

Nouveau système altimétrique suisse



© swisstopo

Étude sur la modernisation du système
et du cadre de référence altimétrique en Suisse

Partie II – Définition du système
et analyse des conséquences techniques

Dr Daniel Willi
Dr Andreas Schlatter
Dr Urs Marti
Elisa Borlat
Dr Sébastien Guillaume
Jérôme Carrel



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de topographie swisstopo

Photo de couverture : mesures GNSS statiques sur le point MN95 « Col du Sanetsch » (S. Condamin)

Impressum

© 2024 Office fédéral de topographie swisstopo

Rédaction :
Office fédéral de topographie swisstopo
Géodésie et Direction fédérale des mensurations cadastrales
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Téléphone : +41 58 469 01 11
Courriel : mensuration@swisstopo.ch



Management summary

Ce deuxième rapport technique comporte la définition du nouveau système altimétrique, le concept de réalisation et de transformation ainsi que quelques pistes pour la mise en œuvre. Ce document fait donc partie des clarifications préalables effectuées afin que la direction de swisstopo puisse prendre, en 2027, une décision fondée sur la suite à donner au projet. La décision d'introduire un nouveau système altimétrique incombe au Conseil fédéral, sur proposition de swisstopo.

Le présent rapport est une recommandation à l'intention des décisionnaires. Il doit d'une part permettre une discussion sur les caractéristiques du nouveau système altimétrique et d'autre part servir de base interne à swisstopo pour la suite des travaux. Les principales recommandations du groupe de travail sont brièvement décrites ci-dessous.

Le nouveau système altimétrique sera un système de référence de coordonnées verticales cinématique et basé sur des altitudes normales, calculées à partir de cotes géopotentielle. Les altitudes normales présentent des avantages pratiques par rapport aux altitudes orthométriques. RAN95, en revanche, est basé sur des altitudes orthométriques.

Les déplacements verticaux différentiels en Suisse sont de l'ordre de 1 à 2 mm par an entre le plateau et les Alpes et s'additionnent au fil des années pour devenir progressivement significatifs pour des usages courants. Seule la modélisation des déformations verticales permet de garantir la longévité du cadre de référence altimétrique et une précision homogène sur l'ensemble de la Suisse.

La gestion du modèle cinématique sera facilitée par des services de transformation. Les altitudes des géodonnées à caractère officiel seront gérées à l'époque de référence du cadre, c'est-à-dire à l'année de réalisation du cadre de référence. Elles seront ainsi invariables dans le temps, tout comme maintenant avec le système NF02. Pour la plupart des applications, le modèle cinématique ne devra être considéré qu'au moment de la détermination altimétrique.

Une transformation rigoureuse entre RAN95 et le nouveau cadre de référence altimétrique sera déterminée. Pour le passage de NF02 au nouveau cadre, une interpolation sur la base des résidus sera mise en œuvre. À cette fin, des points d'appui à la transformation devront être acquis par mesures GNSS statiques.

La faisabilité de l'approche choisie sera validée dans le cadre de « Proofs of Concept », qui seront mis en œuvre en collaboration avec quelques cantons. Ces essais déboucheront sur les concepts finaux de transformation et de mise en œuvre.

En parallèle des études de faisabilité, toutes les mesures d'accompagnement sont à mettre en place, notamment les plans de communication et de financement, afin de permettre l'introduction du nouveau système altimétrique officiel suisse dans une échéance à définir. Il s'agit en particulier de coordonner les travaux préparatoires avec les autres projets en cours, par exemple l'introduction du nouveau modèle de données de la mensuration officielle (DMAV).





Table des matières

1. Introduction	7
1.1. Champ d'application	7
1.2. Terminologie	8
1.2.1. Système altimétrique	8
1.2.2. Cadre de référence altimétrique	8
1.2.3. Modèle cinématique	8
1.2.4. Époque	8
1.2.5. Altitude officielle	8
1.2.6. Modèle de quasi-géoïde	9
1.2.7. Modèle de pesanteur	9
1.2.8. Modèle des déviations de la verticale	9
2. Définition du nouveau système	11
2.1. Principes et objectifs	11
2.2. Définitions fondamentales	11
2.3. Produits	13
2.4. Conventions de notation	13
2.5. Résumé	14
3. Concept de réalisation	15
3.1. Calcul des cotes géopotentielles	15
3.1.1. Données de base et réseaux	15
3.1.2. Procédure de calcul	16
3.1.3. Définition du datum	17
3.2. Calcul des altitudes normales	18
3.3. Détermination du quasi-géoïde	19
3.3.1. Mesures et données	19
3.3.2. Concept et méthode	20
3.4. Gