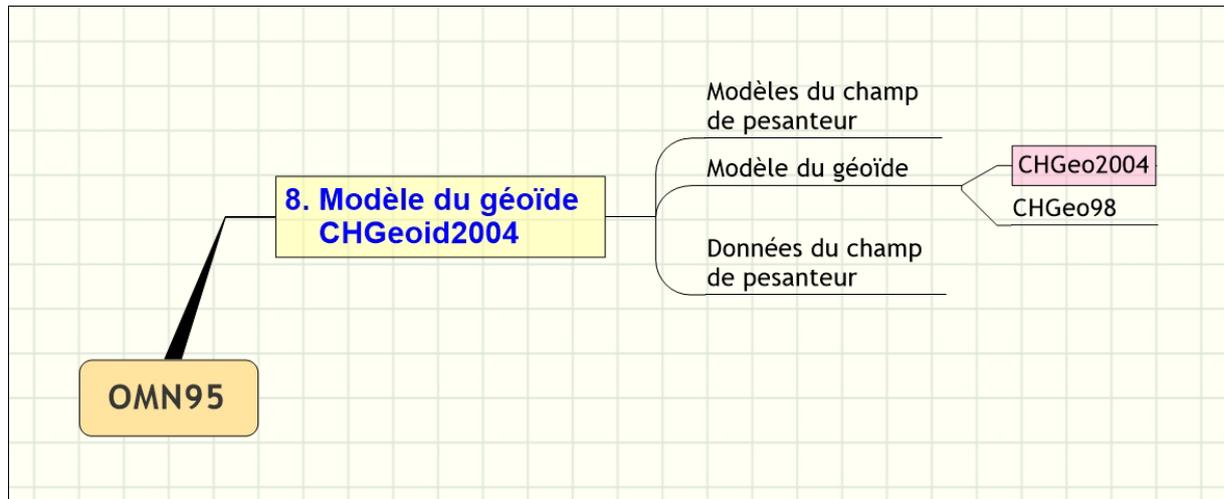


Figure 2-40 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème – modèle du géoïde CHGeo2004

2.8.2 Rappel historique

Les modèles du géoïde ne jouaient pas encore un rôle majeur dans l'ancienne mensuration nationale. La différence entre les altitudes orthométriques et ellipsoïdales de même que les déviations de la verticale étaient généralement négligées. On pouvait se le permettre en raison du positionnement de l'ellipsoïde de 1902, défini de telle façon que les déviations de la verticale soient a priori nulles au point fondamental. Toutes les altitudes usuelles se rapportant au géoïde et à l'horizon du RPN à Genève, on pouvait renoncer à un positionnement altimétrique exact de l'ellipsoïde.

La situation ne changea qu'à l'introduction de la mesure électronique des distances (MED) dans la mensuration nationale (vers 1968) et pour les travaux relatifs au réseau européen de triangulation RETRIG. Il fallait au moins disposer d'écarts altimétriques ellipsoïdaux approchés pour la réduction des distances en pente et de déviations de la verticale pour la compensation des réseaux de triangulation en montagne. C'est à cette époque que furent menées les premières études scientifique visant à mettre à disposition un modèle du géoïde couvrant la Suisse entière [Elmiger, 1969; Gurtner, 1978].

Si l'introduction du GPS/GNSS bouleversa la géodésie et la mensuration nationale, elle mit aussi les modèles du géoïde sur le devant de la scène. La thématique plutôt académique de l'influence du champ de pesanteur sur les mesures géodésiques se mua soudain en un problème très concret pour le géomaticien en pratique.

Des altitudes géométriques (ellipsoïdales) résultent des mesures GNSS, rapportées à un ellipsoïde de référence donné (datum géodésique). Les altitudes usuelles de la mensuration courante sont toutefois des altitudes au-dessus du niveau moyen de la mer définies physiquement dans le champ de pesanteur terrestre (altitudes orthométriques ou altitudes usuelles orthométriques approchées). Elles se rapportent au géoïde (surface équipotentielle du champ de pesanteur coïncidant avec le niveau moyen de la mer). Un modèle du géoïde définissant les cotes du géoïde N est donc indispensable pour calculer les différences entre ces deux systèmes altimétriques. La cote du géoïde N indique l'écart entre le géoïde et l'ellipsoïde de référence en un lieu donné. Si la valeur de N est connue, les altitudes ellipsoïdales h_{ell} peuvent être converties en altitudes orthométriques H_{orth} via la relation suivante :



Horth = hell – N

En Suisse, un modèle du géoïde astrogéodésique est disponible depuis 1978 (géoïde de Gurtner) [Gurtner, 1978]. Il a rendu de précieux services pour de nombreux travaux géodésiques et suffisait à couvrir les besoins inhérents à l'utilisation de la MED et du GPS dans l'ancienne mensuration nationale. Il devint rapidement clair, cependant, lors de la conception de la nouvelle mensuration nationale [*Berichte aus der L+T*-Nr. 6 – LV95 – Teil 1, *non traduit*], que ce modèle ne parviendrait pas à satisfaire les exigences nées de l'association du RAN95 et du réseau de référence GNSS.

2.8.3 Modèle du géoïde CHGeo98

Un projet commun fut lancé dans le cadre de la collaboration scientifique au sein de la CGS, visant à déterminer un nouveau modèle du géoïde pour la Suisse ayant une précision de quelques centimètres. Outre swisstopo, l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich (IGP) ainsi que l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (AIUB) prirent également part à ce projet. Son résultat, principalement publié dans [*CGS Volume 56*], est le modèle « CHGeo98 » (géoïde suisse de 1998). Il remplaça le géoïde de Gurtner de 1978 à partir de 1998, en qualité de géoïde officiel de la mensuration nationale suisse [*Berichte aus der L+T*- Nr. 16 – LV95 – Teil 10, *non traduit*].

Le géoïde suisse de 1998 (CHGeo98) fut déterminé en recourant à la même méthode que celle déjà employée pour celui de (1978). Il se fondait pour l'essentiel sur 629 mesures astrogéodésiques de déviations de la verticale, mais pour la première fois aussi, sur 72 points GPS / de nivellement. Les mesures gravimétriques ne furent pas directement introduites en tant qu'observations pour CHGeo98. On utilisa principalement le MNT25 (Level 1), qui venait tout juste d'être achevé à l'époque, comme modèle numérique du terrain pour le calcul des masses. On le compléta cependant par d'autres modèles de masses : discontinuité de Moho, corps d'lvrea, sédiments du Po, de même que des modèles sommaires des profondeurs des lacs (bathymétrie) et des sédiments fluviaux du Quaternaire.

La détermination effective du géoïde se déroula selon la méthode bien connue dite « Remove-Compute-Restore », l'étape « Compute » ayant été réalisée via collocation par les moindres carrés.

CHGeo98 présentait une précision d'environ 3 à 5 cm et était diffusé aux clients sous la forme d'une grille régulière d'une résolution de 1 km.

Un poids très élevé ayant été attribué aux mesures de déviation de la verticale par rapport aux mesures GPS et de nivellement lors de la détermination du géoïde de 1998, des résidus systématiques de plusieurs centimètres subsistaient sur les points GPS et de nivellement (cf. Figure 2-41), ce qui était évidemment insatisfaisant pour une détermination altimétrique précise via GPS/GNSS.

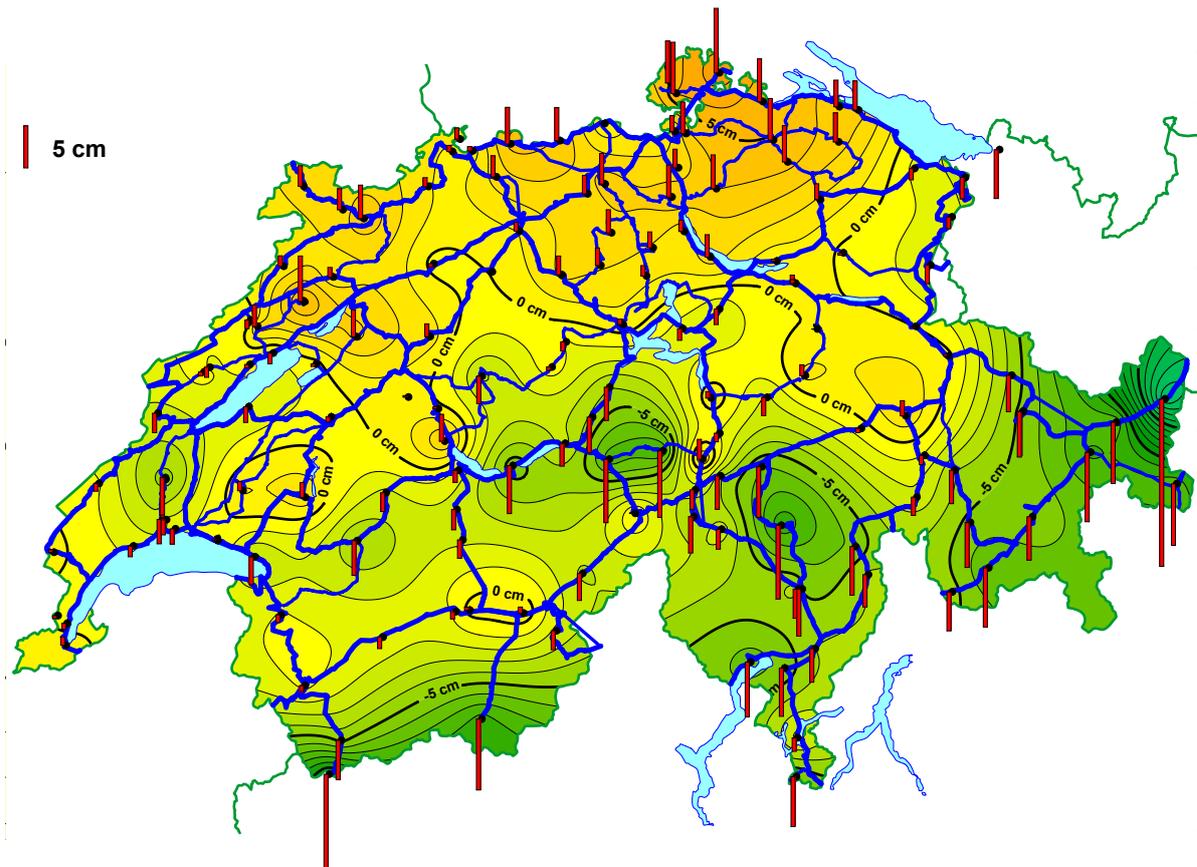


Figure 2-41 : résidus GPS-nivellement avec CHGeo98 (état en 2002)

Ce constat conduit, quelques années à peine après la publication de CHGeo98, à la décision de lancer un nouveau projet visant à mieux déterminer le géoïde [Schneider et al 2002].

2.8.4 Modèle du géoïde CHGeo2004

La méthode de détermination du géoïde ne varia guère pour CHGeo2004 par rapport à CHGeo98. La précision plus élevée devait surtout résulter de nouvelles mesures et de modèles de masses affinés. En outre, les mesures gravimétriques devaient aussi être introduites en tant qu'observations pour la première fois et un géoïde de référence global fut utilisé (EGM96), ce qui entraîna surtout un gain de précision dans les zones limitrophes des pays voisins.

Pour accroître la précision, une campagne de mesures astrogéodésiques d'une certaine ampleur fut menée en 2003 avec deux caméras zénithales numériques transportables de l'ETH Zurich (DIADEM) et de la TU Hanovre (TZK2-D) [Marti et al. 2004]. Cette campagne visait à remplacer ou à vérifier des mesures plus anciennes sur lesquelles pesaient des doutes. L'accent était clairement mis sur les régions où des problèmes avaient été identifiés lors du calcul de CHGeo98, à savoir la Basse-Engadine, le col du Susten ou le secteur du lac de Constance. Dans le reste de la Suisse aussi, plus d'une cinquantaine de nouvelles déviations de la verticale furent mesurées, avec une précision de l'ordre de 0,1". Le gain en précision par rapport aux mesures analogiques plus anciennes était d'un facteur trois à cinq environ.

Afin d'assurer la cohérence du modèle du géoïde avec les altitudes orthométriques RAN95, c'est dans le cadre de CH-CGN (Swiss Combined Geodetic Network) [Schlatter et al 2003] et d'une campagne de mesures spécifique CHGeoid2003 [Brockmann, 2003 ; Schlatter et al, 2005] qu'on observa un nombre aussi élevé que possible de points du nivellement fédéral via GNSS et qu'on rattacha autant de points MN95 que possible au réseau altimétrique national. Ainsi, 193 points GPS / de nivellement purent être utilisés pour le calcul du géoïde. La solution finale de RAN95 (mesures de 2004 comprises) put être utilisée comme jeu de données de nivellement. Les résultats de la campagne CHTRF2004 furent introduits comme jeu de



données GNSS. Ils présentent un basculement nord-sud assez marqué de plusieurs centimètres par rapport aux solutions CHTRF antérieures, mais cela n'explique que partiellement les résidus dans CHGeo98.

Des mesures gravimétriques furent aussi introduites directement en tant qu'observations pour CHGeo2004. Un gain de précision en résulta dans des zones faiblement couvertes par des observations (déviations de la verticale et GNSS/nivellement) sinon. Le jeu de données de la Commission géophysique suisse [Olivier et al. 2010], riche de plus de 30 000 pesanteurs mesurées, fut utilisé à cette fin. Il s'agit là d'une masse d'informations que même les ordinateurs modernes ne parviennent pas à traiter dans l'approche par collocation employée pour la détermination du géoïde. C'est pourquoi ce jeu de données dut être réduit à 2225 mesures gravimétriques représentatives, réparties sur une grille régulière d'une résolution de 5 km.

Les cotes du géoïde observées directement (GNSS/nivellement) furent introduites dans le calcul final avec un poids très élevé, de façon à obtenir de force la cohérence entre les altitudes ellipsoïdales et les altitudes orthométriques RAN95 pour CHGeo2004. Si cela peut sembler manquer de rigueur du point de vue de la théorie du potentiel, il n'en demeure pas moins qu'il s'agit de la solution la plus avantageuse en pratique.

La précision visée de 1 à 3 cm s'est confirmée dans la plupart des régions de Suisse. Le gain de précision par rapport au modèle de 1998 a surtout résulté des nouvelles mesures effectuées et de l'intégration directe de mesures gravimétriques dans certaines régions. Toutefois, les améliorations apportées aux modèles globaux du champ de pesanteur et aux modèles numériques du terrain, tant en Suisse qu'à l'étranger (MNT25 Level 2, SRTM), ainsi que les échanges de données facilités avec l'étranger ont grandement contribué aussi aux gains de précision enregistrés.

CHGeo2004 est proposé sous forme de grille depuis 2005, aussi bien dans le système de projection avec une résolution de 1 km que dans le système européen ETRS89 (résolution de 30 secondes d'arc), et permet la transformation entre les altitudes ellipsoïdales et les altitudes orthométriques RAN95 avec une précision centimétrique. NF02 restant cependant le système altimétrique officiel pour la mensuration officielle, le souhait de pouvoir disposer d'une variante du modèle du géoïde compatible avec NF02 a fini par s'exprimer et être exaucé. Ce fichier (CHGeo2004/HTRANS) est également transmis aux utilisateurs depuis 2009, mais il est autrement moins précis que CHGeo2004 en raison des imprécisions inhérentes à NF02.

CHGeo2004 est aujourd'hui intégré dans la plupart des récepteurs GNSS courants du marché, dans des logiciels de traitement GNSS ainsi que dans des logiciels de SIG et de transformation, si bien qu'il est largement répandu en Suisse et qu'il a largement fait ses preuves.

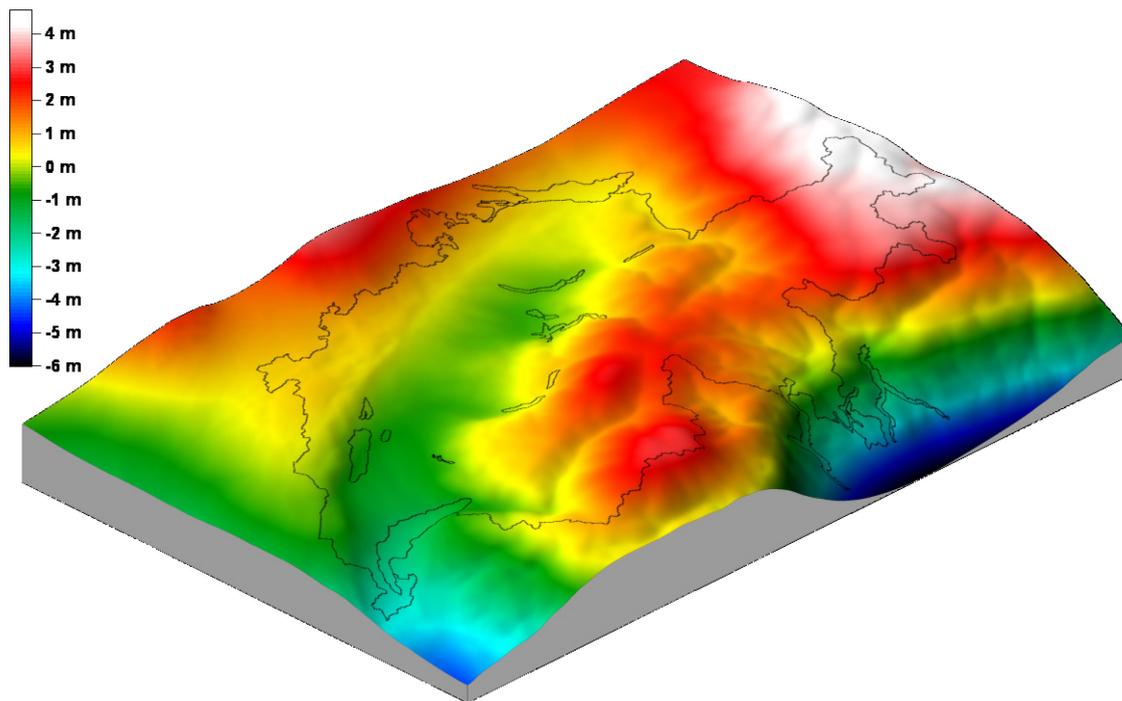


Figure 2-42 : modèle du géoïde CHGeo2004 dans le système de référence CH1903+

2.8.5 Etat actuel et développement futur

Tableau 2-9 : modèle du géoïde CHGeo2004 : état et développements futurs possibles

Etat en 2006	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Avec CHGeo2004, c'est un modèle du géoïde d'une précision de quelques centimètres qui est disponible.• Un modèle du quasi-géoïde est également disponible, servant pour l'utilisation d'altitudes normales.• Pour le calcul pratique (interpolation), un jeu de données de grille CHGeo2004-R est disponible.• Du fait de la compensation combinée avec RAN95 et le réseau de référence GNSS, le modèle CHGeo2004 est cohérent avec les réseaux de référence.	<ul style="list-style-type: none">• Améliorations supplémentaires du modèle du géoïde par l'intégration de nouvelles mesures de déviation de la verticale, de meilleures données GNSS / de nivellement et de nouveaux modèles de masses.• Améliorations par la détermination combinée du géoïde avec des données issues de missions satellites (notamment GRACE, GOCE et leurs suites).• Meilleure compatibilité avec des modèles globaux et les modèles des pays voisins.

Références bibliographiques relatives à 2.8 :

Pour la liste des swisstopo Reports ainsi que des autres publications concernant les modèles du géoïde de la Suisse, cf. annexe 2.3.8.



2.9 Mensuration nationale cinématique CHKM95

2.9.1 Objectif stratégique, concept et contenu

La cinématique de la croûte terrestre superficielle, en Suisse et à ses alentours, est saisie au moyen des méthodes géodésiques les plus diverses. Le modèle cinématique de la Suisse (CHKM) formé possède une parfaite cohérence interne. Il permet d'agréger et d'utiliser ensemble des mesures géodésiques prises à différentes époques. Il fournit des bases importantes aussi bien pour l'étude de mouvements et de déformations de la croûte terrestre superficielle que pour des tâches de surveillance locale (monitoring).

Il y a un siècle encore, le débat faisait rage parmi les scientifiques pour savoir si l'écorce de notre planète subit des modifications et si oui lesquelles. Aujourd'hui, on sait que les continents se déplacent, se déforment (tectonique des plaques) et que les forces orogéniques ou encore l'isostasie sont toujours actives. De fait, l'espace dans lequel nous évoluons subit non seulement des modifications d'ordre qualitatif, mais aussi de nature cinématique, très lentes mais permanentes.

La prise en compte cohérente des modifications dans le temps de la géométrie de la Terre (forme et surface) et du champ de pesanteur a constitué une nouveauté conceptuelle majeure dans les modèles de la géodésie moderne. Les modèles globaux décrivent surtout les mouvements à grande échelle induits par la tectonique des plaques. Mais les déformations au sein même des plaques tectoniques et en leurs bordures revêtent également de l'intérêt dans le cadre continental, tout comme les soulèvements et les tassements inhérents à des mouvements de compensation isostatique tels que le 'rebond postglaciaire', causé par la fonte des calottes glaciaires et des phénomènes d'érosion. S'agissant des modèles locaux, d'autres effets jouent aussi un rôle, comme les glissements de terrain, les mouvements de la roche, les tassements locaux (dont ceux consécutifs au percement de tunnels et à l'exploitation minière) ou les modifications altimétriques dues à la présence d'eaux souterraines.

La mission première de la géodésie consiste à décrire (outre le champ de pesanteur) la géométrie des mouvements en trois dimensions, donc à définir la cinématique de la croûte terrestre superficielle. Des mesures géodésiques répétées peuvent y pourvoir, mais il faut être pleinement conscient du fait que ces mesures relatives répétées ne permettront de déterminer que des mouvements relatifs. Pour décrire des champs de déplacements ou de vitesses 'absolus', des valeurs de référence ou des 'points de datum' adaptés doivent être introduits (par exemple un vecteur nul en un point fixe par hypothèse). Pour décrire par ailleurs la déformation locale de l'écorce terrestre, il est avantageux d'utiliser le champ du tenseur des déformations (straintensor, différentielle dans l'espace du champ des déplacements), parce qu'il est invariant par rapport à la translation. Il est alors inutile de définir un vecteur nul. Les résultats de l'analyse ainsi menée sont des dilatations et des cisaillements décrivant la déformation locale du continuum et pouvant être mieux interprétées dans le contexte des forces physiques présentes (champ du tenseur des contraintes) et de l'activité sismique récente.

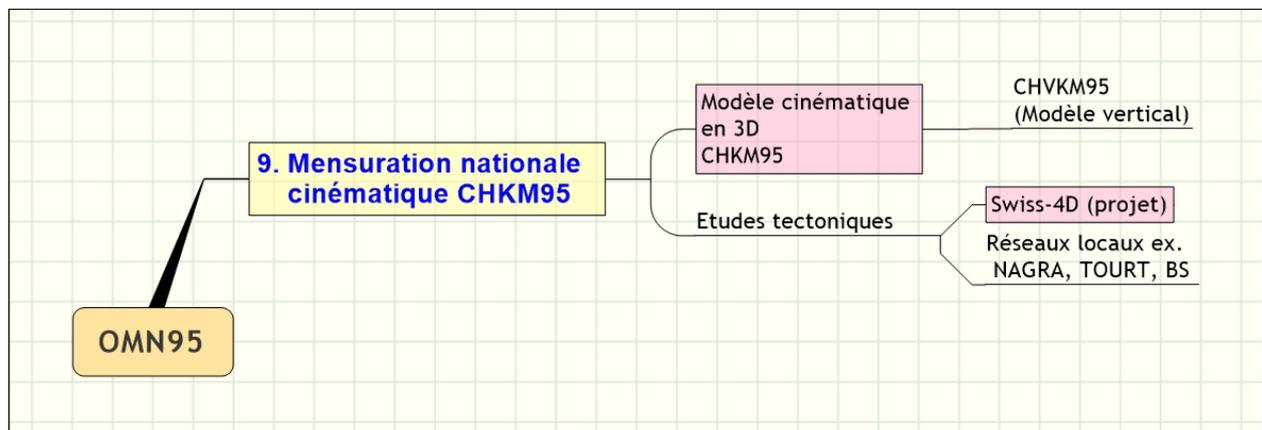


Figure 2-43 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 9 – mensuration nationale cinématique CHKM95



2.9.2 Modèle cinématique en 3D CHKM95

Le concept des bases géodésiques GG95 prévoit la détermination d'un modèle cinématique en 3D 'CHKM95' comme élément du système de référence CHTRS95. Un tel modèle comprend la description du champ des déplacements de la croûte terrestre superficielle dans le temps et l'espace en Suisse et à ses alentours et sert aux deux finalités suivantes :

- 1) Mise à disposition d'un modèle de données pour décrire la modification dans le temps des cadres de référence (coordonnées et altitudes). Il devient ainsi possible de combiner entre elles des données de mesure géodésiques issues d'époques différentes. De tels modèles sont indispensables pour le calcul de cadres de référence de haute précision (aux époques t_0 , t_n), tels qu'ils sont par exemple requis en mensuration d'ingénieur pour servir de base au percement de longs tunnels (comme ceux d'AlpTransit).
- 2) Etude de phénomènes néotectoniques dans les formations géologiques en Suisse et à ses alentours, sur la base de mesures géodésiques répétées. Cette application secondaire revêt de plus en plus d'importance pour la recherche fondamentale en géologie et en géophysique, grâce aux données recueillies qui ne cessent de gagner en qualité et en volume au fil du temps.

Les réseaux de référence géodésiques classiques avec des coordonnées invariantes sont remplacés par des réseaux géodésiques de surveillance (monitoring) avec des coordonnées dépendant du temps et des vitesses. Cela concerne surtout les réseaux GNSS permanents. Des séries temporelles de plus en plus fournies au fil des années existent pour ces derniers, constituant une base idéale pour des analyses néotectoniques et la formation de modèles cinématiques.

La difficulté majeure de la mensuration nationale cinématique en Suisse réside dans le fait que les mouvements relatifs sont extrêmement faibles, même dans les zones d'activité tectonique. C'est pourquoi on ne parvient à détecter des déplacements significatifs que lorsque les intervalles de temps sont suffisamment longs, soit entre les époques de mesure, soit au niveau des séries temporelles issues des mesures permanentes.

A la base, le modèle cinématique CHKM95 prévoit un modèle de vitesses en 3D. Les contextes de départ sont toutefois différents pour la détermination des trois composantes (v_x , v_y , v_z). Seul le champ v_z discret peut être déterminé avec une précision élevée à partir des nivellements répétés de RAN95, les intervalles de temps atteignant jusqu'à un siècle. La difficulté réside cependant dans le choix de points de contrôle adaptés le long des lignes de RAN95 et de l'interpolation de la vitesse verticale entre eux. Le champ de vitesses résultant de la compensation cinématique de RAN95 est appelé 'CHVKM95'.

La situation est bien différente pour les points de référence GNSS. Les composantes planimétriques v_x et v_y se déduisent des mesures GNSS répétées avec une précision nettement supérieure à celle de la composante altimétrique v_z . Le constat est le même pour les séries temporelles issues de la surveillance (monitoring) des stations permanentes. L'objectif est néanmoins clair : déterminer l'information en trois dimensions, parce qu'elle est aussi la plus intéressante pour l'interprétation géophysique (comparaison avec le mécanisme au foyer du séisme, etc.). En conséquence, la combinaison des résultats cinématiques issus de la surveillance (monitoring) GNSS et de ceux de RAN95 a le potentiel requis pour permettre la détermination du champ de vitesses en 3D souhaité et par suite du modèle cinématique CHKM95.

La prise en compte cohérente des modifications dans le temps de la géométrie de la Terre (forme et surface) et du champ de pesanteur constitue un aspect essentiel de la géodésie moderne. C'est pourquoi l'un des objectifs majeurs de la nouvelle mensuration nationale est de déterminer de façon fiable la cinématique de la croûte terrestre superficielle en Suisse et à ses alentours, puis de la décrire dans un modèle cinématique en 3D.

Les calculs effectués pour étudier les mouvements cinématiques (mouvements récents de l'écorce) en Suisse ont non seulement intégré des mesures du nivellement fédéral, mais également des solutions GNSS combinées sur plusieurs années des réseaux permanents AGNES et EPN/IGS ainsi que des campagnes CHTRFyy (entre 1988 et 2022), les résultats étant exprimés dans le réseau national GPS MN95, resp. réseau de référence GNSS MN95 (cf. § 2.4.2). L'analyse des séries temporelles de coordonnées est un élément essentiel de la surveillance dans la durée de la stabilité des stations permanentes, resp. du



cadre de référence. En plus de cela, l'analyse des données des campagnes GPS/GNSS permet d'étudier la stabilité de points bien matérialisés densifiant le réseau permanent.

Les vitesses horizontales des stations AGNES avec des séries temporelles comportant plus de trois années et des stations MN95 déterminées trois fois au moins en plus de quatre ans sont présentées sur la Figure 2-44 avec les ellipses d'erreur qui leur sont associées. Les ellipses d'erreur sont surtout très petites pour les points déterminés sur une longue période. Les vitesses estimées sont faibles. L'hypothèse postulant l'absence totale de mouvement horizontal est validée avec un écart-type des vitesses de 0,3 mm par an et par composante des coordonnées. Le calcul de l'écart-type a pris en compte les mouvements d'une certaine ampleur de quelques stations manifestement instables localement.

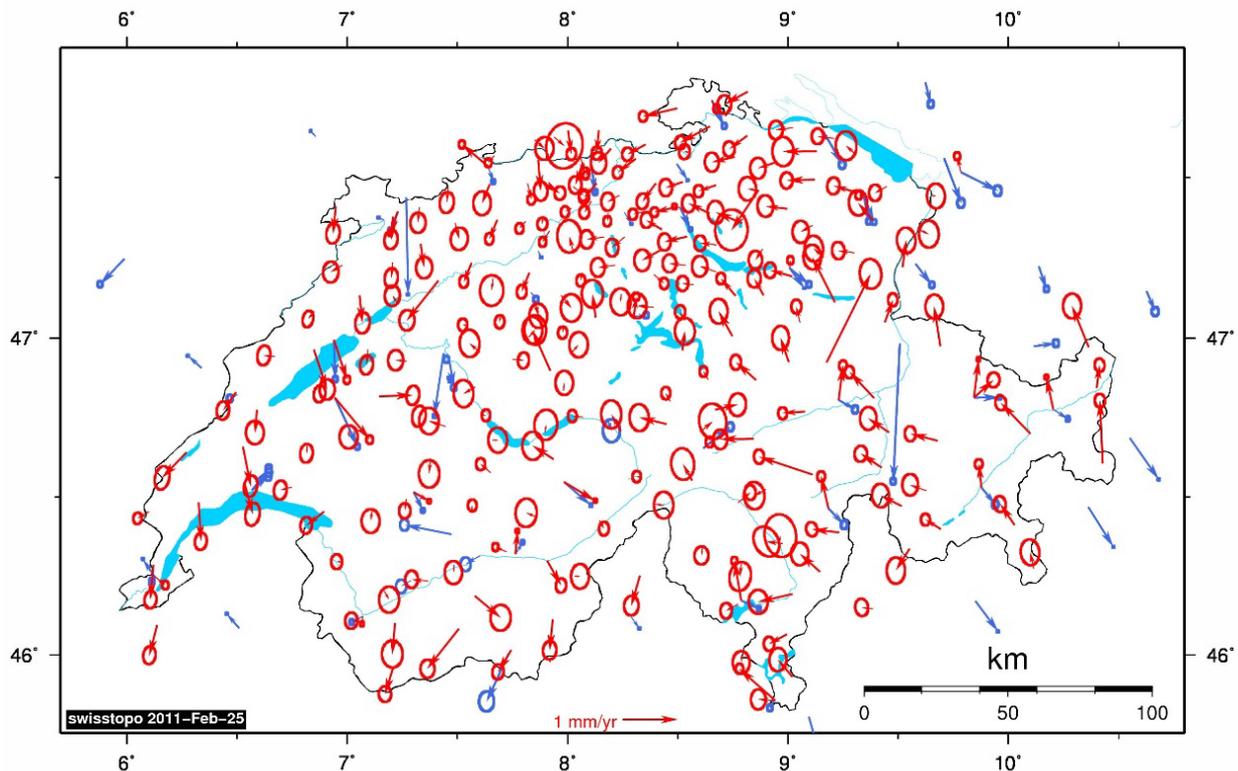


Figure 2-44 : vitesses horizontales estimées avec ellipses d'erreur des stations permanentes AGNES (en bleu) / des points MN95, mesures de plusieurs campagnes (en rouge) [état en 2010].

Les mesures GNSS des stations permanentes AGNES et les mesures répétées dans le réseau national MN95, resp. dans le cadre de référence cinématique en 3D CHTRFyy, forment donc conjointement avec les mesures de précision dans le réseau altimétrique national la base sur laquelle sont étudiés les mouvements néotectoniques de la croûte terrestre superficielle en Suisse. En conséquence, les représentations graphiques des mouvements / des vitesses sont réétablies et actualisées après chaque nouveau traitement des campagnes de mesures CHTRF qui se déroulent tous les six ans. Les résultats les plus récents publiés figurent dans *swisstopo Report 16-19* (paru en 2018, *non traduit*) : « LV95 / CHTRF2016 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2016) : Auswertung der GNSS-Messungen 2016 und Resultate der Gesamtausgleichung ». Certaines parties des informations ont également été publiées dans la revue spécialisée *cadastre* n° 28, déc. 2018 (p. 11-13) ainsi que dans l'article « La nouvelle mensuration nationale MN95 a 25 ans » paru dans *Géomatique Suisse* 11/2020.

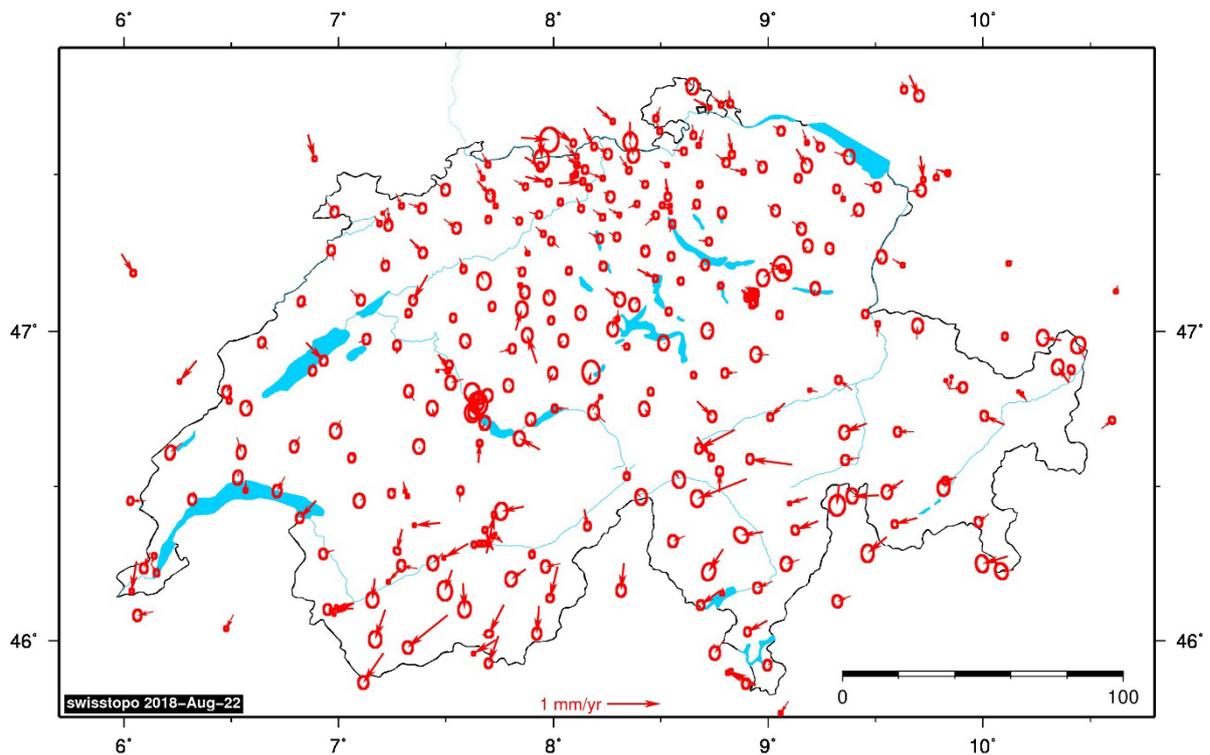


Figure 2-45 : champ des vitesses horizontales des points de référence MN95 et des stations permanentes AGNES (extrait pour la Suisse avec 306 stations, 443 en Europe) après le traitement de CHTRF2016 [état en 2016]. Les ellipses d'erreur indiquent l'ordre de grandeur de la précision de détermination des mouvements [issu de *swisstopo Report 16-19* resp. *cadastre n° 28*, publié en 2018].

On peut lire ce qui suit dans l'article « Stabilité du cadre de référence des coordonnées suisse » d'E. Brockmann dans *cadastre n° 28* : « L'hypothèse d'un champ de vitesses horizontales nulles est validée avec un écart-type d'environ 0,2 mm / an pour les directions nord et est. 95 % des points se déplacent tout au plus de 0,6 mm / an dans quelque direction que ce soit. On note une grande stabilité sur le Plateau (Mittelland). Toutefois, on identifie pour la première fois quelques régions en Suisse où le modèle de déplacement est similaire et permet de conclure à des mouvements tectoniques. Ces régions se situent au sud du Rhône et du Rhin et les déplacements systématiques observés sont tout juste inférieurs à la limite de 1 mm / an. Dans le Jura, on reconnaît aussi des déplacements systématiques, mais de moindre ampleur. »

L'analyse de séries temporelles sur plus de dix ans des stations permanentes AGNES et EPN/IGS permet aussi d'estimer les vitesses verticales. Elles peuvent être comparées aux taux de soulèvement resp. de tassement de points de nivellement qui ont été observés trois fois au moins dans le nivellement fédéral dans un intervalle de plus d'un siècle.

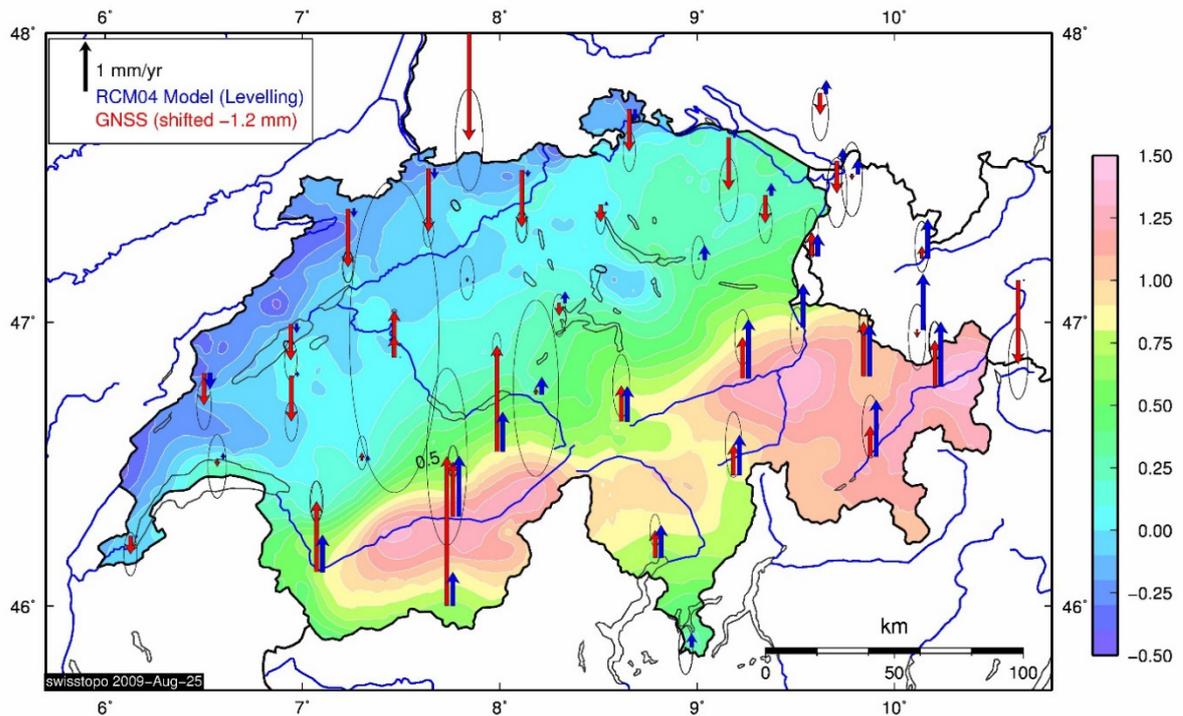


Figure 2-46 : vitesses verticales à partir de mesures GNSS permanentes (flèches rouges) et de mesures de nivellement (flèches bleues) sur des stations AGNES, le point de référence d'Aarburg se voyant attribuer une vitesse nulle. Les couleurs d'arrière-plan indiquent le modèle cinématique RAN95 (modèle RCM04).

Pour les vitesses verticales aussi (modification altimétrique/unité de temps), une représentation plus actuelle à l'issue du traitement de la campagne CHTRF2016 figure dans *swisstopo Report 16-19* :

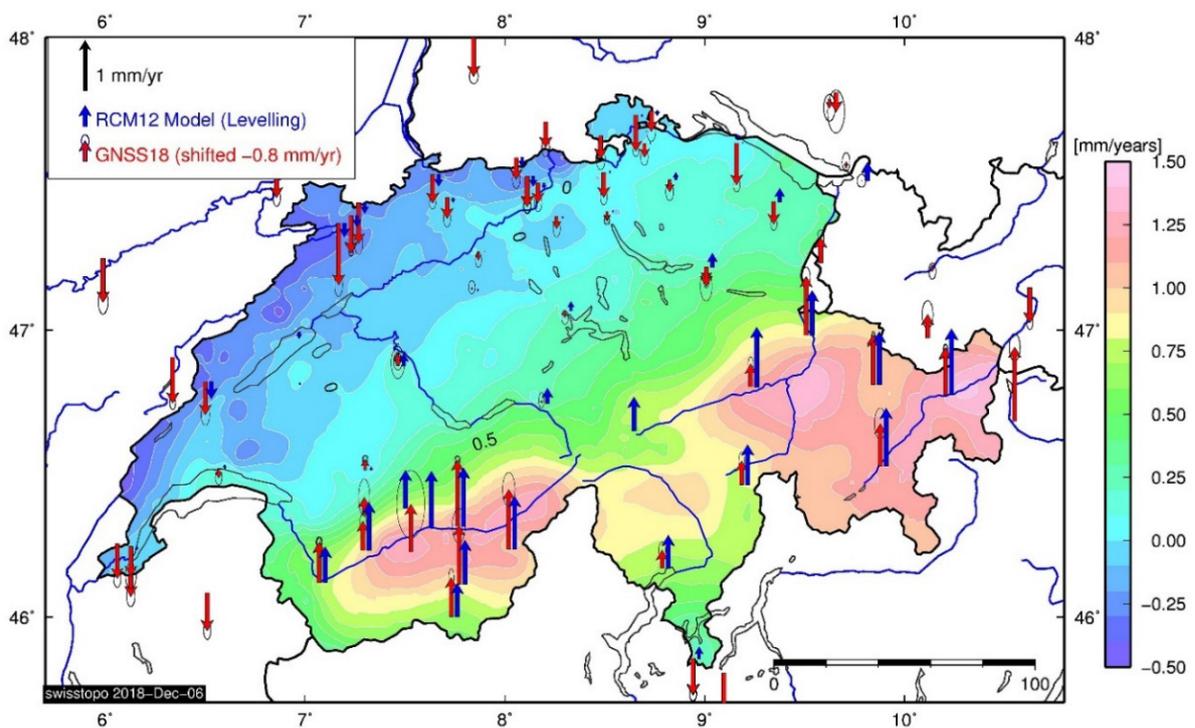


Figure 2-47 : comparaison des vitesses verticales issues du GNSS (flèches rouges) avec celles du nivellement (flèches bleues, issues du modèle RCM12) ; avec une adaptation de -0,8 mm/an en raison du point de référence différent du nivellement (Aarburg).



Les résultats de la campagne de mesures GNSS de 2022, resp. du jeu de données CHTRF2022, affineront un peu plus encore ceux des études cinématiques et accroîtront la précision ainsi que la fiabilité de ces dernières. Ils seront publiés en temps voulu.

Les résultats les plus récents des estimations des vitesses sont toujours disponibles sur la plateforme Internet du PNAC de swisstopo (<http://pnac.swisstopo.admin.ch/>). L'utilisation du visualiseur de géodonnées <https://map.geo.admin.ch/> permet d'intégrer des cartes géologiques et tectoniques en complément des couches d'importance pour la mensuration, afin de procéder à des comparaisons.

A l'époque de la définition de MN95 (dans les années 1980), on estimait encore que les soulèvements alpins calculés sur la base de mesures répétées dans le nivellement fédéral (atteignant jusqu'à 1,5 mm par an environ) étaient principalement causés par la poussée des plaques tectoniques (plaques africaine et eurasienne). Des déplacements horizontaux trois fois plus importants étaient par conséquent attendus en Suisse sur la base de l'interprétation des stratifications géologiques.

Une analyse du champ de vitesses montre cependant que 95 % des points MN95 se déplacent tout au plus de 0,6 mm / an dans quelque direction que ce soit. Si le Plateau (Mittelland) témoigne d'une grande stabilité, on reconnaît quelques régions où le modèle de déplacement est similaire, ce qui pourrait indiquer des influences tectoniques. Les régions présentant des mouvements systématiques se trouvent dans les Alpes, au sud du Rhône (en Valais) et du Rhin antérieur et postérieur (dans les Grisons), mais également dans le Jura. Les mouvements horizontaux et verticaux sont donc du même ordre de grandeur. Cela semble indiquer que le soulèvement alpin est dû en grande partie à des mouvements de compensation isostatique consécutifs à la fonte des calottes à l'issue de la dernière ère glaciaire et pour une faible partie à la tectonique alpine.

C'est surtout en raison de ces mouvements horizontaux (néotectoniques) relativement faibles en Suisse, par rapport à la précision de leur détermination, mais aussi en comparaison de mouvements de surface de natures différentes (comme des glissements de terrain), qu'aucun modèle cinématique en 3D CHKM95 d'ampleur nationale n'a encore été publié à ce jour, sans pour autant qu'il s'agisse d'un « champ de vitesses nul ». Les données et les résultats des mesures à venir devraient également faire l'objet d'études approfondies menées en collaboration avec la Nagra, le Service sismique suisse et les services spécialisés en géologie. Leurs résultats devraient fournir une base de qualité dans les prochaines décennies pour développer le modèle cinématique de la Suisse CHKM95.

C'est enfin pour tracer une perspective que l'on renvoie ici aux principes fixés par la direction de swisstopo pour les évolutions futures. Lors du séminaire des 28 et 29 juin 2016 à Gerzensee, la direction formula la **mesure E4** suivante dans la **stratégie 2020** de swisstopo : « *swisstopo met à disposition les bases géométriques permettant de surveiller les modifications de la surface terrestre à l'échelle du pays entier.* »

Les mesures suivantes ont ainsi été formulées : swisstopo ...

- (E4.1) - met à disposition la référence spatiale (géométrique) homogène pour les programmes d'observation de la Terre, les réseaux d'observation géodésiques et géophysiques (en surface comme en sous-sol) et les mesures de déformation en Suisse, son utilisation est encouragée ;
- examine des mesures visant à la mise à disposition pérenne de l'infrastructure requise en tenant compte des décisions et des prescriptions en matière de gouvernance de l'UN-GGIM et du GIAC pour ce qui concerne le GGRF (Global Geodetic Reference Frame) ;
 - garantit sa participation dans la durée à des programmes, systèmes et services d'observation internationaux tels que GGOS, IGS, EUREF et ILRS (notamment avec Zimmerwald et CODE) ;
- (E4.2) - définit et établit un jeu de géodonnées de base d'ampleur nationale des mouvements de surface (horizontaux et verticaux) en tant que nouvelle prestation officielle ;
- clarifie le potentiel de différentes méthodes d'observation, notamment l'interférométrie RSO différentielle (D-InRSO) et les conditions-cadre requises pour leur emploi ;



(E4.3) - évalue le recours à de nouvelles technologies dans le domaine de la détermination altimétrique de précision centimétrique/millimétrique (par exemple le nivellement GNSS).

En novembre 2016, le domaine Géodésie demanda en ces termes (*texte traduit pour les besoins du présent rapport*) à la direction de swisstopo de lancer le **projet P0198 « Nouvelles technologies de mesure »** : « Dans le secteur de la géomatique, divers types de capteurs mis sur le marché ces dernières années (scanners laser TLS / ALS, combinaison scanner 3D - station totale (multistation), radar terrestre (GBRI), InRSO assistée par satellites, etc.) ont tous en commun de permettre des observations à large échelle de mouvements de la surface terrestre ou sur de grands ouvrages d'art. Le projet P0198 « Nouvelles technologies de mesure » vise à déterminer les domaines dans lesquels ces nouvelles technologies peuvent revêtir une utilité pour swisstopo en matière de mensuration nationale géodésique et de mensuration d'ingénieur. La contribution de ce projet se situe donc dans le droit fil des « mesures relatives aux axes stratégiques de 2020 » de swisstopo (mesure E4). Les conditions-cadre, les avantages, resp. les nécessités propres aux différentes méthodes d'observation doivent par ailleurs être clarifiés et une analyse coûts/bénéfices doit être conduite. Les connaissances de base requises sont ainsi obtenues, les coopérations possibles sont analysées, les cas d'application dans la mensuration nationale comme un nouveau jeu de géodonnées de base « Mouvements du sol » sont identifiés et l'acquisition de nouveaux instruments ou technologies de mesure est préparée. »

Le 15 novembre 2016, la direction de swisstopo donna son feu vert au démarrage de la phase de conception du projet, approuva son organisation et demanda à son responsable, Sebastian Condamin, de lancer les mandats appropriés. L'élaboration d'un nouveau jeu de géodonnées de base des mouvements de surface en Suisse à partir d'analyses de séries temporelles interférométriques de données In-RSO en résultat en collaboration avec l'OFEV. La production fut cependant externalisée, dans le cadre d'un appel d'offres de l'OMC. Le **jeu de données** porte le nom de produit « **swissGroundMotion** ».

Il est enfin précisé dans les **champs d'action stratégiques 2025** que « swisstopo permet la surveillance des mouvements de la surface terrestre à l'aide de données de base ». Il est ainsi garanti que l'objectif formulé par le domaine Géodésie dans les premières lignes du présent chapitre dans le cadre des OMN95 puisse continuer à être poursuivi dans la durée.

2.9.3 Etudes et analyses de déformations ; projets Swiss4D et Swiss4D-II

C'est sur fond de débats scientifiques sur l'« hypothèse de Wegener » et la dérive des continents, durant les années soixante du siècle passé, que les questions concernant l'étude des mouvements de la croûte terrestre à partir d'observations répétées furent aussi discutées au sein de la communauté scientifique des géodésiens. Les rapports sur les premières études menées en Suisse portèrent sur la tentative visant à déterminer des déplacements horizontaux à partir de mesures de triangulation répétées [cf. annexe 2.1.3: Kobold et Habib, 1966]. Les premières indications relatives à de possibles mouvements verticaux en Suisse résultèrent de la comparaison des premières mesures doubles du nivellement fédéral, systématiquement effectuées par swisstopo à partir de 1943. Lors de l'Assemblée générale de l'Union géodésique et géophysique internationale (IUGG) qui eut lieu en 1967 en Suisse, on fit état pour la toute première fois de soulèvements significatifs de la vallée du Rhin (Sargans) par rapport à Rorschach et Walenstadt, à partir de la comparaison de lignes du nivellement fédéral mesurées de manière répétée [CGS, 1967]. La remesure du profil nord-sud Bâle–Saint-Gothard–Faido entre 1967 et 1970 marqua une vraie rupture. Des hypothèses de nature à expliquer ces phénomènes du point de vue géophysique furent également discutées dans ce contexte. On en identifia deux, à savoir des mouvements de compensation isostatique liés à la fonte des calottes depuis la dernière glaciation et/ou la tectonique alpine.

Concrètement, les études furent menées dans le cadre de projets. Toutefois, les analyses cinématiques d'ampleur nationale se fondent toujours sur les mesures répétées ou permanentes des réseaux de la mensuration nationale, notamment du réseau national GNSS MN95, du réseau permanent GNSS AGNES (séries de mesures CHTRF95) et du nivellement fédéral (compensation cinématique de RAN95).

2.9.3.1 Projet Swiss4D

Le projet Swiss4D de swisstopo (projet P0024, 2001–2005) visait à réaliser des analyses de mouvements récents de l'écorce à l'aide de données de la mensuration nationale (AGNES, MN95, RAN95). Les données



géodésiques devaient aussi être combinées avec des données géophysiques (du Service sismique suisse par exemple) et être interprétées conjointement avec elles. Un modèle en 4D de la Suisse devait en résulter (modèle cinématique en 3D, CHKM95), destiné à compléter le système de référence géodésique CHTRS95.

Le cœur du projet était constitué par un contrat (projet de recherche et de développement, PRD) conclu avec le GGL de l'ETH Zurich comportant les tâches suivantes :

- 1) Documentation des bases théoriques et des résultats concrets existant en matière d'analyse de déformations et de formation de modèles, documentation des informations sismiques / géologiques, tectoniques et éventuellement gravimétriques disponibles en Suisse.
- 2) Développement de la méthode et du logiciel d'analyse des données de mesure GPS recueillies périodiquement ou en continu à partir d'AGNES ainsi que des données de la mensuration nationale (y compris les données de nivellement de la compensation de RAN 95 et les données de la compensation de diagnostic DIA93, pour autant que ce soit judicieux) afin de calculer un modèle en 4D de la Suisse (modèle cinématique en 3D, CHKM95). Des programmes assurant la représentation graphique des données de déformation et des informations stochastiques associées doivent être mis à disposition et faciliter l'interprétation géoscientifique des résultats.
- 3) Analyse géodésique des déformations et calcul provisoires de CHKM95 (champ de vitesses en 3D, champ de déformations, etc.) à partir d'AGNES, EUREF et ITRF (éventuellement complétés par d'autres données issues de l'espace alpin ; ex. « Alpine Network » ou EUCOR/URGENT) ainsi que des données de la mensuration nationale (réseau GPS MN95, RAN95, éventuellement MN03).
- 4) Interprétation géoscientifique provisoire au vu des résultats et corrélation avec les informations sismiques / géologiques. Mise en relation avec les modèles géodynamiques (champ de déformations / de contraintes).
- 5) Recommandations en vue d'approfondissements possibles des études géoscientifiques et concernant la suite du processus en matière de mensuration nationale.

Le résultat principal des travaux effectués au GGL fut la méthode « Adaptive Least Square Collocation (ALSC) » permettant de déterminer et d'interpoler des champs de vitesses en 3D et des tenseurs des déformations inhomogènes et anisotropes. Développé par le Dr Ramon Egli au GGL/ETHZ dans le cadre de ce PRD, le logiciel ad hoc fut installé puis utilisé en pratique au sein de swisstopo. Tout est documenté dans [swisstopo Report 04-39]. Le rapport final du PRD, incluant le mode d'emploi du programme ALSCStrain, constitue le *swisstopo Report 04-47*. La méthode fut aussi présentée sous forme de poster au symposium d'EGS 2004. Et lors du *2nd Swiss Geoscience Meeting* (le 20 novembre 2004 à Lausanne), le professeur A. Geiger présenta une conférence à ce sujet intitulée « A Kinematic Model of Switzerland and its relation with alpine Orogenesis and recent Seismicity ».

Les enseignements tirés du projet principal et le logiciel ALSCStrain furent appliqués aux données de la mensuration nationale en 2005. A partir des résultats de la compensation cinématique du nivellement fédéral pour la détermination du nouveau réseau altimétrique national RAN95 (A. Schlatter), de la compensation globale de toutes les campagnes de mesures GPS dans le réseau MN95 (E. Brockmann, D. Ineichen) et des données du réseau AGNES sur plusieurs années (U. Wild, S. Grünig), un champ de vitesses tridimensionnel fut interpolé pour la Suisse entière avec ALSCStrain et les composantes principales du tenseur des déformations purent être calculées (U. Marti, A. Wiget). Le projet livra ainsi un premier modèle approché pour la cinématique en Suisse en guise de résultat. L'état des connaissances à ce stade fut présenté par A. Wiget lors du *3rd Swiss Geoscience Meeting* (19 novembre 2005 à Zurich), sa conférence s'intitulant : « The project Swiss4D : A kinematic model of Switzerland derived from geodetic measurements; a status report ». Des études approfondies furent en outre conduites dans le nord de la Suisse pour le compte de la Nagra [swisstopo Report 04-40].

2.9.3.2 Projet Swiss4D – extension RSO

Une demande d'extension du projet Swiss4D fut déposée par le domaine Géodésie auprès de la direction de swisstopo en mars 2003 (projet P0042 – extension RSO), afin de pouvoir étudier une technique supplémentaire, en plus des méthodes de mesure géodésiques, à savoir l'interférométrie différentielle radar à



synthèse d'ouverture (D-InRSO). Car si le nivellement et les mesures GPS permettent la saisie ponctuelle ou linéaire de mouvements ou de déplacements horizontaux et verticaux à la surface de la Terre, l'interférométrie différentielle RSO fournit des informations surfaciques sur les zones étudiées. Du fait de la disponibilité des images RSO (satellites ERS par exemple), cette technique était cependant cantonnée aux deux dernières décennies.

Les résultats de l'étude de GAMMA Remote Sensing sur le thème de la D-InRSO figurent dans un swisstopo Report (Urs Wegmüller (2004) : *INSAR analysis for land subsidence monitoring, swisstopo Report 04-57*, août 2004).

D'autres études et comparaisons entre des mesures de déplacements via GNSS et interférométrie radar furent réalisées ultérieurement par swisstopo. Le lecteur est ici renvoyé à la publication de M. Kistler, E. Brockmann, S. Condamine, A. Schlatter et A. Wiget (2016) lors du *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)* à Vienne [cf. annexe 2 chapitre 2.1.3].

2.9.3.3 Projet Swiss4D-II

La détermination de coordonnées dans les cadres de référence géodésiques et de leurs modifications dans le temps fait partie des missions premières de la géodésie et de la mensuration nationale. Aujourd'hui, la connaissance des processus tectoniques au sein d'un pays est indispensable pour surveiller son territoire. Le 7 août 2007, la direction de swisstopo donna donc son aval à la demande du domaine Géodésie concernant le projet Swiss4D-II (projet P0113, 2007–2013) qui s'inscrivait dans la continuité de son prédécesseur. On reconnut à ce projet le statut de contribution du domaine Géodésie à la surveillance du territoire et d'élément important d'études concernant le changement global (Global Change) resp. du programme « Observing the Earth – the Living Planet » de l'ESA.

Les buts principaux énumérés dans la demande du projet purent tous être atteints, à savoir :

- 1) Analyse des conditions géologiques / tectoniques locales et régionales :
Les conditions géologiques sur l'ensemble des stations AGNES et des points MN95 furent récapitulées au sein d'un tableau. Il figure dans le 3^{ème} rapport intermédiaire du GGL, à l'annexe A. On étudia par ailleurs l'existence d'une corrélation entre mouvement et pente du versant. Les résultats sont présentés au chapitre 2 du 3^{ème} rapport intermédiaire.
- 2) Analyse des réseaux et des mesures géodésiques :
L'analyse des séries temporelles sur les stations AGNES est documentée dans le 1^{er} rapport intermédiaire. Elle comprend le filtrage « Common Mode », l'analyse de corrélations, les variations saisonnières, la détection de sauts et celle de blocs.
- 3) Amélioration des méthodes de traitement des mesures géodésiques :
En cette matière, on chercha surtout à déceler d'éventuels multitrajets sur les stations AGNES. Tout est documenté au chapitre 1 et à l'annexe B du 3^{ème} rapport intermédiaire.
- 4) Amélioration du logiciel ALSCStrain / STRAIN pour l'interpolation et l'analyse en 3D des données géodésiques (méthode) :
Le logiciel ALSCStrain fut d'abord l'objet d'une légère extension dans le cadre d'un mandat restreint confié à R. Egli, puis fut adapté aux besoins de swisstopo. Le GGL se chargea ensuite du portage sur R en ajoutant une interface Python. L'extension en 3D et l'acceptation d'autres formats d'entrée furent également entreprises. Le logiciel put être installé et testé avec succès au sein de swisstopo. La méthode et le logiciel sont décrits en détail dans des rapports internes et dans la référence bibliographique suivante : Egli, R., A. Geiger, A. Wiget, and H.-G. Kahle (2007) : A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformation: first results in the Swiss Alps, *Geophysical Journal International*, 168(1), 1–12, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03138.x>.
- 5) Extension de la méthode des études par des mesures géophysiques :
C'est surtout l'intégration des résultats issus de données sismiques, notamment le mécanisme au foyer du séisme, qui était au centre de l'attention. Ces travaux sont documentés dans le 2^{ème} rapport intermédiaire. L'utilisation initialement prévue d'autres données (comme l'exploitation des données recueillies lors des sondages effectués) aurait largement dépassé le cadre imparti au projet.



6) Délimitation du champ d'activité pour des études géoscientifiques :

La solution finale présentée comprend toutes les données disponibles jusqu'à présent issues d'AGNES, de CHTRF et de RAN. Le modèle cinématique calculé CHKM peut être utilisé pour d'autres études. De même, le logiciel mis au point peut servir pour d'autres données, des glissements locaux par exemple. Des problèmes subsistent encore dans le modèle élaboré, aux marges de la zone d'étude. L'intégration de données des secteurs limitrophes des pays voisins pourrait apporter de la stabilité ici.

Les vitesses tectoniques étant très faibles en Suisse (inférieures à 1 mm/an environ), les mouvements tectoniques calculés et le bruit des mesures restent du même ordre de grandeur actuellement. Cette situation devrait cependant s'améliorer à l'avenir, à mesure que des séries temporelles plus longues deviendront disponibles.

La conclusion suivante a été tirée dans le rapport final du projet Swiss4D-II : la déformation tectonique récente en Suisse est très faible par rapport à d'autres influences. Les coordonnées des stations sont soumises à diverses influences : instabilités des bâtiments et des fondations des stations, mouvements locaux, variations quotidiennes et saisonnières dues à la température et à l'hydrologie. Toutes ces influences sont du même ordre de grandeur, de niveau submillimétrique à millimétrique. Séparer un signal tectonique est donc ardu dans de telles conditions. Si l'analyse des séries temporelles des stations AGNES met en lumière les mouvements locaux causés par les variations de niveau des eaux souterraines, par la température, etc., il a aussi été montré que les mesures des campagnes CHTRF peuvent servir à acquérir des informations tectoniques. Les influences locales peuvent être éliminées en utilisant des méthodes de collocation, le signal total étant décomposé en différentes longueurs d'ondes. La prolongation en sous-sol du champ de déformations depuis la surface reste une tâche délicate. De très nombreuses hypothèses doivent être formulées ici. A l'heure actuelle, la prolongation en sous-sol n'est possible qu'à l'aide de modèles très simples (de type Thin Plate Model).

Le rapport final du projet et tous les rapports du GGL/ETHZ concernant le projet ont été regroupés au sein de swisstopo-Report 13-08. Après la clôture du projet, les résultats ont encore donné matière à une thèse de doctorat qui a été publiée dans la série des *Travaux géodésiques et géophysiques exécutés en Suisse* de la Commission géodésique suisse [A. Villiger (2014): Improvement of the Kinematic Model of Switzerland (Swiss4D-II) ; CGS Volume 90].

2.9.4 Etudes de déformations locales

Outre les études d'ampleur nationale, swisstopo a procédé et procède toujours à des études portant sur des mouvements et des déformations locaux de la surface terrestre resp. du sous-sol (par exemple dans des tunnels). Certaines de ces études ont été réalisées pour le compte de maîtres d'ouvrage ou en collaboration avec eux, ces derniers ayant également financé des mesures supplémentaires.

A titre d'exemples, on mentionnera ici les études suivantes :

- le réseau de contrôle géodésique de Zoug (**Zugerbuch**) mis en place pour le compte de la ville et du canton de Zoug à la suite de l'effondrement du 5 juillet 1887. On compléta le réseau de nivellement initial en 1975 par un réseau de contrôle planimétrique au moyen de mesures trigonométriques, remesuré tous les six ans ; des mesures GPS/GNSS sont aussi effectuées depuis 1995, surtout pour la planimétrie [cf. TB 95-07, TB 96-01, TB 00-18, *swisstopo Report 06-22*, *swisstopo Report 11-12* et *swisstopo Report 16-09*];
- les mesures de glissement de terrain au **lac de Wägital** (SZ), réalisées pour le compte de l'exploitant de la centrale (Kraftwerke Wägital) par des méthodes classiques et GPS-RTK [cf. par exemple *swisstopo Reports 93-04*, *95-08*, *96-06*, *97-04*, *98-04*, *99-04*, *00-10*];
- les nivellements de précision à **Rheinfelden-Riburg** pour surveiller les tassements dans la zone d'extraction des Salines du Rhin pour le compte du canton d'Argovie [cf. par exemple TB 98-13];
- les mesures visant à surveiller des versants instables effectuées depuis de longues années au-dessus de Silenen (UR), sur le flanc ouest de la **Kleine Windgälle**, pour le compte du canton d'Uri (Amt für Forst und Jagd / Office de la forêt et de la chasse) et des Chemins de fer fédéraux CFF [cf. par exemple



swisstopo Reports 01-37, 03-23, 15-24 ; dans ce secteur, des comparaisons avec des mesures radar (InRSO) ont également été réalisées et publiées [cf. Kistler et al. JISDM 2016] ;

- le réseau « **Neotectonik Nord Schweiz** », pour le compte de la Nagra [cf. TB 87-01, TB 90-03, TB 92-05, TB 95-02, TB 96-05 et TB 97-20 ainsi que *swisstopo Reports 04-40, 05-31, 04-45 et 07-03*] ; les résultats obtenus et les enseignements tirés ont aussi été publiés dans des rapport internes de la Nagra (NTB, NAB) [cf. entre autres NTB 99-08, NAB 06-04, NAB 07-27, NTB 08-04 et NAB 14-26] ; ces mesures GPS très précoces furent combinées en 1988 avec des mesures pour les tunnels ferroviaires prévus de Wisenberg et Adler [cf. TB 89-04, TB 89-05, TB 90-02, TB 91-03 et TB 95-01] ; les campagnes de mesures ultérieures furent intégrées aux mesures pour le réseau national MN95, resp. combinées aux campagnes CHTRFyy [par exemple TB 98-15] ;
- les analyses de déformation au « **Saint-Gothard** » effectuées à partir du nivellement fédéral dans le cadre du nouveau réseau altimétrique national RAN95 [cf. TB 97-40 « Untersuchung der Senkungerscheinungen im Bereich des Gotthard-Strassentunnels », TB 99-10 « Kinematische Ausgleichungen und Deformationsanalyse im Gotthardgebiet, Stand 1999 » et TB 00-13 « Ergebnisse der kinematischen Analyse der Landesnivellements im Gotthardgebiet und grossräumige Überwachung des Projektgebiets mit Hilfe von Präzisionsnivellements und mit GPS-Permanentnetzen (Beitrag zu Ingenieurvermessung 2000 »] ;
- les nivellements de précision, les polygonaux de précision et les analyses de déformation dans le **tunnel de base de Hauenstein** réalisés pour le compte des CFF et de la Nagra [cf. TB 89-03, TB 90-04, TB 91-02, TB 92-03, TB 92-04, TB 95-04, *swisstopo Report 03-24*] ;
- les études néotectoniques (RCM) dans le **tunnel de faite du Lötschberg** ainsi que sur le tronçon Goppenstein – Steg, effectuées pour le compte de la société BLS AlpTransit SA [cf. TB 95-28, TB 96-08, TB 99-16, TB 99-37 et TB 01-17] ;
- les **nivellements de précision dans la région de Bâle** en collaboration avec le GGL ETHZ dans le cadre du projet EUCOR-URGENT : Recent vertical movements from precise levelling in the vicinity of the city of Basel, Switzerland [*swisstopo Report 03-27* et Schlatter et al., 2005].

Les résultats de ces études et d'autres investigations locales ont été documentés dans des rapports techniques et des publications *swisstopo Reports* de type C (*rapports concernant des travaux effectués pour le compte de tiers, contrat d'entreprise*), pour lesquels le copyright est détenu par le mandant.

2.9.5 Etat actuel et développements futurs

Tableau 2-10 : mensuration nationale cinématique 'CHKM95' : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Des vecteurs vitesses 3D globaux sont disponibles dans l'ITRS pour le point fondamental de Zimmerwald à partir des observations SLR réalisées dans la durée à la géostation et des traitements GNSS de l'IGS.• Un modèle cinématique détaillé des vitesses verticales (CHKVM95, champ de vitesses discret et son interpolation) est déduit en qualité de sous-produit de la compensation cinématique du RAN95.• Un champ de vitesses en 3D résulte de la compensation globale d'au moins quatre époques du réseau national GNSS.• Des séries temporelles (champs de vitesses en 3D discrets) résultent des données de mesure recueillies du réseau AGNES.• La méthode employée pour l'étude cinématique et géodynamique a été développée dans le cadre du	<ul style="list-style-type: none">• Vecteurs vitesses 3D du point fondamental de Zimmerwald via le traitement combiné de données SLR et GNSS.• Le champ de vitesses en 3D discret est calculé comme une vraie combinaison des mesures GNSS issues du réseau permanent AGNES et du réseau de référence GNSS.• L'intégration de tous les systèmes GNSS et des constellations de satellites plus fournies lors du traitement des nouvelles mesures améliorent continuellement la précision altimétrique des stations AGNES, resp. du réseau de référence GNSS et donc aussi celle du champ des vitesses en 3D.• Le champ de vitesses issu de RAN95 fait l'objet d'une compensation combinée avec celui issu du réseau de référence GNSS / AGNES.



projet Swiss4D à partir de mesures géodésiques répétées et testée sur de premiers jeux de données.

- Une première étude locale a été conduite dans le nord de la Suisse pour le compte de la NAGRA.
- Diverses études locales sont disponibles avec des époques de mesure remontant pour certaines au début des années 1970, (réseaux : RCM-Bâle, Le Pont, Tourtemagne, Visp-Zermatt etc.).

• La méthode employée pour l'étude cinématique et géodynamique continue à être améliorée et est appliquée aux nouveaux jeux de données.

• Les études locales sont poursuivies en utilisant de nouvelles méthodes de mesure telles que l'interférométrie différentielle RSO (D-InRSO).

Références bibliographiques relatives à 2.9 :

Plusieurs articles traitant de la cinématique de la mensuration nationale resp. de la géodynamique de la Suisse sont mentionnés à l'annexe 2 (§2.1.3). Des swisstopo Reports relatifs aux projets Swiss4D et Swiss4D-II figurent au paragraphe 2.3.9 « Modèle cinématique CHKM95 (projet Swiss4D) ».



2.10 Documentation, communication et prestations de services

2.10.1 Objectif stratégique

Les concepts, les bases et les données des œuvres de la mensuration nationale OMN95 sont documentés, archivés et mis à la disposition des utilisateurs sous une forme moderne et adaptée, en recourant à des canaux de communication actuels et à des services Web conviviaux.

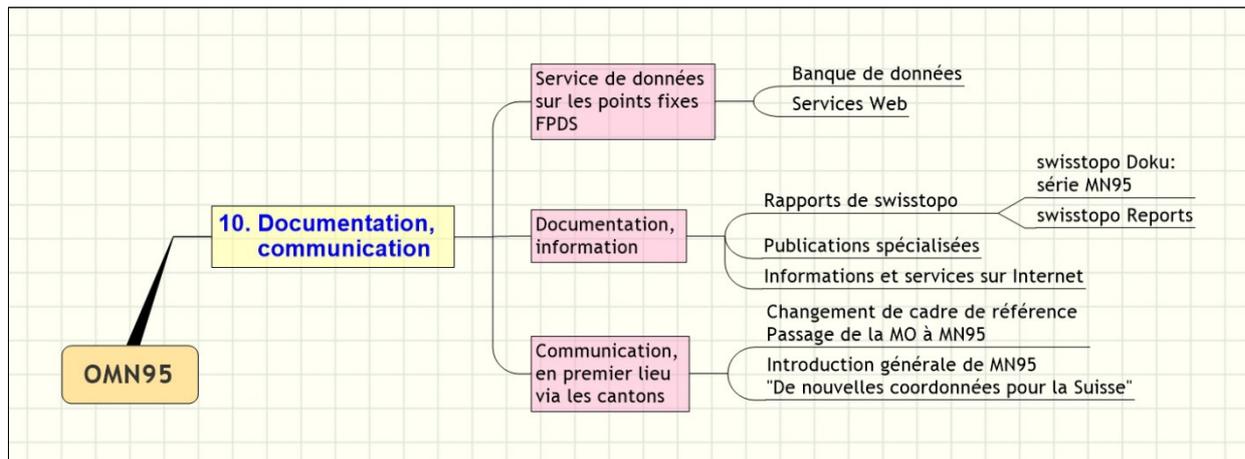


Figure 2-48 : carte heuristique (mindmap) des OMN95 : contenu du thème 10 – documentation, communication des 'OMN95'

2.10.2 Documentation et publications

Les bases techniques de la « nouvelle mensuration nationale MN95 », resp. des « Œuvres de la mensuration nationale OMN95 », ont été documentées de manière très fouillée et intégralement publiées entre 1995 et 2002 dans la série documentaire sur les travaux technico-scientifiques de la L+T sous le nom de « **Berichte aus der L+T (rapports du S+T)** ». Cette même série a ensuite pris le nom de « **swisstopo-Doku** ». Tous les rapports sont consultables sur Internet à l'adresse :

https://shop.swisstopo.admin.ch/fr/products/publications/geodesy/swisstopo_doku_pdf

Tous les rapports de la série MN95 sont intitulés « Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse MN95, xx^{ème} partie » (en allemand : Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95, Teil nn) suivi du sous-titre propre à la partie concernée. La liste de tous les rapports de la série MN95 figure à l'**annexe 2.2**.

Tous les développements, toutes les campagnes de mesures et études associées du domaine Géodésie à partir des années 1990 sont documentés dans des « **Technische Berichte (rapports techniques)** » (TB) et des « **swisstopo Reports** ». Une liste (certainement incomplète) des rapports en lien direct ou indirect avec la définition des œuvres de la mensuration nationale OMN95 figure en **annexe 2.3**.

Les milieux spécialisés furent informés très tôt de la nouvelle mensuration nationale MN95. C'est d'abord dans la revue spécialisée suisse « *Mensuration, photogrammétrie, génie rural* » (désormais « *Géomatique Suisse* ») que swisstopo publia divers articles consacrés aux nouveautés inhérentes au GPS et à la définition de MN95. Des exemples de **publications spécialisées relatives à MN95**, resp. aux **OMN95** figurent à l'**annexe 2.1**. Une bibliographie très complète est proposée à la fin de la publication swisstopo-Doku 21 et dans la revue spécialisée « *Géomatique Suisse* », volume 11/2020. Au sein de swisstopo, on renverra ici au classeur d'archives 2 (communications aux médias, textes, publications spécialisées) du projet P0146 (communication à propos du changement de cadre de référence) ainsi qu'au **concept de communication dans swisstopo Report 11-14** (cf. § 2.10.4 suivant).



Les **documents relatifs aux points** constituent également une part importante de la documentation des OMN95. De nouvelles fiches signalétiques ont été créées pour l'ensemble des points MN95 et des stations AGNES, comportant des informations plus complètes comme la compatibilité GNSS. Elles peuvent aussi bien être consultées via le **service de données sur les points fixes FPDS**, exploité en partenariat avec les cantons, que sur Internet via <https://map.geo.admin.ch> (sous : Données de base et planification → Localisation).

Parmi les autres canaux d'information utilisés, on citera ici les publications de l'Office à destination de ses clients, à savoir la revue spécialisée « **cadastre** » et les « **swipos-News** » qui s'adressent aux utilisateurs du service de positionnement de swisstopo.

2.10.3 Groupes de travail spécifiques et projets concernant la communication et l'introduction de MN95

En 1993 déjà, la Direction fédérale des mensurations cadastrales (D+M) et swisstopo instaurèrent le **groupe de travail conjoint « Mensuration officielle – mensuration nationale 95 »**. Il avait pour tâche de fournir des bases de décision pour le passage de la mensuration officielle au nouveau système, resp. cadre de référence. Ses conclusions furent publiées en octobre 1995 dans le rapport final intitulé « Incidence de la nouvelle mensuration nationale 95 sur la mensuration officielle ». Le projet détaillé « Données géographiques / Mensuration nationale 95 » fut ensuite élaboré durant les trois années suivantes. La direction de swisstopo lança officiellement le **projet P0029 CC DG/MN95** le 22 février 2000, afin de garantir la disponibilité de géodonnées aussi bien dans le cadre de référence MN03 que dans le cadre MN95. Le transfert à long terme de toutes les données géoréférencées devait être examiné et préparé. Le groupe du projet élaborait le concept d'« Adaptation de la mensuration officielle au cadre de référence de la mensuration nationale 1995 (MN95) ». Il incombait par ailleurs au projet de déterminer s'il était judicieux ou non de changer de cadre de référence altimétrique officiel (en passant de NF02 à RAN95). Une réponse négative fut finalement apportée à cette question. La clôture du projet intervint en mars 2008. Le rapport final s'accompagna d'un répertoire de la documentation.

Le **projet qui prit sa suite (P0125, adaptation de la MO à MN95)** fut encore lancé en 2008. Selon l'article 53 OGéo, les cantons devaient en effet adapter la mensuration officielle au cadre de référence altimétrique MN95 avant la fin de l'année 2016, s'agissant de l'un des jeux de données de référence les plus importants et les plus complexes des géodonnées de base relevant du droit fédéral. L'équipe du projet aida à la mise à disposition des bases et des outils par swisstopo et endossa la responsabilité de l'accompagnement spécialisé, du pilotage et de la surveillance des processus au sein des cantons.

Une information de niveau adapté, fournie en temps voulu, et une bonne communication avec tous les acteurs impliqués étaient essentielles pour assurer la réussite de l'introduction de MN95 dans le pays entier. C'est pourquoi le responsable du domaine Géodésie de swisstopo proposa à l'organe de pilotage du programme d'impulsion e-geo.ch de lancer une action destinée à **sensibiliser un large public au changement de cadre de référence**. Ainsi, l'**action e-geo.ch 09-02**, inscrite dans le plan d'action de 2009 et approuvée par l'organe de pilotage le 5 novembre 2008, visait à sensibiliser le public ciblé, à l'informer en temps voulu et à un niveau adapté, mais aussi à communiquer sur le thème du changement de cadre de référence (CCR), y compris en dehors du milieu de la mensuration officielle, par exemple auprès des offices fédéraux produisant des géodonnées de base, des services de la géoinformation des cantons et des villes, d'autres producteurs et enfin de tous les utilisateurs de géodonnées. L'action 09-02 voulait sensibiliser largement au CCR, susciter une attitude fondamentalement positive de la part des acteurs concernés, informer des avantages et des expériences acquises et proposer des conseils compétents ainsi qu'un soutien adapté. L'action aida à faciliter le contact avec les partenaires d'e-geo.ch et de swisstopo en cette matière et à créer une base commune solide. Cette activité, resp. l'objectif d'améliorer l'état général des connaissances concernant le changement de cadre de référence MN03-MN95, fut également intégrée à l'accord de prestations 2009 de swisstopo avec le DDPS. En 2011, le comité de pilotage e-geo.ch adressa ses remerciements lorsque cette action limitée dans le temps se conclut avec succès. Elle eut ensuite un prolongement en interne, au sein de swisstopo, comme **projet P0146 Communication à propos du changement de cadre de référence**, la mise en œuvre du changement de cadre de référence se poursuivant chez les producteurs de géodonnées comme chez leurs utilisateurs.



Les projets P0125 et P0146 furent achevés en même temps, au printemps 2017, une fois le changement de cadre de référence effectif dans tous les cantons et les coordonnées MN95 introduites dans la mensuration officielle. Outre les mesures prises, le rapport final du projet P0146 mentionna aussi tous les moyens d'information et toutes les publications. Les paragraphes suivants exposent à présent ces mesures et détaillent ces moyens d'information.

2.10.4 Concept de communication et relations publiques

Les ingénieurs de la section, resp. du domaine Géodésie se mirent très tôt à tenir des conférences sur la nouvelle mensuration nationale MN95 lors de manifestations spécialisées, de colloques de swisstopo ou de séminaires organisés par des hautes écoles. On citera notamment ici les deux **journées d'information consacrées à la MN95**, qui ont respectivement eu lieu le 6 juin 1995 à l'ETHZ et le 13 octobre 1995 à l'EPFL. Le nombre des interventions augmenta par ailleurs une fois les bases légales clarifiées, donc après l'adoption de la LGéo. Deux nouvelles journées d'information se déroulèrent en 2009, également à l'ETHZ (30 octobre 2009) et à l'EPFL (27 novembre 2009), réunissant à chaque fois plus de 200 personnes. A cela s'ajoutèrent des interventions ponctuelles, par exemple à la Haute école du nord-ouest de la Suisse (FHNW, le 24 avril 2008), lors de la journée d'étude CSI-SIG du 1^{er} avril 2010, de la manifestation GIS/SIT 2010 (du 16 au 18 juin 2010), à la demande de l'association des entreprises électriques suisses AES (le 2 juin 2010), lors de l'« ESRI GIS-Day » (16 novembre 2011). Les **sessions de formation** que swisstopo proposa en collaboration avec le centre de formation Géomatique Suisse (CF-Geo) furent aussi utilisées de façon intensive.

C'est pour un cercle plus large de personnes et d'institutions intéressées que les domaines Géodésie et Direction des mensurations de swisstopo coéditèrent la **brochure d'information** « De nouvelles coordonnées pour la Suisse – Le cadre de référence MN95 » en novembre 2006, disponible en français, en allemand et en italien.

Dans le cadre de l'action e-geo.ch, resp. du projet P0146 déjà cité (cf. 2.10.3), un **concept de communication** détaillé fut établi et approuvé par la direction de swisstopo le 13 décembre 2011, à l'issue de contacts intensifs avec les groupes visés et les partenaires concernés. Il fut publié en français et en allemand en avril 2012, dans le document *swisstopo Report 11-14*. Il comporte une analyse de la situation et du contexte, une analyse SWOT, la description des objectifs et du public visé, celle des acteurs, des moyens et des canaux d'information ainsi qu'un échéancier avec les moyens requis. Les activités prévues furent regroupées dans un **plan directeur de la communication**. Un **plan d'action communication du CCR** fut par ailleurs établi pour les professionnels, un autre pour les clients spéciaux, un autre encore pour les utilisateurs généraux et enfin un pour le grand public.

Comme prévu dans l'OGéo, les **cantons** étaient responsables de l'exécution du changement de cadre de référence planimétrique, pour le 31 décembre 2016 au plus tard, puisque les données de référence de la mensuration officielle relèvent de leur compétence. Ils furent par conséquent les premiers clients, resp. maîtres de données, à informer et les plus importants aussi. Ainsi, lors de plusieurs journées d'étude consacrées à l'échange d'expériences et lors de la Conférence des services cantonaux du cadastre (**CSCC**) qui se tint le 2 décembre 2011 à Olten, des informations furent transmises aux géomètres cantonaux et aux responsables cantonaux des points fixes concernant la MN95 et le changement de cadre de référence. Il va de soi que la question de la communication optimale fut aussi abordée et que l'on discuta longuement du meilleur moyen pour swisstopo de prêter assistance aux cantons. Le 1^{er} avril 2014, la Direction des mensurations organisa également à Olten, avec le concours du domaine Géodésie, un **échange d'expériences national** et une **journée d'étude consacrée au changement de cadre de référence** qui connurent un vif succès.

Un soutien fut aussi apporté très tôt à des **entreprises externes** afin qu'elles préparent leurs logiciels (comme GEONIS d'ESRI Geocom, Geomedia/GEOS Pro d'Intergraph resp. a/m/t ou encore les produits de terra vermessungen ag) au passage à MN 95, proposent des brochures d'information à leurs clients et consacrent leurs propres conférences spécialisées à MN95, lesquelles attirèrent du reste un large public. swisstopo était en outre en contact étroit et permanent avec les fabricants de récepteurs GNSS géodésiques, à savoir Leica Geosystems et Trimble. Enfin, l'importateur général et représentant de Garmin



(récepteurs GPS pour la navigation et la randonnée), la société Bucher + Walt, fut lui aussi contacté et informé des nouveautés touchant le système des coordonnées suisses.

Le changement de cadre de référence ayant été effectué canton par canton, les utilisateurs des données et le grand public durent être informés en temps utile, soit peu avant la bascule dans leur canton. En revanche, de nombreuses **institutions et entreprises**, actives à l'échelle du pays entier, durent être sensibilisées très tôt au changement de cadre de référence et prévenues de l'introduction des nouvelles coordonnées (c'est notamment le cas des CFF ou de Swisscom). Il était particulièrement important que les **organisations à feux bleus** soient informées à un stade précoce, afin d'exclure toute possibilité de confusion ou d'interprétation erronée des nouvelles coordonnées lors de la communication du lieu d'un accident. C'est pourquoi la Centrale d'alarme nationale CAN, l'Office fédéral de la police FEDPOL et la REGA furent contactés en amont de la communication aux médias du 2 octobre 2012 (cf. ci-après). FEDPOL informa à son tour l'ensemble des services de police cantonaux (resp. les commandants de police), comme convenu. Le journal télévisé (« Tagesschau ») de la Radiotélévision suisse RTS fut lui aussi prévenu préalablement.

Il fallait et il faut toujours, du reste, avoir bien présent à l'esprit que les professionnels et les clients ayant besoin d'une précision centimétrique ou décimétrique dans les applications qu'ils déploient, sont réellement affectés par le changement de cadre de référence. Le **grand public** quant à lui (les randonneurs pour prendre un exemple concret) est uniquement touché par la nouvelle désignation à sept chiffres des coordonnées, les modifications étant parfaitement indolores au niveau du mètre. Comment communiquer alors à propos d'une modification dont tout le monde devrait avoir connaissance mais qui n'a d'impact véritable que sur une poignée d'utilisateurs ? En effet, il doit être impossible qu'un non-initié omette ou ajoute par ignorance ou inadvertance les nouveaux chiffres 2 resp. 1 placés devant les kilomètres (translations fictives de 2, resp. 1 million de mètres), parce qu'alors, le cadre de référence dans lequel les coordonnées sont exprimées ne peut plus être identifié. Une conséquence pourrait en être que des transformations soient réalisées en double, en pensant que les données sont toujours exprimées en MN03.

Autant dire que la communication s'est révélée particulièrement complexe et exigeante et que le domaine Géodésie est particulièrement redevable au service « Communication et Web » de swisstopo du soutien actif et compétent qu'il lui a offert. C'est par ailleurs en collaboration avec ce dernier et avec le domaine Cartographie que divers **clients clés furent contactés directement à l'automne 2012**, notamment le chef de l'Armée, le Club alpin suisse CAS et Suisse Rando.

Le soutien apporté par le service « Communication et Web » fut notamment important lors du lancement officiel des nouvelles coordonnées par le biais d'un **communiqué adressé aux médias** par swisstopo. Intitulé « **La Suisse se dote de nouvelles coordonnées** », il fut diffusé le **2 octobre 2012** via le service de communication du SG-DDPS sur le canal d'information officiel www.news.admin.ch. C'est la publication des feuilles mises à jour de la carte nationale au 1:25 000 de Bâle, Rodersdorf, Arlesheim et Damvant qui fournit l'occasion de communiquer sur ce thème aux médias puisqu'elles furent les premières à être publiées en présentant les nouvelles coordonnées MN95 en bordure de carte.

2.10.5 Autres canaux et supports d'information

La mise à disposition à un stade précoce de **modules de texte** et de **graphiques** aida bien la communication et facilita la publication de comptes rendus dans les médias. L'information s'adressant non seulement aux professionnels, mais aussi au grand public, les textes mis à la disposition des médias devaient être à la fois corrects sur le plan factuel et compréhensibles par tout un chacun. Madame Claudia Fahlbusch (entreprise escribo) fut engagée pour les produire. C'est en étroite collaboration avec le responsable du projet que Mme Fahlbusch rédigea des textes standard de longueurs différentes ainsi que les messages clés, concis, concernant MN95 (« L'essentiel en bref ») et les textes courts pour les « Questions les plus fréquentes – foire aux questions, FAQ ». Ces modules de texte furent mis à la disposition des médias.

Des contacts directs furent noués avec différents services média comme ceux du *Schweizer Baublatt* ou du CAS. La rédactrice en chef du *Baublatt* demanda au journaliste B. Kron de rédiger un article. Lui et M. U. Mosimann de la rédaction du périodique du CAS (*Die Alpen*) reçurent des informations, des illustrations et des graphiques supplémentaires de la part de swisstopo. Des contributions directement mandatées par



swisstopo ou ayant bénéficié d'un soutien de l'Office (rédaction du texte, graphiques) furent ainsi publiées dans les revues suivantes : *Baublatt* (B. Kron), *Bauen Heute* (B. Kron), *Die Alpen* (U. Mosimann), *Haustech* (B. Kron), *NZZ* (B.Ruh) et *NZZ am Sonntag* (A. Hirstein).

En 2011 déjà, des contenus spécifiques à la nouvelle mensuration nationale, aux nouvelles coordonnées et au changement de cadre de référence furent publiés sur **Internet** (<http://www.swisstopo.ch/mn95>). Ils s'adressaient non seulement au grand public, qui ne devait retenir en principe que l'introduction de nouvelles coordonnées à sept chiffres, mais également aux professionnels pour qui des contenus autrement plus fouillés furent créés (cf. aussi § 2.10.7). Toutes les informations étaient évidemment disponibles en quatre langues et complétées par des graphiques des plus parlants.

Les modules de texte et les graphiques furent aussi mis à la disposition des cantons pour leurs propres campagnes d'information. Et pour bien cibler les propriétaires fonciers, swisstopo conçut une **brochure** de quatre pages intitulé « **De nouvelles coordonnées pour la Suisse** », disponible en français, en allemand et en italien, transmise aux cantons en format numérique.

Les **utilisateurs de cartes** comptèrent également parmi les groupes cibles visés. C'est lorsque les premières cartes nationales comportant des coordonnées MN95 furent publiées, en septembre/octobre 2012, qu'un dépliant au format A5, comme les informations cartographiques, fut coproduit en quatre langues avec le domaine Cartographie et diffusé par les revendeurs de cartes. Le personnel de swisstopo fut quant à lui informé via un article publié dans le **journal interne TOPO** (n° 132, août 2012), traitant des nouvelles coordonnées sur les cartes nationales et revenant en détail sur le changement de cadre de référence MN03 → MN95. Des informations figurèrent par ailleurs dans le **rapport annuel 2013 de swisstopo**.

La société Lomotion AG, Berne, fut enfin chargée de tourner une brève vidéo relative aux nouvelles coordonnées. Intitulée « **De nouvelles coordonnées pour la Suisse** » (durée : 2'05), elle était disponible sur le site Internet de swisstopo et sur Youtube. D'autres vidéos sur le savoir-faire de swisstopo traitent du système des coordonnées suisses MN95 (<https://www.youtube.com/watch?v=m4nYnT8pHCU>) et du système de coordonnées global avec ses latitudes et longitudes géographiques exprimées en degrés (WGS84) (<https://www.youtube.com/watch?v=OSXC2E5Hd3c>).

S'agissant de l'Armée, resp. du **domaine Défense du Département**, les informations furent communiquées aux responsables du compte clé (Key-Account-Manager) Armée, resp. de l'Institut géographique militaire. Des contacts furent noués dès 1996 avec le chef d'état-major des Forces armées et le commandant des Forces aériennes, au stade de la définition du nouveau système de référence CH1903+ et de la préparation du nouveau cadre de référence MN95. Le 26 mars 2014, le comité spécialisé MilGeo approuva les directives d'action relatives à MN95, indiquant que l'Armée suisse se fondera à l'avenir sur le nouveau cadre de référence. swisstopo (le domaine Géodésie) participa également à la révision du **Règlement 55.082** (service topographique de l'artillerie), afin que le nouveau cadre de référence y soit présenté correctement.

Le nouveau cadre de référence MN95 fut aussi introduit et décrit de manière parfaitement compréhensible dans la 3^{ème} édition entièrement revue du **livre « Karten lesen »** de Martin Gurtner, publié par les éditions du CAS en 2010.

2.10.6 Informations des cantons

Comme déjà indiqué, les cantons étaient responsables de l'introduction du nouveau cadre de référence dans la mensuration officielle. C'est pourquoi le domaine Géodésie de swisstopo leur prodigua conseils et assistance, tout autant pour les questions techniques en rapport avec le changement de cadre que pour la communication à propos des nouvelles coordonnées. Les conseils spécialisés étaient aussi bien dispensés lors des diverses journées d'étude consacrées à l'échange d'expériences qu'à l'occasion de contacts directs, notamment avec les responsables des points fixes des cantons. Les outils logiciels nécessaires aux conversions, prioritairement effectuées avec FINELTRA/REFRAME bien sûr, furent également mis à disposition. Le domaine Géodésie développa même des programmes de transformation spéciaux pour certains cantons (comme Berne et Bâle-Ville). Ces travaux n'entrèrent cependant pas dans le cadre de ce projet et furent facturés aux cantons de façon à couvrir les frais engendrés.



Les services cantonaux spécialisés (offices de la géoinformation et des mensurations) étaient responsables de l'**information du grand public**. Toutefois, la mise en œuvre du changement de cadre de référence variait fortement d'un canton à l'autre, en termes d'organisation comme au niveau du calendrier. Pour ce qui est de la communication, les cantons purent notamment s'appuyer sur les modules de texte et les dépliants (flyers) mentionnés. Il est cependant frappant de constater que les cantons abordèrent la communication très diversement, chacun à sa manière en fait, tant et si bien que la présentation des nouvelles coordonnées et du changement de cadre de référence est riche de multiples variantes sur les différents **sites Internet des cantons**. Certains fournissent une information fouillée, comportant des textes explicatifs courts et des indications sur les géoservices mis à disposition par la Confédération (swisstopo) et les cantons. Les concepts de mise en œuvre du changement de cadre de référence sont parfois disponibles et des affiches spécifiques furent même produites par certains cantons (comme celui de Zurich). D'autres cantons, notamment les plus petits d'entre eux (AI, AR, JU), n'accordent qu'une place minimale aux nouvelles coordonnées.

Les **modules de texte** mis à disposition par swisstopo furent donc volontiers repris, mais en étant déclinés en de multiples variantes dans les communiqués aux médias des uns et des autres et plus encore sur les sites Internet des cantons. Le **dépliant destiné aux propriétaires** fut tout particulièrement apprécié. On relèvera enfin l'importance très variable accordée au thème de la modification des surfaces de parcelles dans le registre foncier. Si certains cantons traitèrent réellement la question en informant les propriétaires fonciers globalement, voire individuellement à partir d'un certain pourcentage de modification, d'autres en revanche estimèrent que ce thème ne méritait pas de traitement spécifique.

Le thème des **modifications de surfaces** (cf. § 2.4.3) fit en revanche les délices des journalistes. On en trouva trace dans de nombreux titres d'articles, par exemple « Der Kanton St. Gallen schrumpft », « il Grischun crescha » ou « Il Ticino si è ingrandito ». Au Liechtenstein, le titre de la *NZZ* du 17 mars 2014 « Liechtenstein geht auf Distanz zur Schweiz » / « Liechtenstein distanziert sich von der Schweiz » dans la version en ligne (*le Liechtenstein prend ses distances avec la Suisse*) fut même **élu phrase de l'année** par un jury spécialisé.

On citera enfin ici, en guise de « réaction externe », l'appréciation (*traduite pour les besoins du présent rapport*) portée par le centre de compétence des projets sur le projet P0146 « Communication à propos du changement de cadre de référence » : *l'équipe est parvenue à assurer la mise en œuvre du projet dans un délai de huit ans avec des moyens financiers modestes. La prudence manifestée lors de l'intégration des cantons et la bonne collaboration ont grandement contribué à ce succès et devraient avoir valeur de modèles. Si ce thème peut sembler peu sensible, au point de bénéficier d'une couverture médiatique limitée, il n'en demeure pas moins que les dommages consécutifs à des erreurs de calcul et à des incompréhensions dues à des erreurs ou à l'absence de communication auraient été considérables et auraient pu avoir des effets délétères en termes d'image. Que le responsable et l'équipe du projet soient donc chaleureusement remerciés ici pour le remarquable travail d'information et de communication accompli et finalement couronné de succès.*

2.10.7 Développement logiciel et prestations de services (services Web)

Les développements logiciels de swisstopo et les prestations de services associées se révélèrent particulièrement importants pour l'introduction du nouveau cadre de référence MN95, du simple fait que le changement de cadre MN03 → MN95 concernait tous les producteurs et utilisateurs de géodonnées en Suisse (cf. aussi § 2.1). Toutes les formules et tous les paramètres pour les conversions de coordonnées furent évidemment publiés en libre accès, afin qu'eux seuls soient utilisés dans les programmes d'autres producteurs ou dans les applications SIG. Le code source des modules logiciels servant aux transformations fut lui aussi diffusé gratuitement. A cette fin, swisstopo mit également en place, sur la plateforme Internet (<http://www.swisstopo/mn95>) déjà mentionnée « **De nouvelles coordonnées pour la Suisse** », un **service de téléchargement** pour le jeu de données de transformation officiel **CHENyx06** et pour une bibliothèque de programmes (DLL) avec l'**algorithme FINELTRA** officiel, à destination des développeurs de logiciels. Parmi les autres services Web proposés, on citera aussi la mise en ligne d'un service de transformation avec toutes les conversions pertinentes pour la Suisse et le « **Visualiseur de données FINELTRA** », service grâce auquel on accède à la précision de transformation empirique [cf. Kistler et Ray 2007].



Les services de transformation sur Internet sont gratuits. Les développements correspondants ont le caractère de prestations officielles, effectuées dans le cadre des tâches incombant au domaine Géodésie.

The screenshot shows the website interface for the transition from MN03 to MN95. At the top, there is a header with the Swiss Confederation logo and the name of the Federal Office of Topography (swisstopo). Below the header is a navigation menu with categories like 'Actualité', 'Thèmes', 'Produits', 'Applications interactives', 'Documentation', 'Services', and 'swisstopo'. A search bar is located on the right side. The main content area is titled 'Changement de cadre de référence MN03 - MN95' and includes a breadcrumb trail: 'Page d'accueil > Thèmes > Mensuration > Changement de cadre de référence'. There are two main columns of content. The left column has a section 'Informations générales' with a map showing the transition of the coordinate grid. Below it is a text block explaining the importance of the transition and a link to 'Plus d'informations'. The right column has a section 'CHENyx06 / Téléchargements' with a map showing the national triangle network. Below it is a text block about the availability of the CHENyx06 network and a link to 'Téléchargements'. At the bottom, there are two more sections: 'Visualiseur de données FINELTRA' with a map showing detailed information on the transition, and 'Services en ligne / REFRAME' with a screenshot of the online service interface and a text block explaining its capabilities. A sidebar on the right contains 'Recherche sur swisstopo', 'Informations complémentaires' with links to GNSS networks and online services, and 'Publications' with a link to the MN95 framework document.

Figure 2-49 : page d'accueil du portail Internet d'alors (www.swisstopo/mn95)

Aujourd'hui, les services de transformation et de calcul en ligne de swisstopo pour la conversion de coordonnées et de formats de données sont consultables ici : <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/cartes-donnees-en-ligne/calculations-services.html>. Le programme **REFRAME** permet d'effectuer des transformations de coordonnées en planimétrie et en altimétrie entre l'ancien cadre de référence MN03 (CH1903) et le nouveau cadre MN95 (CH1903+) avec des altitudes usuelles (NF02), des altitudes RAN95 (CHGeo200) ou des altitudes ellipsoïdales (Bessel) ainsi que des coordonnées tridimensionnelles globales X/Y/Z ou Lon/Lat/Alt (CHTRS93, ETRS89, WGS84) ou encore des coordonnées planes UTM (CHTRS93, ETRS89). Le programme **NAVREF** permet des transformations simplifiées entre coordonnées nationales et coordonnées GPS globales (WGS84). Avec le géoservice « Génération de KML », un fichier avec des coordonnées nationales suisses peut être converti en fichier KML. Avec les services Web **REST** (« REpresentational



State Transfer ») géodésiques, différentes transformations de coordonnées (WGS84-MN95-MN03) peuvent être intégrées dans ses propres produits logiciels ou services Web. Le logiciel permettant de calculer la déclinaison magnétique d'un point quelconque en Suisse provient de l'Université de Neuchâtel. Se présentant désormais comme un service Web, il sert à calculer la convergence des méridiens et la déclinaison magnétique (différence entre nord magnétique et géographique) n'importe où en Suisse, ainsi que d'autres données concernant le champ magnétique, telles que son inclinaison ou son intensité.



Administration fédérale > Département: DDPS > Page d'accueil Contact Médias Manifestations Conditions générales DE FR IT EN

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de topographie swisstopo

Q Critère de recherche

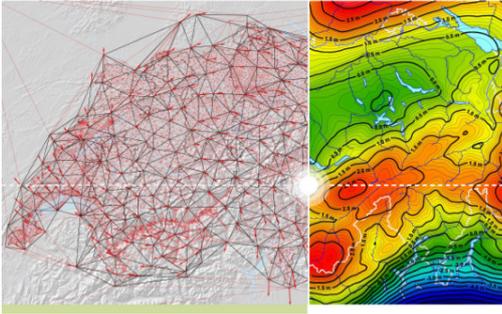
Thèmes A-Z

Cartes papier Géodonnées et applications Services Cartes et données en ligne Connaissances et faits swisstopo

Page d'accueil > Cartes et données en ligne > Services de calcul et de transformation

Services de calcul et de transformation

Les services de calcul vous aident à convertir des coordonnées et des formats de données, et à calculer la déclinaison magnétique d'un point quelconque en Suisse.



REFRAME
Génération de KML
NAVREF
Déclinaison magnétique
Services Web géodésiques REST (REFRAME Web API)

Contact Carte

Office fédéral de topographie swisstopo
Seftigenstrasse 264
Case postale
3084 Wabern

Tél. +41 58 469 01 11
E-mail

Support technique
E-mail
Imprimer contact

REFRAME
Avec swisstopo REFRAME, vous transformez des coordonnées en planimétrie et/ou en altimétrie. Ici, vous pouvez utiliser gratuitement le service REFRAME en ligne.

Génération de KML
Le géoservice swisstopo « génération de fichier KML » permet de convertir un fichier contenant des coordonnées nationales suisses ou des données GPS en un KML.

NAVREF
Ici, vous pouvez convertir les coordonnées nationales MN en coordonnées GPS globales WGS84. Saisissez les coordonnées et cliquez sur « calculer ».

Déclinaison magnétique
Calculez ici la déclinaison magnétique, les décalages de boussole et d'autres grandeurs du champ magnétique terrestre, comme l'angle d'inclinaison ou l'intensité du champ.

Services Web géodésiques REST (REFRAME Web API)
Les géoservices REST de swisstopo supportent la transformation entre les données ellipsoïdales WGS84 et les coordonnées suisses MN03 et MN95.

Documents & Publications Liens

- Formules approchées pour la transformation entre des coordonnées de projection suisses et WGS84
PDF, 4 page(s), 72 KB, français
- Formules et constantes pour le calcul de la projection cylindrique à axe oblique et pour la transformation entre des systèmes de référence
PDF, 20 page(s), 451 KB, français
- Geodetic REST Web services User Manual (Reframe API)
PDF, 20 page(s), 775 KB, anglais

Figure 2-50 : services de transformation et de calcul de swisstopo en 2020

Les documents relatifs aux points constituent également une part importante de la documentation des OMN95. De nouvelles fiches signalétiques ont été créées pour l'ensemble des points MN95 et des stations AGNES, comportant des informations plus complètes comme la compatibilité GNSS. Elles peuvent aussi bien être consultées via le service de données sur les points fixes FPDS, exploité en partenariat avec les cantons, que sur Internet via <https://map.geo.admin.ch> (sous : Données de base et planification →



Localisation). Un large éventail d'informations et de cartes en lien avec les nouvelles coordonnées MN95 a été rendu accessible par le domaine Géodésie, par l'intermédiaire de ce visualiseur de cartes du géoportail de la Confédération (cf. thème « Géodésie » → Changement de cadre de référence publié, par exemple changements de coordonnées, vecteurs de déformation, maillage triangulaire, précision de transformation, zones de tensions négligeables).

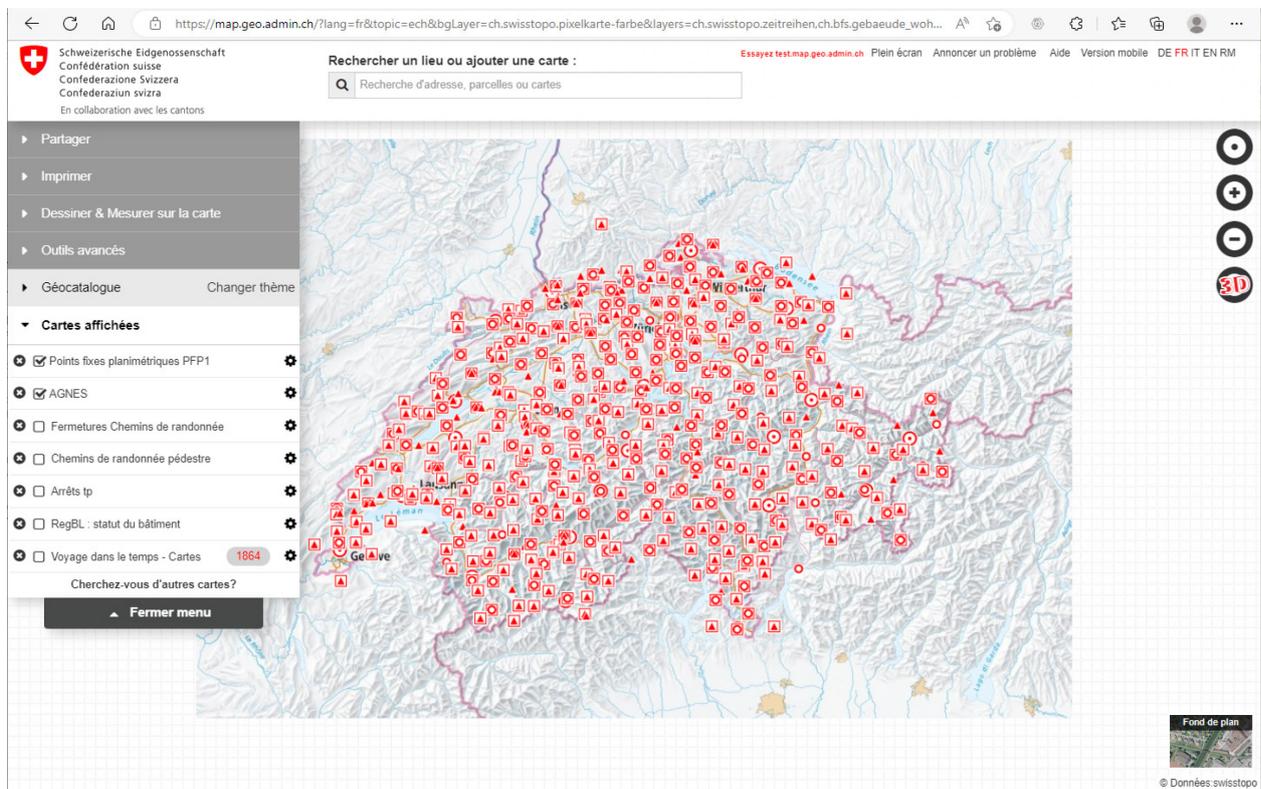


Figure 2-51 : vue d'ensemble des points AGNES et PF1, exemple de données / cartes disponibles pour le thème « Géodésie » sur le visualiseur de cartes du géoportail de la Confédération <https://map.geo.admin.ch>

Les publications relatives au thème « Documentation, logiciels, service de données sur les points fixes FPDS, transformation et services Web » sont rassemblées à l'annexe 2.3.10. En outre, les liens vers les produits logiciels et les services de transformation et de calcul en ligne développés par swisstopo et diffusés gratuitement sont indiqués à l'annexe 2.4.

2.10.8 Contrôle de la qualité

Une grande valeur fut accordée d'emblée à la qualité de la nouvelle mensuration nationale ainsi qu'à sa surveillance et à sa documentation, dans le droit fil de la tradition de l'Office fédéral de topographie swisstopo. Comme il est d'usage en géodésie et en mensuration, tous les travaux tels que les déterminations de coordonnées et d'altitudes de même que les autres mesures furent effectués avec une précision et une fiabilité très élevée. Cela concernait tout autant les mesures sur le terrain et leur documentation soignée que les traitements effectués au bureau. A titre d'exemple, le traitement complet et la compensation globale des 17 campagnes de mesures réalisées entre 1988 et 1994 en vue d'obtenir le jeu de coordonnées primaires de CHTRF95, resp. MN95 firent l'objet de calculs séparés avec deux versions différentes (4.0 et 4.2) du logiciel GPS bernois avant leur vérification minutieuse. Le traitement fut par ailleurs transmis à l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne (prof. Dr G. Beutler) afin que le déroulement des calculs ainsi que les modèles et les données satellites utilisés (par exemple les orbites et les horloges GPS) soient contrôlés et validés (en termes d'adéquation avec l'état des connaissances à l'époque) par le professeur Dr Markus Rothacher. Comme déjà indiqué, on put finalement, d'abord et avant tout grâce au GPS, améliorer la précision de la nouvelle mensuration nationale MN95 par rapport à MN03 d'un facteur 100.



La sauvegarde et l'archivage des données originales (des mesures GPS au format RINEX par exemple) furent entrepris dans le respect des principes et des directives de swisstopo en la matière. Tous les documents furent versés aux archives de la Géodésie pour être enregistrés en priorité au sein des « Bases géodésiques » (GG) et des « Points fixes géodésiques » (GF).

La gestion de la qualité de la Géodésie (QMS-Geo) fut mise en place entre 2000 et 2002 avec le concours de M. Georges Wägli (Trend Wirtschaftsberatung AG) et le domaine Géodésie fut certifié ISO9001:2000 en mai 2002 (cf. *swisstopo Report 02-40*). La gestion de la qualité et sa mise en œuvre dans le domaine furent vérifiées à maintes reprises durant les années suivantes dans le cadre d'audits internes et externes et toujours jugées bonnes.

L'introduction du statut GMEB pour swisstopo (gestion par mandats de prestations et enveloppes budgétaires) en 1998, puis du nouveau modèle de gestion de la Confédération (NMG) en 2017, entraîna l'inclusion d'objectifs de performance dans les conventions, resp. les accords de prestations conclus avec le Conseil fédéral, applicables à la qualité de la mensuration nationale (MN). Les indicateurs, les standards et les grandeurs mesurées de même que les modalités de leur mesure furent définis en détail (*swisstopo Report 03-06*) pour établir et garantir la qualité des produits de la MN. Les formulations des standards de qualité et les modalités de leur mesure furent transmises pour évaluation au professeur Dr A. Carosio de l'IGP/ETHZ, afin de conserver un minimum d'indépendance, en lui demandant en plus de procéder à un examen indépendant du relevé de référence.

Le domaine Géodésie élaborait un concept de mise à jour de la mensuration nationale (*swisstopo Report 09-14*) après la mise en vigueur de la loi sur la géoinformation (LGéo, RS 510.62). Les standards de qualité de la mensuration nationale furent également revus en étant harmonisés avec les bases et les prescriptions de ce nouveau concept de mise à jour tout en s'appuyant sur les expériences acquises lors des précédentes saisies de données. Ils sont consultables dans *swisstopo Report 10-11*. Si les standards de qualité étaient initialement contrôlés tous les quatre ans, en phase avec la périodicité des mandats de prestation, c'est un relevé annuel des 28 standards de qualité qui est effectué depuis 2010. Les résultats de ces contrôles de qualité annuels sont documentés dans des rapports et rendus accessibles au public (cf. annexe 2.3.11).

Le modèle EXCELLENCE de l'EFQM fut introduit en 2010 au sein de swisstopo et par suite aussi au sein du domaine Géodésie. Pour atteindre les objectifs de gestion à moyen et à long terme conformément à la stratégie sectorielle adoptée par swisstopo, la direction du domaine Géodésie reformula la stratégie 2012-2015 dans la structure du modèle de l'EFQM. Un outil Web permit aussi de définir et d'introduire la gestion des compétences pour les membres de la direction du domaine. A partir de 2012, tous les membres du personnel de la Géodésie furent concernés.



2.10.9 Etat actuel et développements futurs

Tableau 2-11 : documentation : état et développements futurs possibles

Etat en 2020	Développements futurs possibles
<ul style="list-style-type: none">• Les données et les documents des OMN95 sont documentés et publiés (séries de publications de swisstopo et de la CGS) ; le présent rapport clôt la série de documentation des OMN95.• Les données sur les points fixes (PFP1 et 2) de la Confédération et des cantons sont gérées de manière centralisée (banque de données FPDS).• Les données sur les points fixes sont accessibles à tout un chacun via Internet (service Web FPDS).• Le logiciel géodésique (GeoSuite, REFRAME, etc.) et les services Web géodésiques (services de calcul et de transformation) sont disponibles gratuitement via Internet.• Le contrôle de la qualité et l'entretien des OMN95 sont garantis.	<ul style="list-style-type: none">• L'extension du service Web géodésique permet la transformation de données de SIG dans les cadres de référence des pays voisins (en planimétrie et en altimétrie).• Les LBS (Location Based Services) sont une option moderne pour les données sur les points fixes, disponible gratuitement partout en Suisse (cf. aussi § 2.3).• Tous les documents (actuels et historiques) concernant la mensuration nationale, resp. les œuvres de la mensuration nationale de la Suisse sont disponibles en ligne.



3. Appréciation et remerciements

Les œuvres de la mensuration nationale OMN95 ont complètement refaçonné la mensuration nationale géodésique de la Suisse et vont largement au-delà du simple remplacement de quelques méthodes de mesure et de divers réseaux de points fixes existants.

La définition des cadres de référence, qui est la mission première de la mensuration nationale géodésique, fut envisagée d'emblée dans une optique globale en y associant les « trois piliers de la géodésie » (cf. « *the three pillars of geodesy* » for the *Global Geodetic Observing System GGOS of the IAG*) que sont la géocinématique, le champ de pesanteur terrestre et la rotation de la Terre, tout en visant à combiner du mieux possible les méthodes géométriques (GNSS / SLR) et les méthodes liées au champ de pesanteur (comme le nivellement) afin qu'elles soient pleinement compatibles entre elles.

Les OMN95 ont également innové en insérant de manière cohérente la mensuration nationale géodésique dans l'environnement international. Et cela, par l'intégration de données de mesure globales et continentales (par exemple des orbites de satellites, des stations de référence) pour les techniques de mesure telles que le SLR (géostation de Zimmerwald) et le GNSS (IGS, EUREF), mais aussi au travers de campagnes de mesures débordant le cadre national et par l'utilisation de points de rattachement à l'étranger pour le nivellement fédéral et les mesures pour le réseau gravimétrique national. En outre, swisstopo intensifia dès lors sa participation au sein des instances, institutions et services géodésiques internationaux en coordination avec d'autres partenaires de la Commission géodésique suisse CGS.

L'optique globale adoptée pour les OMN95 ne se cantonna toutefois pas aux seuls aspects techniques. Le renouvellement des bases légales faisait également partie intégrante des OMN95. Il incluait notamment la définition des prescriptions légales et des délais de transition pour l'introduction du nouveau cadre de référence MN95 qui nécessita, à son tour, le déploiement d'efforts importants en matière d'information et de communication, centrés autour d'un slogan simple : « de nouvelles coordonnées pour la Suisse ».

L'effet produit par les OMN95 (le bénéfice résultant) dut être optimisé pour différents groupes cible. Au cœur de l'attention se trouvaient bien évidemment les « praticiens de la mensuration » répartis en quatre sous-groupes : mensuration nationale, mensuration officielle, mensuration d'ingénieur, mensuration de chantier. Il fallait cependant élargir le spectre et intégrer un « public » plus vaste, celui des utilisateurs de cartes analogiques et numériques, d'équipements GNSS ou d'applications pour smartphones. Il convenait enfin de préserver les intérêts des « sciences » : géodésie, géologie, sismologie, sciences de la nature et de l'environnement au sens large, etc.

C'est donc avec une grande satisfaction que l'on prit acte de l'introduction sans difficulté des nouvelles « coordonnées MN95 » et des autres composantes modernes de la nouvelle mensuration nationale (AGNES, swipos, etc.) qui furent du reste bien acceptées par tous les utilisateurs. On doit tout autant ce résultat réjouissant à la bonne préparation et à la mise à disposition toujours en temps voulu des bases et des conditions-cadre requises (les logiciels par exemple) par swisstopo qu'à la bonne collaboration entretenue avec les offices cantonaux des mensurations et d'autres partenaires.

Lors de la conception, de la mise en œuvre et de l'introduction, des réflexions et des critères économiques durent être pris en compte à deux niveaux différents, à savoir l'effet produit /le bénéfice résultant pour les groupes cible (*Outcome*) et les effets au-delà de ces différents groupes, à l'échelle de la société tout entière (*Impact*). A titre d'exemple, on indiquera ici l'importance d'AGNES/swipos pour swisstopo et les praticiens de la mensuration dans le cadre des applications suivantes :

- Au sein de swisstopo, les données d'AGNES et swipos sont aussi utilisées par le domaine Topographie pour le positionnement précis des avions photographes, pour la mesure de points de calage servant à géoréférencer les photos aériennes et pour la mise à jour des cartes nationales. A cette fin, un accord interne (SLA) fut conclu en 2006 entre les domaines Topographie et Géodésie (aujourd'hui Mensuration) concernant la livraison de données AGNES pour le post-traitement et les applications en temps réel. Il y est explicitement indiqué que les données doivent être tenues à disposition dans la durée, en conservant les niveaux de densité et de disponibilité actuels.
- Le bénéfice principal qu'offrent AGNES et swipos réside dans la mise à disposition homogène et avec une précision centimétrique du cadre de référence géodésique officiel en Suisse. Cela permet à tous



les utilisateurs (offices des mensurations cantonales et communales/municipales, bureaux de géomètres et de mensuration privés, entreprises de construction et autres acteurs intéressés par des géodonnées précises) de mesurer des points rapidement et efficacement, sans avoir à exploiter leur propre station de référence ou à perdre du temps en transformations ou en ajustages locaux. AGNES étant par ailleurs intégré dans des réseaux permanents européens et globaux, cette précision élevée est également disponible au-delà des frontières, ce qui revêtira par exemple de l'importance pour de futures applications de masse, dans le domaine des véhicules autonomes.

- Aujourd'hui, le service de positionnement suisse swipos® est solidement établi dans les secteurs des mensurations cadastrales et des mensurations de chantier (guidage de machine inclus), à tel point qu'il n'est plus envisageable de s'en passer. Ce service se fonde sur des formats de données standardisés et est ainsi accessible à un large cercle d'utilisateurs. Comptant 3000 utilisateurs en 2019, il est déjà fortement sollicité, mais cela ne l'empêche pas de s'ouvrir à de nouveaux segments de marché, comme les damesuses et l'agriculture.

Les conséquences suivantes peuvent être citées pour le grand public, en guise d'exemples :

- Le nouveau choix de système dual ou les nouvelles composantes telles que les altitudes de RAN95 échappent largement à la perception des « profanes ». Même les nouvelles coordonnées ne revêtent pas de réelle signification pour la plupart de nos concitoyens, ne soulevant probablement qu'une pointe d'agacement chez eux, due aux sept chiffres dont elles se composent désormais. La nouvelle mensuration nationale et les nouvelles coordonnées ont pourtant dû être introduites et mises à la disposition de tous de telle sorte que tout risque de confusion soit écarté (par exemple lors des interventions des « organisations à feux bleus »). On peut constater avec satisfaction que swisstopo a pu atteindre cet objectif en collaborant efficacement et étroitement avec les cantons.
- En assurant le traitement par le PNAC du réseau GNSS permanent de la Nagra (NaGNet), swisstopo apporte une nouvelle contribution importante, complétant celle du laboratoire de roches du Mont-Terri, au choix du site et à la sécurité de la future exploitation du dépôt en couches géologiques profondes de déchets radioactifs en Suisse.
- Les données AGNES sont utilisées par plusieurs entreprises privées pour surveiller des versants instables ou des glaciers rocheux dans des zones gelées en permanence. Les déplacements peuvent ici être déterminés au centimètre près, grâce aux données de référence de swisstopo. Ces mesures constituent une composante importante des systèmes d'alerte précoce pour les dangers naturels.
- Combinés à des données géologiques et géophysiques, les longues séries temporelles des coordonnées des stations AGNES et les modèles de déformations et de vitesses qui en découlent permettent de mieux évaluer les menaces sismiques pesant sur certaines régions. De telles données et de tels avis revêtent une grande importance pour les assureurs de bâtiments et les réassureurs.
- Les données AGNES sont également prises en compte dans des modèles météorologiques numériques et contribuent ainsi à améliorer les prévisions. Les modifications à moyen voire à long terme du taux d'humidité dans l'atmosphère permettent en outre d'en déduire de précieuses informations sur le changement climatique.



Remerciements

Au-delà des facteurs clés du succès des OMN95 déjà mentionnés aux chapitres précédents comme l'identification précoce de développements et de tendances technologiques ou le fait d'avoir su nouer des partenariats fructueux, c'est surtout le travail d'équipe au sein de l'ancien domaine Géodésie (aujourd'hui « Géodésie et Direction fédéral des mensurations cadastrales ») qui a pesé d'un poids prépondérant dans la réussite du projet. La parfaite coordination entre les « têtes pensantes » et les « exécutants », donc entre les stratégies prévoyants et les collaborateurs chargés de la mise en œuvre sur le terrain, a d'emblée marqué cette collaboration de son empreinte.

Les auteurs et anciens membres de la direction du domaine Géodésie souhaiteraient remercier chaleureusement ici tous les membres du personnel de l'ancien domaine Géodésie de swisstopo pour leur indéfectible engagement au service de la définition des œuvres de la mensuration nationale OMN95 durant les trois dernières décennies. Nous souhaiterions citer nommément nos prédécesseurs, anciens supérieurs et collègues E. Gubler (Dr), H. Chablais, B. Vogel et Th. Signer. Par leur clairvoyance et les actions menées, ils apportèrent une contribution essentielle au concept, aux bases et à la réalisation des OMN95 dès les années 1980 et 1990. Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à l'ensemble de nos autres collègues de swisstopo, des autres offices fédéraux et des offices cantonaux des mensurations.

Le domaine Géodésie a aussi pu bénéficier des conseils avisés des hautes écoles, notamment de l'AIUB et de l'IGP de l'ETHZ, avec qui il a pu entretenir une collaboration toujours constructive dans le cadre de nombreux projets. En outre, les suggestions et les conseils des membres de la Commission géodésique suisse CGS se sont constamment révélés précieux. Que tous soient chaleureusement remerciés ici pour leur soutien compétent et la bienveillance dont ils ont toujours fait preuve à notre égard.

Wabern, en octobre 2022

Les auteurs: Adrian Wiget, Urs Marti, Andreas Schlatter, Dieter Schneider, Urs Wild



Annexe



1. Glossaire

Abréviations et définitions en français

AGNES	Réseau GPS/GNSS automatique suisse
AIG	Association internationale de géodésie
AIUB	Institut d'astronomie de l'Université de Berne
CadastreSuisse	Conférence des services cantonaux du cadastre Fait désormais partie de la Conférence des services cantonaux de la géoinformation et du cadastre CGC.
Cadre de référence	Les cadres géodésiques de référence concrétisent les systèmes qui les sous-tendent et les rendent ainsi utilisables sur le terrain, par exemple pour les besoins pratiques de la mensuration, en tant que base pour des systèmes d'information géographique (SIG) et pour la cartographie. Les réseaux de points fixes géodésiques et les stations permanentes constituent de tels cadres de référence, leurs coordonnées respectives étant définies dans le système de référence.
CCR	Changement de cadre de référence (de MN03 à MN95)
CFF	Chemins de fer fédéraux suisses
CGC	Conférence des services cantonaux de la géoinformation et du cadastre
CGS	Commission géodésique suisse
CH1903	Ancien système de référence local de la Suisse de 1903 (MN03) L'ancien système de référence CH1903, défini et introduit en 1903, se fonde sur l'ellipsoïde de Bessel 1841, est positionné (origine et orientation) sur l'ancien point d'origine / fondamental (ancien observatoire astronomique de Berne) et la projection cylindrique conforme à axe oblique (« Swiss Grid ») lui est associée. CH1903 définit également l'ancien système des altitudes usuelles utilisant le « Repère Pierre du Niton » dans la rade de Genève comme horizon de référence avec la valeur de 373,6 m.
CH1903+	Nouveau système de référence local officiel de la Suisse de 1995 (MN95) Le système de référence de la mensuration nationale suisse MN95 a été défini en 1995 sur la base de mesures par satellites effectuées sur plus de 200 points de référence MN95. CH1903+ utilise les mêmes dimensions d'ellipsoïde (Bessel 1841) que CH1903. Le point fondamental du système de référence CH1903+ est la « géostation de Zimmerwald ». Le positionnement du système est directement déduit de CHTRS95 par trois translations. La projection cartographique (« Swiss Grid ») est identique à celle de CH1903. L'origine des altitudes est également le point fondamental « géostation de Zimmerwald » dont la valeur orthométrique $H_0 = 897,9063$ a été choisie de telle façon que l'altitude orthométrique du « Repère Pierre du Niton » dans la rade de Genève retrouve sa valeur de 373,6 m.
CH-CGN	Réseau géodésique combiné, cotes du géoïde déterminées à partir d'altitudes ellipsoïdales (GNSS) et d'altitudes orthométriques
CHENyx06	Jeu de données du maillage triangulaire national
CHGeo2004	Modèle du géoïde de la Suisse de 2004
CHKM95	Modèle cinématique de la Suisse de 1995
CHTRFyy	Swiss Terrestrial Reference Frame (réalisation du système de référence CHTRS95 en l'an yy) Cadre de référence tridimensionnel basé sur le réseau GNSS national couvrant l'intégralité du territoire suisse (par environ 200 points principaux et intercalaires) et sur le réseau GNSS permanent AGNES (environ 40 stations automatiques). Le cadre de référence de haute précision (de niveau centimétrique) satisfait à toutes les exigences relatives à la précision et à la fiabilité absolues des jeux de coordonnées. La transformation exacte entre ETRFyyyy et CHTRFyyyy est garantie. CHTRFyyyy est la réalisation du système CHTRS95 à différentes dates. La reprise périodique (nouvelle mesure et nouveau calcul) des réseaux géodésiques entraîne la détermination de nouveaux jeux de



	coordonnées (exemples : CHTRF95, 98, 2004, 2010, 2016 et 2022) puis leur mise à disposition pour des besoins particuliers (établissement du réseau de base et projets d'infrastructure de grande ampleur).
CHTRS95	Swiss Terrestrial Reference System 1995 (système de référence géodésique global de la Suisse, 1995) Le système de référence global de la mensuration nationale suisse MN95 est identique au système de référence européen ETRS89 à la date du 1 ^{er} janvier 1993. Tout comme son homologue européen, CHTRS95 se fonde sur l'ellipsoïde de référence GRS80 et la projection UTM (Universal Transverse Mercator).
COSIG	Coordination, services et informations géographiques (aujourd'hui le domaine 'Coordination, Services et Informations Géographiques' de swisstopo)
CSCC	Conférence des services cantonaux du cadastre (devenue ensuite CadastreSuisse, elle fait aujourd'hui partie de la CGC)
D+M	Direction fédérale des mensurations cadastrales
DDPS	Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989 (système de référence terrestre européen de 1989)
EUREF	European Reference Frame (sous-commission de l'AIG chargée du cadre de référence européen)
FINELTRA	Transformation linéaire par la méthode des éléments finis (logiciel)
FPDS	Service de données sur les points fixes (swisstopo)
GG95	Bases géodésiques de la Suisse de 1995
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System (Etats-Unis)
IGP	Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETHZ
INDG	Infrastructure nationale de données géographiques
InRSO (InSAR)	Interférométrie par radar à synthèse d'ouverture
ITRS	International Terrestrial Reference System (système de référence terrestre international)
LGéo	Loi fédérale sur la géoinformation
MN	Mensuration nationale
MN03	Mensuration 1903 resp. cadre de référence de la MN 1903 Cadre de référence (planimétrie prioritaire, altimétrie secondaire) basé sur les points fixes planimétriques (PFP 1) de la triangulation du 1 ^{er} au 3 ^{ème} ordre établie en 1903 puis rénovée et mise à jour depuis lors. Les jeux de coordonnées contiennent également des altitudes usuelles, déterminées à partir du cadre de référence NF02. MN03 était le cadre de référence officiel de la Suisse jusqu'en 2016. Selon l'article 53 alinéa 2 OGéo, MN03 pouvait être utilisé jusqu'au 31 décembre 2020 pour les géodonnées ne constituant pas des données de référence officielles. Le cadre de référence MN03 disposait d'une bonne précision locale, de niveau centimétrique. En revanche, il se prêtait assez mal au positionnement absolu à l'échelle nationale en raison des déformations existantes pouvant atteindre 1,6 m. La transformation de coordonnées directe MN95 <-> MN03 est garantie par le jeu de données « CHENyx06 » pour toute la Suisse avec une précision moyenne de +/- 3 cm.
MN95	Mensuration nationale 1995 resp. cadre de référence de la MN95 Cadre de référence tridimensionnel statique se fondant sur les mêmes points de réseau que CHTRFyyyy. Depuis 2017, MN95 est le cadre de référence officiel pour la mensuration en Suisse.
MO	Mensuration officielle
MO93	Réforme de la mensuration officielle de 1993



Nagra	Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs
NAVSTAR	Navigation System using Timing and Ranging (Etats-Unis) – NAVSTAR-GPS
NF02	Réseau altimétrique national de 1902 (nivellement fédéral) Cadre de référence altimétrique usuel basé sur le « Nivellement de précision » de la Commission géodésique suisse (1864-1887) ainsi que sur les nouvelles mesures et mises à jour du nivellement fédéral (de 1902 à aujourd'hui) sans prise en compte de la gravimétrie. Le cadre de référence altimétrique possède une bonne précision locale mais présente des déformations à grande échelle de l'ordre du décimètre. Une transformation altimétrique directe RAN95 <-> NF02 n'est possible que de manière approchée. NF02 reste toutefois le cadre de référence altimétrique officiel de la Suisse. La transformation de NF02 vers RAN95 est garantie par swisstopo.
NLFA	Nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes (NEAT en allemand)
Œuvres de la mensuration nationale de 1995 (OMN95)	Ensemble des composantes de la nouvelle mensuration nationale de 1995, à savoir les bases géodésiques, la station fondamentale de Zimmerwald, le réseau de référence GNSS et le réseau permanent (AGNES), le réseau gravimétrique national (RGN2004), le réseau altimétrique national (RAN95), le réseau géodésique combiné (CH-CGN), le modèle du géoïde (CHGeo-2004) et les modèles cinématiques (CHKM95).
OGéo	Ordonnance sur la géoinformation
OMN	Ordonnance sur la mensuration nationale
OMN95	Œuvres de la mensuration nationale de 1995
PNAC	Permanent Network Analysis Center
PFP1, PFP2	Point fixe planimétrique de catégorie 1 (mensuration nationale, swisstopo), 2 (mensuration officielle, cantons)
PPP	Positionnement de point précis
RAN95	Réseau altimétrique national de 1995 Cadre de référence altimétrique rigoureux (au sens de la théorie du potentiel) de la mensuration nationale MN95 s'appuyant sur les données du nivellement fédéral (de 1902 à aujourd'hui), avec des altitudes orthométriques issues du modèle du géoïde CHGeo2004. L'altitude orthométrique du point fondamental de Zimmerwald sert d'horizon de référence. Le cadre de référence altimétrique officiel de la Suisse reste NF02. La transformation altimétrique de NF02 vers RAN95 et vers le cadre de référence altimétrique européen EVRF est garantie par swisstopo.
REFRAME	Logiciel dédié aux transformations géodésiques, notamment au changement de cadre de référence
Réseau national MN95	Réseau de référence GNSS national (appelé « réseau national GPS MN95 » durant les premières années).
REST	REpresentational State Transfer; les services Web REST permettent d'intégrer des transformations de coordonnées dans ses propres produits logiciels ou dans des services Web.
RGN2004	Réseau gravimétrique national de 2004
SAPA	Safe and precise Augmentation
SAPCORDA	Coentreprise (joint-venture) pour l'autonavigation
SHGS	Société pour l'histoire de la géodésie en Suisse (en allemand, GGGS : Gesellschaft für die Geschichte der Geodäsie in der Schweiz)
SIG	Système d'information géographique
swipos	Swiss Positioning Service de swisstopo



2. Publications / références

2.1 Publications spécialisées

Les membres du personnel de swisstopo et d'autres protagonistes du développement de la mensuration nationale ont rédigé de nombreuses publications spécialisées traitant de son histoire, de la définition de la mensuration nationale MN95 ou des œuvres de la mensuration nationale OMN95. Ces contributions ont notamment été publiées dans la revue « *Mensuration, photogrammétrie, génie rural/Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* » resp. « *Géomatique Suisse/Geomatik Schweiz* ». Quelques articles de synthèse importants sont cités dans la suite, ainsi que différents articles spécialisés traitant de composantes et de conséquences particulières des OMN95. Dans leurs bibliographies ou listes de références, ces articles renvoient à de nombreuses publications consacrées à des thèmes liés de près ou de loin à la mensuration nationale. Elles ne sont pas rappelées ici.

2.1.1 Publications concernant l'histoire de la mensuration nationale de la Suisse

Zölly H. (1948): Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Eidg. Landestopographie 1948, 160 Seiten.

Matthias H. (1977): Landestriangulation der Schweiz: Rückblick, Umschau und Vorschläge für die zukünftige Entwicklung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 7, 1977, S. 221–229.

Chablais H., E. Gubler, D. Schneider, A. Wiget (1988): Die geodätische Landesvermessung in der Schweiz, heute und morgen. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 4, 1988, S. 154–163.

Chablais H. (1992): Le réseau actuel de triangulation et le nouveau réseau national. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 12, 1992, S. 726–728.

Schneider D., B. Vogel, A. Wiget, E. Brockmann, A. Schlatter, U. Marti, U. Wild (2003): Landesvermessung einst und heute. *Geomatik Schweiz* Heft 12, 2003, S. 669–674.

Schneider D., E. Gubler, A. Wiget (2015): Meilensteine der Geschichte und Entwicklung der Schweizerischen Landesvermessung. *Geomatik Schweiz* Heft 11, 2015, S. 462–483.

Wiget A., D. Schneider, E. Gubler, U. Wild, M. Scherrer, A. Schlatter (2020): 25 Jahre neue Landesvermessung LV95. *Geomatik Schweiz* Heft 11, 2020, S. 316–338.

2.1.2 Articles de synthèse sur la mensuration nationale MN95 / les œuvres de la mensuration nationale OMN95, articles spécialisés traitant de leurs composantes et conséquences

Wiget A., B. Vogel, D. Schneider (1994): Die neue Landesvermessung LV95 der Schweiz. *Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation SPN* Heft 1, März 1994, S. 13–20.

Wiget A., B. Vogel, D. Schneider (1995): The new national reference system and frame. In: Report on the Geodetic Activities of Switzerland in the years 1991 to 1995. Presented to the XXI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics in Boulder, Colorado, Juli 1995, pp. 5–6.

Gubler E., D. Gutknecht, U. Marti, D. Schneider, Th. Signer, B. Vogel, A. Wiget (1996): Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 2, 1996, S. 47–65.

Wild U., E. Brockmann, R. Hug, Chr. Just, P. Kummer, Th. Signer, A. Wiget (2000): Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Ein multifunktionales Referenznetz für Navigation und Vermessung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 6, 2000, S. 389–92.

Wild U., S. Grünig, R. Hug, P. Kummer, I. Pfammatter, U. Bruderer (2001): swipos-GIS/GEO: real-time Positionierung in der ganzen Schweiz mit cm-Genauigkeit. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 3, 2001, S. 165–168.



- Signer Th. (2002): Landesvermessung LV95: Übersicht und Stand des Projektes. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 1, 2002, S. 4–7.
- Marti U., A. Schlatter (2002) Höhenreferenzsysteme und -rahmen. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 1, 2002, S. 8–12.
- Schlatter A., U. Marti (2002): Neues Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 1, 2002, S. 13–17.
- Wicki F. (2002): Landesvermessung LV95: Konsequenzen für die Amtliche Vermessung und weitere raumbezogene Daten. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 1, 2002, S. 19–23.
- Wicki F., Th. Signer, W. Messmer, R. Ammann, R. Durussel, H. Thalmann (2002): Das Höhensystem für die amtliche Vermessung und weitere raumbezogene Daten. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 8, 2002, S. 528–529.
- Grünig S., U. Wild (2005): swipos über Internet: Neue Entwicklungen bei der Echtzeit-Positionierung. *Geomatik Schweiz* Heft 3, 2005, S. 121–124.
- Brockmann E., D. Ineichen, A. Wiget (2005): Neumessung und Auswertung des GPS-Landesnetzes der Schweiz LV95. *Geomatik Schweiz* Heft 8, 2005, S. 440–444.
- Marti U., A. Schlatter (2005): Festlegung des Höhenbezugsrahmens LHN95 und Berechnung des Geoidmodells CHGeo2004. *Geomatik Schweiz* Heft 8, 2005, S. 445–449.
- Schlatter A., U. Marti (2005): Höhentransformation zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02. *Geomatik Schweiz* Heft 8, 2005, S. 450–453.
- Riesen H.-U., B. Schweizer, A. Schlatter, A. Wiget (2005): Tunnelvermessung des BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnels. *Geomatik Schweiz* Heft 11, 2005, S. 608–612.
- Wild U. (2007): Neue Entwicklungen bei swipos. *Geomatik Schweiz* Heft 5, 2007, S. 256.
- Kistler M., J. Ray (2007): Neue Koordinaten für die Schweiz: Fertigstellung der nationalen Dreiecksvermessung, neue Transformations-Software REFRAME und Eröffnung des Internet-Portals «Bezugsrahmenwechsel». *Geomatik Schweiz* Heft 9, 2007, S. 432–437.
- Kistler M., J. Ray (2007): Nouvelles coordonnées pour la Suisse: Achèvement du maillage national des triangles, nouveau logiciel de transformation REFRAME et inauguration du portail Internet sur le changement du cadre de référence. *Géomatique Suisse* Heft 9, 2007, S. 439–445.
- Scherrer M. (2007): Neue Koordinaten für die Schweiz: Konsequenzen des neuen Lagebezugsrahmens LV95. *Geomatik Schweiz* Heft 9, 2007, S. 447–448.
- Kistler M., U. Wild (2008): Neue Koordinaten für die Schweiz: Bezugsrahmenwechsel LV03 / LV95. *Geomatik Schweiz* Heft 5, 2008, S. 274.
- Wicki F. (2008): Neue Geoinformationsgesetzgebung Konsequenzen für die Praxis. *Geomatik Schweiz* Heft 6, 2008, S. 308–313.
- Furrer M., B. Sievers (2009): Qualitätsindikatoren für den Bezugsrahmenwechsel LV03–LV95. *Geomatik Schweiz* Heft 1, 2009, S. 20–24.
- Ray J., U. Marti, M. Kistler (2009): Methoden und Werkzeuge für die Koordinatentransformation zwischen globalen und lokalen Bezugsrahmen und den Datenaustausch mit den Nachbarländern. *Geomatik Schweiz* Heft 11, 2009, S. 536–539.
- Niggeler L., F. Mumenthaler (2009): Genève se prépare à changer toutes les coordonnées de ses données géographiques. *Géomatique Suisse* Heft 12, 2009, S. 592–595.
- Wiget A., U. Marti, A. Schlatter (2010): Beiträge der Landesvermessung zum AlpTransit Gotthard-Basistunnel. *Geomatik Schweiz* Heft 12, 2010, S. 575–581.
- Wiget A., E. Brockmann, M. Kistler, U. Marti, A. Schlatter, B. Vogel, U. Wild (2011): Das Landesvermessungswerk 1995 (LVW95). *Geomatik Schweiz* Heft 6, 2011, S. 270–279.



Geodäsie swisstopo (2012): Neuigkeiten aus dem Bereich Geodäsie von swisstopo. *Geomatik Schweiz* Heft 5, 2012, S. 1–2.

Bösch R., A. Wiget (2013): Schweiz erhält neue Koordinaten. *Schweizer Soldat* Nr. 02, 2013.

Mautz R., J.-J. Stuby (2014): Umstellung auf den neuen Bezugsrahmen LV95 bei der SBB. *Geomatik Schweiz* Heft 3, 2014, S. 96–98.

Kistler M., U. Marti, J. Ray, Ch. Baumann, A. Wiget (2015): Towards a Distortion Free National Spatial Data Infrastructure in Switzerland: Approach, Developed Tools and Internet Services for the Change of the Reference Frame. Paper presented at the *FIG Working week 2015 «From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World»*. Sofia, Bulgaria, 17–21 May 2015. Paper No. 7679, 12 pages.

Wiget A. (2015): Neue Koordinaten für die Schweiz – auf den Zentimeter genau. *GeoPanorama – Fachzeitschrift der Plattform Geosciences der SCNAT* Heft 4, 2015, S. 32–35.

2.1.3 Articles consacrés au thème de la géodynamique

Kobold F., A.F. Habib (1966): Über einen Versuch, aus dem Vergleich der Landstriangulation erster Ordnung von 1911 bis 1916 mit der Gradmessungstriangulation von 1860 bis 1879 Krustenbewegungen in der Schweiz nachzuweisen. *Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie*, Band 64, Heft Nr. 7, Juli 1966, S. 228–244.

SGK (1967): Nivellement et mouvements de l'écorce terrestre. Commission Géodésique Suisse et Service Topographique Fédéral: Rapport sur les travaux géodésiques exécutés de 1963 à 1966. Présenté à la quatorzième *Assemblée générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale* tenue en Suisse en septembre/octobre 1967, S. 5.

Wiget A., E. Gubler (1988): Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik der Alpen. *Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure* Vol./Band 54, Heft Nr. 127, Oktober 1988, S. 9–14.

Wiget A., E. Gubler, D. Schneider, G. Beutler, U. Wild (1990): High precision regional crustal motion network in Switzerland. Proceedings of the *Second International Symposium on Precise Positioning with the GPS*, Ottawa, Canada, September 1990, pp. 835–852.

Wiget A., E. Gubler, D. Schneider (1991): GPS-Präzisionsnetz zur Bestimmung von rezenten Krustenbewegungen in der Nordschweiz. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* Heft 8, 1991, S. 415–426.

Wiget A., M. Kistler, A. Geiger, E. Brockmann, A. Schlatter, D. Schneider (2003): Swiss4D: Modelling the Kinematics of the Deformation of the Swiss Geodetic Reference Network. Poster presented at the *IUGG XXIII General Assembly*, Sapporo, Japan, 30 June–11 July 2003.

Wegmüller U. (2004): INSAR analysis for land subsidence monitoring. Feasibility study for surface deformation mapping with repeat-pass spaceborne SAR interferometry and its comparison and validation with geodetic reference data. *swisstopo Report 04-57*, Wabern, August 2004.

Egli, R., A. Geiger, A. Schlatter, A. Wiget, E. Brockmann (2004): A Kinematic Model of Switzerland and its relation with Alpine Orogenesis and Recent Seismicity. *2nd Swiss Geoscience Meeting*, Lausanne, 20. November 2004.

Schlatter A., D. Schneider, A. Geiger and H.-G. Kahle (2005): Recent vertical movements from precise levelling in the vicinity of the city of Basel, Switzerland. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* Vol. 94/2005: pp. 507–514.

Wiget A., E. Brockmann, A. Schlatter, A. Geiger, O. Heller and R. Egli (2005): The project Swiss4D: A kinematic model of Switzerland derived from geodetic measurements; a status report. *3rd Swiss Geoscience Meeting*, Zürich, 19. November 2005.

Wiget A., A. Schlatter, E. Brockmann, D. Ineichen (2006): GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Messkampagne 2004 im Auftrag der Nagra; kombiniert mit der Messkampagne CHTRF2004 im GPS-Landesnetz LV95. *swisstopo Report 04-40*, Wabern, Januar 2006.



Wiget A., A. Schlatter, E. Brockmann, D. Ineichen, U. Marti, R. Egli (2007): GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Messkampagne im Auftrag der Nagra und Deformationsanalyse 1988–1995–2004. *swisstopo Report 07-03*, Wabern, April 2007. Ebenfalls publiziert als *Nagra Arbeitsbericht NAB 06-04*.

Egli R., A. Geiger, A. Wiget, H.-G. Kahle (2007): A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformation: first results in the Swiss Alps. *Geophysical Journal International* (2007) 168, p. 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03138.x>.

Wiget A., U. Marti, R. Egli, A. Geiger, O. Heller (2007): Modelling the Kinematics of the Deformation of the Swiss Geodetic Reference Network: Project Swiss4D. Poster presented at the *IUGG XXIV General Assembly*, Perugia, Italy, 2–13 July 2007.

Condamin S., J. Schwarzgruber, B. Sievers (2014): Lokale Hebungsraten in den Schweizer Alpen Wildhorndecke). *Geomatik Schweiz* Heft 1, 2014, S. 12–15.

Kistler, M., E. Brockmann, S. Condamin, A. Schlatter, A. Wiget (2016): Displacement Measurements with GNSS and Radar Interferometry above the New Alp Traverse Tunnel Gotthard. Paper presented at the *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Vienna, 30 March–1 April 2016.

Brockmann E. (2018): Stabilität des schweizerischen Koordinatenreferenzrahmens. *Cadastre, Fachzeitschrift für das schweizerische Katasterwesen* Nr. 28, Dezember 2018, S. 11–13.

D'autres rapports consacrés au « Modèle cinématique CHKM95 » ou aux projets Swiss4D et Swiss4D-II sont indiqués au paragraphe A2.3.9. Les thèmes de la géodynamique et des mouvements cinématiques (recent crustal movements) en Suisse ont également été abordés dans les Swiss National Reports destinés à la sous-commission EUREF de l'AIG à l'occasion des symposiums annuels de l'EUREF. Les données, les analyses et les graphiques issus des campagnes de mesures et des traitements du domaine Géodésie ont servi de base à des rapports techniques et de travail publiés par la Nagra (NTB, NAB) (cf. par exemple NTB 99-08, NAB 06-04, NAB 07-27, NTB 08-04 et NAB 14-26).

2.1.4 Volumes de la CGS - série consacrée aux travaux géodésiques et géophysiques réalisés en Suisse (sélection de travaux en rapport avec la mensuration nationale)

Band 39 (1989): Diverse Autoren: 125 Jahre Schweizerische Geodätische Kommission:

- I. Bedeutung geodätischer Raumverfahren für Landesvermessung und Geodynamik (R. Sigl)
- II. Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik (H.-G. Kahle)
- III. L'état actuel de la recherche sur les mouvements de l'écorce terrestre en Suisse (F. Jeanrichard)
- IV. Die Satellitengeodäsie im Dienste der globalen Geodynamik (I. Bauersima)
- V. Die Veranstaltungen zum 125 Jahr-Jubiläum der Schweizerischen Geodätischen Kommission (W. Fischer).

Band 40 (1989): B. Bürki: Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea- Zone und deren geophysikalische Interpretation.

Band 41 (1990): U. Marti: ALGESTAR satellitengestützte Geoidbestimmung in der Schweiz.

Band 42 (1990): B. Wirth: Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz.

Band 43 (1990): A. Geiger: Gravimetrisches Geoid der Schweiz: Potentialtheoretische Untersuchungen zum Schwerefeld im Alpenraum.

Band 45 (1992): F. Jeanrichard (Hrsg.) Autoren: A. Geiger, H.-G. Kahle, R. Köchle, D. Meier, B. Neininger, D. Schneider, B. Wirth: Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985–1993, Teil I.



- Band 46 (1993): M. Rothacher: Orbits of Satellite Systems in Space Geodesy.
- Band 47 (1993): H.-G. Kahle (Hrsg.). Autoren: I. Bauersima, G. Beutler, B. Bürki, M. Cocard, A. Geiger, E. Gubler, W. Gurtner, H.-G. Kahle, U. Marti, B. Mattli, M. Rothacher, Th. Schildknecht, D. Schneider, A. Wiget, B. Wirth: NFP 20. Beitrag der Geodäsie zur geologischen Tiefenstruktur und Alpendynamik.
- Band 48 (1994): U. Wild: Ionosphere and Geodetic Satellite Systems: Permanent GPS Tracking Data for Modelling and Monitoring.
- Band 50 (1993): A. Elmiger, R. Köchle, A. Ryf, F. Chaperon: Geodätische Alpen traverse Gotthard.
- Band 51 (1993): F. Jeanrichard (Hrsg.) Autoren: G. Beutler, A. Geiger, M. Rothacher, S. Schaer, D. Schneider, A. Wiget: Dreidimensionales Testnetz Turtmann 1985–1993, Teil II (GPS-Netz).
- Band 54 (1997): F. Arnet und E. Klingelé: SG95: Das neue Schweregrundnetz der Schweiz.
- Band 55 (1997): E. Brockmann: Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS).
- Band 56 (1997): U. Marti: Geoid der Schweiz 1997.
- Band 72 (2007): A. Schlatter: Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95.
- Band 90 (2014): A. Villiger: Improvement of the Kinematic Model of Switzerland (Swiss4D-II).
- Band 95 (2016): S. Haerberling: Theoretical and Practical Aspects of High-Rate GNSS Geodetic Observations.
- Band 100 (2017): J. Clinton, A. Geiger, S. Haerberling, F. Haslinger, M. Rothacher, A. Wiget, U. Wild: The Future of National GNSS-Geomonitring Infrastructures in Switzerland. White Paper.

Les thèmes, l'infrastructure et les campagnes de mesures liés à la mensuration nationale, resp. aux œuvres de la mensuration nationale OMN95 ont aussi été traités et documentés dans les *Swiss National Reports on Geodetic Activities* destinés à l'Association internationale de géodésie AIG publiés tous les quatre ans. Ces documents sont présentés lors des *General Assemblies of the International Union of Geodesy and Geophysics* ; cf. [Swiss Geodetic Commission -- Publications \(ethz.ch\)](https://www.ethz.ch/en/research-and-education/infrastructure/geodesy/swiss-geodetic-commission-publications.html) > Swiss National Reports on Geodetic Activities.

2.2 Berichte aus der L+T / Rapports du S+T; swisstopo-Doku

LV95-Reihe «Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95» / Série MN95 «Définition de la nouvelle mensuration nationale de la Suisse MN95».

https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/publications/geodesy/swisstopo_doku_pdf

(Dernier accès le 11.11.2020)

Berichte aus der L+T / swisstopo-Doku		LV95-Reihe / Série MN95
N°	Titre (auteurs)	Edition
6	Teil 1: Vorgeschichte, Konzept, Projektorganisation und Planung Dieter Schneider, Erich Gubler und Adrian Wiget	1995
7	Teil 2: Geostation Zimmerwald: Satellite Laser Ranging (SLR) und GPS-Permanentbetrieb Urs Wild und Werner Gurtner	1995
8 d	Teil 3: Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen Dieter Schneider, Erich Gubler, Urs Marti und Werner Gurtner	1995/2001



Berichte aus der L+T / swisstopo-Doku		LV95-Reihe /Série MN95
N°	Titre (auteurs)	Edition
8 f	3e partie: Systèmes et cadres de référence terrestres Dieter Schneider, Erich Gubler, Urs Marti et Werner Gurtner, traduit par Hubert Dupraz	
9	Teil 4: Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung DIA93 Hubert Chablais, Thomas Signer und Bruno Vogel	1995
11	Teil 5: GPS-Landesnetz: Netzanlage, Materialisierung, Dokumentation und Nachführung Werner Santschi, Bruno Vogel, Thomas Signer und Daniel Gutknecht	1998
12	Teil 6: GPS-Landesnetz: GPS-Messungen 1988–94 Bruno Vogel, Daniel Gutknecht, Werner Santschi, Thomas Signer und Adrian Wiget	1997
13	Teil 7: GPS-Landesnetz: Auswertung der GPS-Messungen 1988–94; Bezugsrahmen CHTRF95 und LV95 Adrian Wiget, Thomas Singer, Bruno Vogel und Urs Wild	2003
14	Teil 8: Gesamtausgleichungen des GPS-Landesnetzes mit dem Diagnosenetz der Triangulation 1. und 2. Ordnung DIA95 Thomas Signer und Bruno Vogel	2000
15	Teil 9: GPS-Landesnetz: Verdichtung und Bezug zur bisherigen Landesvermessung. Transformation LV95 <-> LV03 Thomas Signer und Bruno Vogel	1999
16	Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998 CHGEO98 Urs Marti	2002
19	Teil 11: Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Stationsnetz und Positionierungsdienste Urs Wild, Simon Grünig und René Hug	2006
20	Teil 12: Landeshöhennetz LHN95: Konzept, Referenzsystem, kinematische Gesamtausgleichung und Bezug zum Landesnivellement LN02 Andreas Schlatter und Urs Marti	2007
21 d	Teil 13: Einführung des Bezugsrahmens LV95 in die Nationale Geodaten-Infrastruktur Bruno Vogel, Michael Burkard, Matthias Kistler, Urs Marti, Jérôme Ray, Markus Scherrer, Andreas Schlatter und Adrian Wiget	2009
21 f	13^{ème} partie : Introduction du cadre de référence MN95 dans l'infrastructure nationale de données géographiques Bruno Vogel, Michael Burkard, Matthias Kistler, Urs Marti, Jérôme Ray, Markus Scherrer, Andreas Schlatter et Adrian Wiget	2009
22	Teil 14: Das Geoid der Schweiz 2004 CHGeo2004 Urs Marti	2016
23	Teil 15: Das Landesschwerenetz LSN2004 Urs Marti	2022
24	Teil 16: Das Landesvermessungswerk 1995 LVW95: Schlussbericht Adrian Wiget, Urs Marti, Andreas Schlatter, Dieter Schneider und Urs Wild	2022



2.3 Rapports techniques (Technische Berichte, TB) et swisstopo Reports – renvois vers d'autres publications

Les rapports techniques (TB) et les swisstopo Reports figurant dans les tableaux suivants traitent directement ou indirectement de développements, de campagnes de mesures et d'études en lien avec la définition des œuvres de la mensuration nationale OMN95. Ces listes (certainement incomplètes) sont dressées par domaine thématique, resp. composante des OMN95. Les TB resp. Reports ne sont pas consultables sur Internet.

Des renvois vers d'autres publications pouvant revêtir de l'intérêt pour certains thèmes sont parfois indiqués dans les paragraphes suivants.

2.3.1 EUREF

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
93-01	EUREF-Stationen der Schweiz. Lokale Beziehungen zwischen RETRIG/DIA und EUREF/LV95	G. Danuser A. Wiget	1993
96-12	EUREF-CH '92 / 93: Swiss GPS Campaigns for the densification of EUREF and the establishment of the new national network « LV95 »	A. Wiget	01.1996
96-20	Einmessung LV95 (EUREF)-Neupunkt Generoso 1995: GPS-Messungen vom 25.–26.4.1995»	U. Wild W. Santschi	06.1996
01-13	EUREF2001: National Report of Switzerland: «Introduction and first applications of a Real-Time Precise Positioning Service using the Swiss Permanent Network AGNES» und «Swiss Activities in Combining GPS with Meteorology». Papers presented at the EUREF Symposium, Dubrovnik, Croatia, May 16–18, 2001	E. Brockmann S. Grünig R. Hug D. Schneider A. Wiget U. Wild	06.2001
08-17	Das Bezugssystem ETRS89 und nationale Koordinatensysteme der Schweiz: Kurzbericht mit besonderer Berücksichtigung der Lage- und Höhendifferenzen zwischen Deutschland und der Schweiz	A. Wiget	05.2008

2.3.2 Station fondamentale de Zimmerwald

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
03-38	Fundamentalstation Zimmerwald: Lokale Einmessung 2003. Messungen vom 6./7. Okt. 2003 und Multiepochen-Ausgleichung 1987–2003	W. Santschi S. Hohl E. Brockmann	03.2005
08-23	Fundamentalstation Zimmerwald: Lokale Einmessung 2008. Messungen vom 15. –17. Juli 2008 / 2. September 2008 und Multiepochen-Ausgleichung 1987–2008	D. Ineichen E. Brockmann	04.2009
10-14	Geostation Zimmerwald: Ablotungen 2010. Messungen vom 21. Oktober und 4. November 2010	D. Ineichen E. Brockmann	04.2011
11-13	Geostation Zimmerwald: Ablotungen 2011. Messungen vom 22. August zur Bestimmung der kurzperiodischen Mastdeformationen	D. Ineichen E. Brockmann	10.2011
14-21	Geostation Zimmerwald: Einmessung 2014: Messungen vom 10. –14. November 2014 und Multiepochen-Ausgleichung 1987–2014	D. Ineichen E. Brockmann	07.2015



Publication spéciale consacrée à l'observatoire astronomique de Zimmerwald :

- UniPress 130 – Diverse Autoren (2006): 50 Jahre Sternwarte Zimmerwald.
UniPress – Forschung und Wissenschaft an der Universität Bern. Heft 130, September 2006.

2.3.3 Réseau permanent GNSS AGNES / service de positionnement swipos

TB/re- port	Titre	Auteurs	Date
	Réseau permanent GNSS AGNES		
95-25	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Projektvor- schlag	U. Wild A. Wiget	12.1995
96-28	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Dokumentation zur automatischen Datenverarbeitung	E. Brockmann	11.1996
97-01	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Vorstudie	U. Wild A. Wiget Th. Signer R. Hug	05.1998
99-21	Versuchsmessungen RTK / AGNES: Versuchsmessungen RTK / AGNES unter Verwendung der AGNES-Stationen	U. Bruderer	01.2003
00-17	AGNES: Empfängerevaluation. Auswertungen der Testmessungen Thun und weitere Untersuchungen der Empfängerqualitäten	E. Brockmann	06.2000
00-43	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Hauptstudie	R. Hug U. Wild P. Kummer	01.2003
01-05	Die Koordinaten der AGNES-Stationen	E. Brockmann	06.2001
01-39	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Real-time Fineltra 2001 Entwicklung, Integration, Testmessungen	S. Grünig	12.2001
02-08	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES) und Swiss Positioning Service (swipos): Abgrenzung und Marketing- Szenarien	U. Wild	04.2002
02-25	Troposphäreninterpolation aus AGNES: Benutzeranleitung und Resultate anhand der GPS Verdichtungsmessungen 2001	M. Troller E. Brockmann	11.2002
02-32	AGNES-Stationen: Einmessung in LV03 und Anschluss an LV95	B. Vogel	04.2004
04-12	Konzept AGNES Zentrale BIT: Beschreibung der neuen AG- NES Serverarchitektur im BIT (Redundanz, Sicherheit, Archivie- rung)	S. Grünig	09.2004
04-22	Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Schlussbericht Projekt 8101	U. Wild	12.2004
05-04	AGNES-Netzoptimierung 2005 / 2006: Evaluation der Stationen, Konzept, Massnahmenplan, Ausblick Galileo	S. Grünig U. Wild	05.2005
06-25	AGNES II / GLONASS: Testmessungen GNSS-RTK	S. Grünig	03.2007
08-13	AGNES II / GLONASS: Projektantrag, Reporting und	U. Wild E. Brockmann	05.2008



	Schlussbericht	S. Grünig	
11-24	Neue AGNES/swipos-Zentrale: Testmessungen 2011	L. Kislig	12.2011
12-16	AGNES-Ersatzstandort Andermatt: Beurteilung des Standortes Andermatt (Gütsch) und die Beurteilung von drei Alternativstandorten	E. Brockmann M. Wiederkehr Ch. Misslin	10.2012
14-23	Projet AGNES III: Rapport final RE1	D. Andrey	04.2015
15-07	Projet AGNES III: Rapport final RE2	D. Andrey	12.2015
	Service de positionnement swipos		
97-22	swipos-NAV: Technisches Konzept	U. Wild R. Hug St. Tschanz	01.2003
00-06	swipos-Nav: Tests DGPS, couverture et précision	P. Kummer	03.2000
01-40	Testmessungen swipos GIS/GEO	S. Grünig	12.2001
02-51	swipos-GIS/GEO: Testmessungen 2002 im Operat Guggisberg (Auszug aus Diplomarbeit FHBB)	B. Hofer S. Wittmer (FHBB)	01.2003
03-35	swipos über Internet: Konzept für die Weiterentwicklung von swipos-NAV und swipos-GIS/GEO	U. Wild S. Grünig	11.2003
04-05	swipos: VRS-Monitor: Softwarebeschreibung RTKMON und Hardwarebeschreibung eines mobilen VRS-Monitors	A. Wägli S. Grünig	02.2004
04-21	swipos-Testmessungen: Untersuchung der Initialisierungszeit und der Extrapolation / Interpolation bei swipos-GIS/GEO	St. Wittmer U. Wild	10.2004
04-23	Swiss Positioning Service (swipos): Schlussbericht Projekt 8102	U. Wild	12.2004
04-24	Vernetzung SAPOS, APOS und swipos: Schlussbericht D-A-CH	U. Wild S. Grünig	05.2005
04-45	VRS-Monitor: Integrity Monitoring für swipos-GIS/GEO. Technischer Schlussbericht des Projekts P0026	S. Grünig A. Wägli	12.2004
05-08	swipos-NAV: Positionierungsdienst über UKW-RDS, 1996–2004, Schlussbericht	U. Wild	07.2008
05-21	Testmessungen VRS-Monitor 2005: Resultate, Analyse, Ausblick	S. Grünig	12.2005
06-09	Testmessungen VRS-Monitor 2006: Untersuchungen des Einflusses von Schneeablagerungen auf die Positionierung mit swipos-GIS/GEO und Vergleich mit den Resultaten vom PNAC	S. Grünig E. Brockmann	05.2006
07-21	swipos-Testmessungen 2007: Testmessungen GPS/GLONASS im Rahmen des Projekts AGNESII/GLONASS	Th. Wüthrich D. Andrey	07.2007
08-14	swipos-mesures test 2008: Mesures RTK GPS/GLONASS	D. Andrey St. Wittmer	03.2009
08-28	Rover Integrity: Test d'une solution de remplacement du VRS-Monitor	D. Andrey	12.2008
08-32	3D-Baggersteuerung mit swipos-GIS/GEO: Machbarkeitsstudie (WK Th. Hardegger, 10.–28. November 2008)	Th. Hardegger	12.2008
08-33	AGNES/swipos: Integration von real-time Stationen aus Frankreich / Italien: Konzept und Beschaffung SW-Lizenzen	U. Wild	05.2009



09-05	Real-time Monitoring mit swipos: Dokumentation der Versuche mit Trimble Integrity Manager (TIM) am Beispiel des GPS-Überwachungsnetzes Braunwald	D. Ulrich D. Andrey	12.2009
09-06	Review und Redesign von AGNES/swipos: Konzeptstudie zur technischen Weiterentwicklung	D. Andrey Chr. Misslin U. Wild	12.2009
09-06a	Zukunftsanalyse zu AGNES/swipos Diensten	H.-J. Euler	02.2010
09-12	swipos: Businessplan 2008–2011	U. Wild	08.2009
11-04	swipos-II: TP Infrastruktur 2010–2012	Chr. Misslin	01.2013
11-05	swipos-II: TP Migration 2010–2012	D. Andrey, L. Kislig	01.2013
12-18	swipos-II: TP3: Servicemanagement	U. Wild D. Andrey L. Kislig Chr. Misslin	01.2013
12-19	swipos-II: Dokumente zum Projektmanagement	U. Wild	01.2013.
13-15	POSTECH: Schlussbericht RE1	U. Wild D. Andrey L. Kislig Chr. Misslin E. Brockmann H.-J. Euler	01.2014
14-11	POSTECH: Schlussbericht RE2	U. Wild	04.2016
15-05	swipos: Kontroll- und Statistikprogramme Statistik der RINEX-Datenverfügbarkeit	L. Kislig	02.2015
15-06	swipos: Kontroll- und Statistikprogramme <i>Alberding QC-Software</i>	L. Kislig J. Liechti	02.2017
16-11	swipos Leistungstests mit Version TPP 3.8 und RTK-Vergleich mit Dienst RefNet	U. Bruderer	10.2016

Des informations détaillées concernant la mise en place et l'exploitation d'AGNES figurent également dans les publications suivantes, déjà listées au paragraphe A2.1.2 :

- Wild U., E. Brockmann, R. Hug, Chr. Just, P. Kummer, Th. Signer, A. Wiget (2000)
- Wild U., S. Grünig, R. Hug, P. Kummer, I. Pfammatter, U. Bruderer (2001)
- Grünig S., U. Wild (2005)
- Wild U. (2007)

2.3.4 Réseau de référence GNSS – réseau national MN95 (réseaux spéciaux inclus) / CHTRF :

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
	Campagnes de mesures GPS (réseau national MN95) et leur traitement		
89-06	Aufbau von GPS-Netzen in der Schweiz	D. Schneider	1989
95-30	Neue Landesvermessung LV95-89: Messungen und Berechnungen Teilnetz 1989	Th. Signer	1995



95-31	Neue Landesvermessung LV95-90: Messungen und Berechnungen Teilnetz 1990	B. Vogel	1995
95-32	Neue Landesvermessung LV95-91: Messungen und Berechnungen Teilnetz 1991	D. Gutknecht Th. Signer	1995
95-33	Neue Landesvermessung LV95-91A: Anschlusskampagne 1991	D. Gutknecht Th. Signer	1995
95-34	Neue Landesvermessung LV95-92: Messungen und Berechnungen Teilnetz 1992	W. Santschi U. Wild	1995
95-35	Neue Landesvermessung LV95-92A: Anschlusskampagne 1992	W. Santschi A. Wiget	1995
95-36	Neue Landesvermessung LV95-94A: Anschlusskampagne 1994	D. Gutknecht U. Wild	1995
95-37	Neue Landesvermessung LV95-94 Oberarth: Ergänzungsnetz Oberarth 1994	W. Santschi Th. Signer	1995
95-38	Neue Landesvermessung LV95 : Choix des emplacements et matérialisation des points (1989–1992)	D. Gutknecht B. Vogel W. Santschi	1995
95-39	Neue Landesvermessung LV95: Zusammenstellung der Anschlüsse an die LV03 und das LN02	B. Vogel	1997
97-20	LV95: Auswertung der GPS-Messungen 1988–94. Interne Dokumentation	A. Wiget Th. Signer B. Vogel U. Wild	01.2003
02-11	LV95 / LHN95: GPS-Auswertung der Messkampagnen der Jahre 2001 und 2002	E. Brockmann	06.2003
	Densifications locales, régionales et cantonales du réseau national MN95		
90-02	BAHN 2000: Basel–Olten, Wisenberg-Tunnel. Teil 1: Grundlagenvermessung mit GPS	A. Wiget D. Schneider	1990
89-04	BAHN 2000: Basel–Olten, Wisenberg-Tunnel. Teil 2: Ausgleichung des oberirdischen Tunnelnetzes mit verfeinerten Modellen und Gesamtausgleichung mit GPS	D. Schneider A. Wiget	1989
91-01	BAHN 2000: NBS Zürich Flughafen–Winterthur, Brüttener-Tunnel. Grundlagenvermessung 1990 mit GPS. Durchführung der GPS-Messkampagne und die Auswertung der Messungen	D. Schneider	1991
91-03	BAHN 2000: Muttenz–Olten, Adler-Tunnel. Grundlagenvermessung mit GPS. Technischer Bericht IV über die Rahmenbedingungen für die Vermessung mit GPS	A. Wiget	1991
95-14	BAHN 2000: Mattstetten–Rothrist: GPS-Grundlagennetz 1994	T. Signer W. Santschi A. Wiget	06.1995
96-31	Verdichtung LV95 Kanton Zürich: 16.–19. September 1996	Th. Signer	02.1997
96-32	Verdichtung LV95 SG / TG 1996: Messungen, Auswertung und Ergebnisse	Th. Signer W. Santschi	03.1997



96-33	Verdichtung LV95 Laufental: 7.–8. Mai 1996	D. Gutknecht Th. Signer	03.1997
96-35	Verdichtung LV95 Kanton Schwyz: 9.–12. September 1996	Th. Signer	04.1997
97-29	LV95: Verdichtung Seeland: GPS-Messungen vom 9.–12. Juni 1997	D. Gutknecht Th. Signer	11.1997
97-37	LV95: Verdichtung AG / ZH 1997: GPS-Messungen vom 1.–5. September 1997	Th. Signer	11.1997
99-28	Kanton Luzern: Verdichtung LV95 Seetal: Auswertung der GPS-Messungen vom 7.–8. Juni 1999	W. Santschi F. Volluz	09.1999
00-04	LV95: Verdichtung GPS-Netzes LV95 in den Kantonen AI, BE, GL, LU, NW, OW, TG, UR, SG und dem FL: Rekognoszierung, Messung und Auswertung 1998 – 1999	W. Santschi D. Gutknecht	10.2004
00-39	LV95: Verdichtung des GPS-Netzes in den Kantonen Graubünden und Tessin: Rekognoszierung, Messung und Auswertung	W. Santschi E. Brockmann	06.2003
01-30	LV95: Verdichtung des GPS-Netzes in den Kantonen Freiburg, Waadt und Wallis: Rekognoszierung, Messung und Auswertung 2001	W. Santschi	10.2004
04-34	Lagefixpunkte Kanton LU: Berechnung der Transformations- und Kontrollpunkte (LFP2) im Netz 200	W. Santschi	10.2004
04-50	LV95: Verdichtung GPS-Netz LV95 im Kanton SH. Rekognoszierung, Messung und Auswertung 2004	W. Santschi	08.2005
	Néotectonique - nord de la Suisse		
87-01	GPS-Netz Nordschweiz, Projektentwurf	D. Schneider	1987
90-03	GPS-Netz «Neotektonik» 1988	A. Wiget D. Schneider	1990
92-05	GPS-Netz Neotektonik Nordschweiz: Konzept und Vorschlag für die Messkampagne 1993	D. Schneider	1992
95-02	GPS-Netz Neotektonik Nordschweiz: Konzept und Messprogramm 1995	D. Schneider A. Wiget	01.1995
96-05	GPS-Netz Neotektonik Nordschweiz: Messkampagne 1995 und Deformations-Grobanalyse 1988–1995	A. Wiget D. Schneider E. Gubler	06.1996
04-40	GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Messkampagne 2004 im Auftrag der Nagra; kombiniert mit der Messkampagne CHTRF2004 im GPS-Landesnetz LV95	A. Wiget A. Schlatter E. Brockmann D. Ineichen	01.2006



05-31	GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Kurzbericht zu den vorläufigen Ergebnissen der Messkampagne 2004 im Auftrag der NAGRA; kombiniert mit der Messkampagne CHTRF2004 im GPS Landesnetz LV95	A. Wiget	05.2005
07-03	GPS-Netz NEOTEKTONIK Nordschweiz 2004: Messkampagne im Auftrag der Nagra und Deformationsanalyse 1988–1995–2004	A. Wiget A. Schlatter E. Brockmann D. Ineichen U. Marti R. Egli	04.2007
BLS AlpTransit – tunnel de base du Lötschberg			
93-02	Projekt AlpTransit (NEAT), Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung für die Absteckung des Lötschberg-Basistunnels: Zielsetzung, Projekt- und Terminvorschlag	D. Schneider	1993
94-01	Projekt AlpTransit (NEAT), Lötschberg-Basistunnel: Grob-Präanalyse des Basistunnels Frutigen – Steg-Mundbach	U. Arnold D. Schneider A. Wiget	1994
94-02	Projekt AlpTransit (NEAT), Lötschberg-Basistunnel: Präanalyse Sondierstollen (Sondierstollen Frutigen – Kandersteg und Fensterstollen Mitholz)	U. Arnold D. Schneider A. Wiget	1994
94-03	Projekt AlpTransit (NEAT), Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung für die Absteckung des Lötschberg-Basistunnels: Sondierstollen Frutigen – Mitholz und Zwangspunkte Wallis	D. Schneider A. Wiget	1994
94-04	Vorprojekt AlpTransit - Gotthard (NEAT), Grundlagenvermessung für den Gotthard-Basistunnel: Koordination mit der Landesvermessung (LV95 und Landesnivellement)	D. Schneider B. Mattli	1994
94-05	Projekt AlpTransit (NEAT), Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung 1. Etappe: GPS-Gesamtnetz, Lage- und Höhenetze für den Sondierstollen	A. Wiget	06.1994
97-31	BLS-AlpTransit: Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung 1997 GPS-Grundlagennetz (LV95) und Anschlüsse ans Landesnivellements (LHN95)	A. Wiget C. Valiquier	03.1999
00-12	AlpTransit Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung für die Tunneldurchschläge auf der Basis der Landesvermessung LV95; Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München 13.–17. März 2000	A. Schlatter U. Marti A. Wiget H.-U. Riesen	03.2000
01-12	AlpTransit Lötschberg-Basistunnel: Grundlagennetz-Ergänzung 2001 Portal Ferden (Goppenstein)	A. Wiget	05.2001
07-09	BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnel: Die Grundlagenvermessung und weitere Beiträge des Bundesamtes für Landestopografie zur Vermessung des Lötschberg-Basistunnel. Dieser Report enthält eine Liste aller Technischen Berichte und swisstopo reports zum BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnel sowie eine Liste aller Fachpublikationen. Insgesamt wurden folgende Berichte verfasst: - 5 Konzeptstudien und Berechnungen von Präanalysen, - 11 Berichte zum GPS-Grundlagennetz und zu Netzerweiterungen,	A. Wiget	08.2007



	- 7 Berichte zum Höhengrundlagennetz und zu RCM-Analysen, - 16 Berichte mit Berechnungen der orthometrischen Höhen.		
	AlpTransit – tunnel de base du Saint-Gothard		
92-02	SBB: Vorprojekt AlpTransit (NEAT): Grundlagenvermessung für die Absteckung des Gotthard-Basistunnels mit GPS	D. Schneider A. Wiget	1992
94-04	Vorprojekt AlpTransit - Gotthard (NEAT), Grundlagenvermessung für den Gotthard-Basistunnel: Koordination mit der Landesvermessung (LV95 und Landesnivellement)	D. Schneider B. Mattli	1994
95-29	AlpTransit: Gotthard-Basistunnel: Grundlagenvermessung mit GPS: Verdichtung von LV95. Kurzbericht mit prov. Koordinaten	U. Wild W. Santschi	1995
96-09	AlpTransit: Gotthard-Basistunnel: (Nachtrag zum TB 95-29) Grundlagenvermessung mit GPS: Verdichtung von LV95. Definitive Resultate in den Bezugsrahmen 'LV95' und 'CHTRF95'	U. Wild A. Wiget	05.1996
97-10	Transformation raumbezogener Daten von LV03 auf LV95 im Kanton Uri (Reusebene Altdorf-Amsteg): Arbeit in Koordination mit dem Projekt AlpTransit	Th. Signer F. Bräker U. Gasser P. Patocchi	04.1997
98-19	LV95: Transformation raumbezogener Daten von LV03 auf LV95 im Kanton Tessin (Bahnachse Biasca – Chiasso). Arbeit in Koordination mit dem Projekt AlpTransit	Th. Signer	03.1998
00-13	AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Ergebnisse der kinematischen Analyse der Landesnivellements im Gotthardgebiet und grossräumige Überwachung des Projektgebiets mit Hilfe von Präzisionsnivellements und mit GPS-Permanentnetzen	D. Schneider A. Schlatter Th. Signer U. Wild	03.2000
	Campagnes CHTRF		
97-21	LV95: Konzept CHTRF98 (Swiss Terrestrial Reference Frame 1998). Wiederholungs- und Permanentmessungen im GPS-Landesnetz:	D. Schneider U. Marti A. Wiget U. Wild	07.2002
98-15	LV95-CHTRF98: GPS-Messungen 1998: Messkampagne vom 9.08.–25.09.1998 in «Swiss Terrestrial Reference Frame 1998»	A. Wiget	05.2004
98-16	LV95-CHTRF98: GPS-Messungen 1998: Auswertung der Messungen und Beurteilung der Resultate	E. Brockmann	8.2003
03-25	LV95 / CHTRF2004 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2004) Teil 1: Konzept für die Wiederholungs- und Permanentmessungen im GPS-Landesnetz LV95	E. Brockmann A. Schlatter A. Wiget	03.2004
04-06	LV95 / CHTRF2004 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2004) Teil 2: Messkampagnen vom April–September 2004 im GPS-Landesnetz LV95	A. Schlatter A. Wiget	04.2005
05-19	EUREF'05: CHTRF2004 Results of the 3rd observation of the Swiss GPS Reference Network LV95 and status of the Swiss Combined Geodetic Network CH-CGN. (Paper presented at the EUREF Symposium, Vienna, Austria, 1–4 June 2005)	E. Brockmann D. Ineichen U. Marti A. Schlatter	12.2005
10-24	LV95 / CHTRF2010 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2010) Teil 1: Messkonzept und Messkampagnen vom April–Oktober 2010 im GNSS-Landesnetz LV95	A. Schlatter	06.2011



10-25	LV95 / CHTRF2010 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2010) Teil 2: Auswertung der GPS-Messungen 2010 und Resultate der Gesamtausgleichung 1988–2010	E. Brockmann	06.2011
16-08	LV95 / CHTRF2016 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2016) Teil 1: Messkonzept und Messkampagnen vom April–Oktober 2016 im GNSS-Landesnetz LV95	J. Carrel S. Beckel	06.2017
16-19	LV95 / CHTRF2016 (Swiss Terrestrial Reference Frame 2016) Teil 2: Auswertung der GNSS-Messungen 2016 und Resultate der Gesamtausgleichung	E. Brockmann	07.2018
	Entretien		
01-31	LV95: Unterhalt GPS-Netz 2001: Neubestimmung der zerstörten Punkte «Aeschi» und «Schauenberg»	B. Vogel E. Brockmann	07.2002
02-01	Landesvermessung der Schweiz: Unterhaltskonzept der geodätischen Netze	W. Santschi B. Vogel Th. Signer B. Mattli D. Gutknecht	07.2002
09-14	Nachführungskonzept für die geodätische Landesvermessung (Unterhaltskonzept)	Geodäsie	11.2010
09-14f	Plan de mise à jour de la mensuration nationale géodésique	Geodäsie	05.2011
18-05	Konzept LV95-Rückversicherungen: Versicherung und Einmessung von Rückversicherungen der LV95-Punkte und AGNES-Stationen	St. Beckel J. Carrel A. Schlatter	02.2018

2.3.5 Réseau gravimétrique national RGN2004

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
04-08	Landesschwerenetz LSN 2004 Konzept für eine neue gravimetrische Landesvermessung der Schweiz	U. Marti D. Schneider	02.2005
04-10	LSN2004 (CH-CGN): Landesschwerenetz 2004 Absolute und relative Schweremessungen auf dem Fundamentalpunkt Zimmerwald 2004–2005 und Verbindung mit der Schwerestation metas	U. Marti Ph. Richard PV. Radogna	09.2005
05-14	LSN2004: Landesschwerenetz 2004, Station Brig Erneuerung und Neumessung einer absoluten Schwerestation in Brig 2005, absolute Schweremessungen vom 6.–7. Juli 2005 und Anschluss ans LHN	U. Marti Ph. Richard	07.2006
06-07	LSN2004 (CH-CGN): Landesschwerenetz 2004 Absolute und relative Schweremessungen auf dem Fundamentalpunkt Zimmerwald 2006, 2007 und Verbindung mit der Schwerestation metas	U. Marti	06.2012
07-11	Landesschwerenetz (LSN2004): Einrichten der absoluten Schwerestation Basel und Absolutmessungen 2006	U. Marti Ph. Richard	08.2007
10-12	Absolute Schweremessungen 2007 bis 2010: Messungen für das LSN2004 auf den Stationen Andermatt, Zerne, Lausanne,	U. Marti H. Baumann	09.2010



	Zürich und Monte Ceneri		
10-13	Absolute Schweremessungen in Zimmerwald und in Warbern bis 2010	U. Marti H. Baumann	02.2013
17-04	Gravimeter Eichstrecke Interlaken – Jungfrauoch. Arbeiten in den Jahren 2010–2016	U. Marti	06.2017
	AlpTransit – tunnel de base du Saint-Gothard		
01-36	AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Schwerefeldstudie	U. Marti	01.2002
05-34	Astrogeodätische und gravimetrische Zusatzmessungen für den Gotthard-Basistunnel. Vergleiche zwischen astrogeodätischen und gravimetrischen Messungen vom Sommer 2005 mit modellbasierten Werten	A. Wiget U. Marti A. Schlatter M. Ganz	10.2005

Des informations détaillées relatives aux mesures gravimétriques et au réseau gravimétrique de base figurent aussi dans les publications suivantes :

- Hunziker E. (1959): Gravimetermessungen in den Jahren 1953 bis 1957. *Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Band 25. Schweizerische Geodätische Kommission, 1959.
- Fischer W. (1983): Das Nationale Schwerenetz der Schweiz (Swiss National Gravity Net, SNGN). Teil 1: Messungen mit LaCoste-Romberg Gravimetern. IGP-Bericht Nr. 68. ETH Zürich.
- Arnet F., E. Klingelé (1997): SG95: Das neue Schweregrundnetz der Schweiz. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Band 54. Schweizerische Geodätische Kommission, 1997.

2.3.6 Réseau altimétrique national RAN95

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
97-02	Landeshöhennetz 1995 (LHN95): Anleitung zur Erfassung der Messdaten	R. Näf	02.1997
97-34	The new Swiss National Height System LHN95: Paper presented at the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, September 1997	U. Marti D. Schneider	09.1997
98-03	Pilotstudie LHN95-Verdichtung: Machbarkeitstests 1998 in Zusammenarbeit mit dem KVA-BE im LFP2-Netz Emmental und auf der Sekundärlinie des LN Sus-ten	A. Schlatter E. Brockmann K. Wysser U. Marti D. Schneider	12.1998
98-11	Landeshöhennetz der Schweiz LHN95 Verzeichnis der Linien des Landesnivellements 1903–1997	U. Bruderer B. Mattli	04.1998
98-18	RNA95: Réseau national altimétrique Suisse: Situation générale du réseau. Proposition d'une présentation graphique (DAO)	P. Kummer	03.1998
98-26	Neues Landeshöhennetz der Schweiz LHN95 Provisorische kinematische Ausgleichung 1998 zur Festlegung der orthometrischen Höhe des Fundamentalpunktes Zimmerwald	A. Schlatter U. Marti	10.2000
99-22	LN02 / LHN95: Anschlussmessung Repère Pierre du Niton 1998 Ergänzungen zum Faszikel 150 der Nivellementlinie Nyon–Genève–Moillesulaz	A. Schlatter E. Brockmann C. Valiquer A. Wiget	10.2000
99-37	Landesnivellement LHN95: Neotektonische Untersuchungen	A. Schlatter	12.1999



	im Lötschberg-Scheiteltunnel nach Abschluss der Tunnelmessungen 1999	C. Valiquier	
01-32	LHN95: Übergang zwischen den Höhensystemen LN02 und LHN95	U. Marti	01.2002
02-33	Landeshöhennetz LHN95 Die Anschlüsse des GPS-Netzes LV95 und der AGNES-Stationen an das Landeshöhennetz (LHN95 und LN02)	A. Schlatter B. Mattli B. Vogel	06.2003
02-41	Landeshöhennetz: Planung der Neumessungen 2004–2007	A. Schlatter B. Mattli	10.2002
03-10	Projekt LHN95: Der Übergang zwischen den Höhenrahmen LN02 und LHN95. Anpassungen und weitere Testberechnungen	U. Marti	06.2003
03-14	EUVN-DA: Densification action for the European Vertical Reference System: Concept and proposed point densification	U. Marti A. Schlatter	05.2003
03-37	Gravimetrie für das Landeshöhennetz: Mess- und Auswerteverfahren Resultate der Messungen 2004	A. Schlatter U. Marti B. Mattli	02.2005
Néotectonique - nord de la Suisse			
92-03	Neotektonische Untersuchungen der NAGRA im Hauensteingebiet: Nivellements-Messungen 1990–91 und kinematische Ausgleichung der relativen Höhenänderungen 1911–1991	D. Schneider B. Mattli E. Gubler	1992
98-10	Neotektonische Untersuchungen in der Nordostschweiz: Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien und Übersicht über die Ergebnisse der Geodätischen Messungen	A. Schlatter	04.1999
BLS-AlpTransit – tunnel de base du Lötschberg			
95-28	AlpTransit: Lötschberg-Basistunnel: RCM-Analyse Goppenstein–Steg der Landesnivellements 1916-25-48-83	E. Gubler D. Schneider C. Valiquier	12.1995
97-31	BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnel: Grundlagenvermessung 1997. GPS-Grundlagennetz (LV95) und Anschlüsse ans Landesnivellement (LHN95)	A. Wiget C. Valiquier	03.1999
07-09	BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnel: Die Grundlagenvermessung und weitere Beiträge des Bundesamtes für Landestopografie zur Vermessung des Lötschberg-Basistunnel. Dieser Report enthält eine Liste aller Technischen Berichte und swisstopo Reports zum BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnel sowie eine Liste aller Fachpublikationen. Zu den Höhengrundlagen wurden verfasst: - 7 Berichte zum Höhengrundlagennetz und zu RCM-Analysen, - 16 Berichte mit Berechnungen der orthometrischen Höhen.	A. Wiget	08.2007
AlpTransit – tunnel de base du Saint-Gothard			
95-22	AlpTransit: Gotthard-Basistunnel: Höhengrundlagennetz auf der Basis des Landesnivellements: Vorschlag für Ergänzungsmessungen sowie eine strenge kinematische Neuausgleichung der Landesnivellementslinien im Projektierungsgebiet	D. Schneider R. Haag	12.1995



96-21	AlpTransit: Gotthard-Basistunnel: Höhengrundlagennetz im Rahmen von LHN95, Ergänzungsmessungen 1996 und Berechnung der Gebrauchshöhen im Bezugsrahmen LN02	B. Mattli A. Schlatter	05.1997
97-08	Prov. Orthometrische Höhen für AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Ergänzungen im neuen Landeshöhennetz 1995 (LHN95) als Grundlage für das Werknetz vom AlpTransit. Kinematische Ausgleichung und Berechnung provisorischer orthometrischer Höhen LHN95	A. Schlatter U. Marti D. Schneider	05.1998
97-15	Nivellements im Gotthard-Strassentunnel für AlpTransit: Präzisionsnivellement im Gotthard-Strassentunnel (A2). Erfassung der Messungen 1980 und Auswertung der «Beobachteten Höhen» 1980 / 1997 als Ergänzung im neuen Landeshöhennetz 1995 (LHN95) und als Grundlage für das Werknetz von AlpTransit	A. Schlatter B. Mattli	06.1999
97-35	AlpTransit: Gotthard-Basistunnel Kinematische Neuausgleichung der AlpTransit-Schleifen. Provisorische Berechnung 1997 der Differenzen LHN95 - LN02 im Projektierungsgebiet (Zwischenbericht)	A. Schlatter	10.1997
97-40	Neues Landeshöhennetz LHN95: Deformations-Analyse Gotthard Untersuchung der Senkungerscheinungen im Bereich des Gotthard-Strassentunnels	A. Schlatter E. Gubler B. Mattli D. Schneider	02.1998
00-13	AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Ergebnisse der kinematischen Analyse der Landesnivellements im Gotthardgebiet und grossräumige Überwachung des Projektgebiets mit Hilfe von Präzisionsnivellements und mit GPS-Permanentnetzen	D. Schneider A. Schlatter Th. Signer U. Wild	03.2000

Autres publications notables en rapport avec le réseau altimétrique national RAN95 :

- Schlatter, A., U. Marti (2005): Höhentransformation zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02. In: *Geomatik Schweiz* 103 (2005)8, 450–453.
- Schlatter A. (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Band 72. SGK 2007.
- Schlatter, A., U. Marti (2007): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95. Teil 12: Landeshöhennetz LHN95. *Swisstopo-Doku* Nr. 20. Bundesamt für Landestopografie.
- Vogel, B., M. Burkard, M. Kistler, U. Marti, J. Ray, M. Scherrer, A. Schlatter, A. Wiget (2009): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95. Teil 13: Einführung des Bezugsrahmens LV95 in die Nationale Geodaten-Infrastruktur. *swisstopo Doku* Nr. 21. Bundesamt für Landestopografie.
- Schlatter, A., U. Marti, A. Wiget (2016): AlpTransit-Gotthard-Basistunnel: Aspekte zu den Themen Schwerefeld, Höhe und Geodynamik. *AVN* 123 (2016) 7.

2.3.7 Réseau géodésique combiné CH-CGN / ECGN

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
03-13	«CH-CGN-1»: Swiss contribution to the European Combined Geodetic Network (ECGN). Proposal submitted in response to the 1st Call for Participation to the IAG Subcommission for Europe (EUREF)	D. Schneider W. Gurtner U. Marti E. Brockmann A. Wiget	05.2003



04-19	EUREF: «CH-CGN-1»: Swiss Contribution to the European Combined Geodetic Network (ECGN) Intermediate Report May 2004 submitted to the IAG Subcommission for Europe (EUREF)	D. Schneider W. Gurtner U. Marti E. Brockmann Ph. Richard A. Wiget	05.2004
-------	---	---	---------

2.3.8 Modèles du géoïde de la Suisse

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
98-25	Das Geoid der Schweiz 1998: Technische Ergänzungen zur Neuberechnung des Geoids der Schweiz	U. Marti	08.1998
02-16	GPS-Geoid 2003 (CHGeo2003): Konzertierte Aktion für eine gezielte Verbesserung des Geoidmodells im Rahmen der neuen Landesvermessung LV95	D. Schneider E. Brockmann U. Marti A. Schlatter	08.2002
03-30	CHGeoid2003: Planung und Auswertung der GPS-Messungen	E. Brockmann	12.2003
03-32	CHGeoid2003: GPS/Nivellement Rekognoszierung, Versicherung, Nivellement-Anschlussmessungen und Punktdokumentation	A. Schlatter B. Mattli M. Kistler	01.2005
03-33	CHGeoid2003: Astrogeodätische Messungen mit digitalen Zenitkameras vom 7.–29. Oktober 2003	U. Marti Ch. Hirt A. Müller B. Bürki	11.2004

Des informations détaillées concernant les modèles du géoïde de la Suisse figurent aussi dans les volumes de la CGS n° 41, 43 et 56 (cf. A2.1.4) ainsi que dans les publications suivantes :

- Elmiger A. (1969): Studien über Berechnungen von Lotabweichungen aus Massen, Interpolation von Lotabweichungen und Geoidbestimmung in der Schweiz. *Mitteilungen des IGP der ETHZ* Nr. 12. Zürich, 1969.
- Gurtner W. (1978): Das Geoid der Schweiz. *Mitteilungen des IGP der ETHZ* Nr. 20. Zürich, Februar 1978.
- Marti U. (2002a): Aufbau der neuen Landesvermessung LV95. Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998 CHGeo98. *swisstopo-Doku* Nr. 16. Bundesamt für Landestopografie, Wabern, 2002.
- Olivier R., B. Dumont, E. Klingelé (2010): L'atlas gravimétrique de la Suisse. *Géophysique N.43. Contribution à la géologie de la Suisse*. ISSN 0253-1186. Schweizerische Geophysikalische Kommission, 2010.

2.3.9 Modèle cinématique CHKM95 (projet Swiss4D/-II); cf. aussi A2.3.4 rapports sur CHTRF

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
04-36	Swiss4D: Geodynamik in der Schweiz 1. Zwischenbericht zum FEP mit dem Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) der ETH Zürich	M. Kistler A. Geiger J. Verdun	11.2004



04-39	Swiss4D: Geodynamik in der Schweiz 2. Zwischenbericht zum FEP mit dem Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) der ETH Zürich	R. Egli	1020.04
04-47	Swiss4D: Geodynamik in der Schweiz Schlussbericht zum FEP mit dem Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) der ETH Zürich	R. Egli	11.2004
05-46	Swiss4D: Geodynamik in der Schweiz Projektschlussbericht (P0024)	A. Wiget	12.2006
13-08	Swiss4D-II: Schlussbericht des Projekts (P0113)	U. Marti A. Villiger	07.2013

D'autres informations sur les évaluations cinématiques se trouvent entre autres dans les rapports de swiss-topo sur CHTRF (cf. chapitre 2.3.4 Campagnes CHTRF) ainsi que dans des publications sur le thème de la géodynamique (cf. chapitre 2.1.3), en particulier :

- Wiget A., E. Brockmann, A. Schlatter, A. Geiger, O. Heller and R. Egli (2005): The project Swiss4D: A kinematic model of Switzerland derived from geodetic measurements; a status report. *3rd Swiss Geoscience Meeting*, Zürich, 19. November 2005.
- Egli R., A. Geiger, A. Wiget, H.-G. Kahle (2007): A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformation: first results in the Swiss Alps. *Geophysical Journal International* (2007) 168, p. 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03138.x>.
- Wiget A., U. Marti, R. Egli, A. Geiger, O. Heller (2007): Modelling the Kinematics of the Deformation of the Swiss Geodetic Reference Network: Project Swiss4D. Poster presented at the *IUGG XXIV General Assembly*, Perugia, Italy, 2–13 July 2007.

2.3.10 Documentation, logiciels, service de données sur les points fixes FPDS, transformation et services Web

TB/Report	Titre	Auteurs	Date
02-36	Projekt FP-Datenservice (FPDS): Umsetzungskonzept und Datenmodell (Projekt 8109)	P. Kummer H.-P. Christ	12.2002
03-31	GRIPS (Geodätische Referenzdaten als Internet-Produkte und Services): hermes Projektantrag	U. Wild	10.2003
04-15	FPDS: Web und LBS Erweiterung des FPDS durch Web-Dienste und Location Based Services (LBS)	U. Wild D. Andrey	12.2004
04-28a	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Dokumentation und Pflichtenheft für die SW-Entwicklung der Versionen 0.9 und 1.0	D. Andrey H.-P. Christ U. Wild	08.2005
04-28b	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Dokumentation und Pflichtenheft für die SW-Entwicklung der Version 1.1	D. Andrey U. Wild A. Schlatter B. Mattli U. Marti	08.2005
04-37	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Planung der Entwicklungs- und Abschlussarbeiten sowie der Inbetriebnahme 2004–2005	U. Wild D. Andrey M. Kistler	06.2005



04-55	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Projektschlussbericht 1. Teil	P. Kummer	1020.04
05-05	Projekt GRIPS: Geodätische Referenzdaten als Internet-Produkte und -Services (P0073): Konzeptbericht (Hermes)	A. Wiget M. Kistler E. Brockmann U. Marti B. Vogel U. Wild	07.2006
05-07	LBS-Prototyp für den Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Entwicklungszusammenarbeit mit der Hochschule für Technik und Informatik (HTI) Biel und mit der FHBB Muttenz	U. Wild D. Andrey Pascal Gafner Beat Dietsch	08.2008
05-24	Entwicklung einer Transformations-Routine für FINELTRA und HTRANS und deren Integration in GPSNet: Spezifikation, Realisierung, Tests	S. Grünig	12.2005
06-08	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): (P0022-01) Projektschlussbericht 2. Teil	U. Wild	05.2009
07-04	LSKS 2007: Untersuchung zur Verwendbarkeit der Dreiecksvermaschung Stufe AV (CHENyx07) in Form eines regelmässigen Gitters	U. Marti	05.2007
07-20	Koordinatenursprung «alte Sternwarte Bern»: Bestimmung der Koordinaten des geodätischen Denkmals in LV03 und LV95	C. Rösli Th. Wüthrich A. Schlatter	03.2008
08-07	Lokale Einpassung LV95 → LV03 mit GNSS Optimaler Algorithmus für Gebiete mit unzureichender Genauigkeit der Dreiecksvermaschung	Th. Wüthrich B. Vogel	03.2009
08-18	Transformation von Rasterdaten Wechsel des Bezugsrahmens von LV95 auf LV03 von Rasterdaten. Beispiel SWISSIMAGE	U. Marti	06.2008
08-20	Bezugsrahmenwechsel LV03-LV95 Erzeugung einer NTV2-Datei als Näherungslösung für den Bezugsrahmenwechsel	U. Marti	06.2008
09-07	REFRAME .NET / COM library Entwicklerhandbuch	J. Ray	02.2009 04.2016
09-22	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Erneuerung, Vorstudie	M. Burkard	01.2011
09-32	Bezugsrahmenwechsel mit SwissRailTra95 Review des Überführungskonzeptes der Schweizerischen Bundesbahnen SBB	M. Kistler U. Marti	06.2017
10-06	Minimale Geodatenmodelle der Geodäsie Beschreibung der (minimalen) Geodatenmodelle für die Georeferenzdaten des Bereiches Geodäsie	A. Wiget E. Brockmann M. Kistler U. Marti U. Wild	08.2012
10-06f	Modèles de géodonnées de la Géodésie Description des modèles de géodonnées (minimaux) applicables aux géodonnées de référence relevant du domaine Géodésie	A. Wiget E. Brockmann M. Kistler	08.2012



		U. Marti U. Wild	
10-19	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Erneuerung der Import- und Export-Schnittstellen, Pflichtenheft	M. Burkard	03.2011
11-14	Bezugsrahmenwechsel LV03 → LV95: Grundlagen für ein Kommunikationskonzept	A. Wiget	12.2011
11-14f	Changement de cadre de référence MN03 → MN95: Bases d'un concept de communication	A. Wiget	04.2012
13-04	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Entwicklung der neuen Interfaces Export und Import	M. Burkard	04.2013
13-06	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Entwicklung des neuen Interfaces Bezugsrahmenwechsel LV03 ⇒ LV95	M. Burkard	05.2013
14-12	Fixpunkt-Datenservice (FPDS): Neuer Referenzdatensatz für den Interlis-Checker der V+D – Tool fpds2CheckCH	M. Burkard	07.2014
15-12	Software Operating AWS: Betrieb Transformations-Dienste und Lizenzserver auf der Amazon Web Services Umgebung	C. Baumann J. Ray	08.2015
15-13	REFRAME .NET library for Swipos: Developer manual	J. Ray	07.2015
16-03	Geodetic REST Web services (REFRAME)	J. Ray	04.2016

2.3.11 Contrôle de la qualité

TB/Re- port	Titre	Auteurs	Date
02-40	QMS-géodésie: direction et soutien. Rapport final du projet QMS-GEO	P. Kummer	09.2002
03-06	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Indikatoren, Standards und Messgrößen für die Produkte der Landesvermessung 2004–2007	D. Schneider E. Brockmann B. Vogel A. Wiget U. Wild	12.2005



07-17	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung am Ende der Leistungsauftragsperiode 2004–2007	A. Wiget E. Brockmann B. Vogel U. Wild	12.2008
10-11	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Indikatoren, Standards und Messgrössen für die Produkte der geodätischen Landesvermessung (ab dem Leistungsauftrag 2008–2011)	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann D. Ineichen M. Kistler U. Marti A. Schlatter B. Vogel U. Wild	11.2010
10-11f	Normes de qualité de la mensuration nationale: Indicateurs, normes et grandeurs de mesure applicables aux produits de la mensuration nationale géodésique (du mandat de prestations 2008–2011ff)	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann, D. Ineichen M. Kistler U. Marti A. Schlatter B. Vogel U. Wild	11.2010
11-03	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung am Ende der Leistungsauftragsperiode 2008–2011	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann L. Kislig U. Marti A. Schlatter B. Vogel U. Wild	07.2011
11-17	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2011	A. Wiget, D. Andrey E. Brockmann L. Kislig U. Marti A. Schlatter B. Vogel U. Wild	04.2012
12-17	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2012	A. Wiget, D. Andrey, E. Brockmann, L. Kislig U. Marti A. Schlatter B. Vogel U. Wild	11.2012
13-13	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2013	A. Wiget, D. Andrey E. Brockmann, L. Kislig, U. Marti, A.	11.2013



		Schlatter, B. Vogel, U. Wild	
14-18	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2014	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann L. Kislig M. Kistler U. Marti A. Schlatter U. Wild	12.2014
15-16	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2015	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann L. Kislig M. Kistler U. Marti A. Schlatter U. Wild	12.2015
16-16	Qualitätsstandards der Landesvermessung: Erhebung und Auswertung der Messgrössen zur Beurteilung der Zielerreichung im Jahr 2016	A. Wiget D. Andrey E. Brockmann L. Kislig M. Kistler U. Marti A. Schlatter U. Wild	05.2017

2.4 Logiciels

Le logiciel géodésique principalement développé par swisstopo pour couvrir ses propres besoins est diffusé gratuitement à toute personne intéressée :

<https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/applications/geosoftware.html>

En outre, différents services de calcul et de transformation sont également proposés en ligne :

<https://www.swisstopo.admin.ch/fr/cartes-donnees-en-ligne/calculations-services.html>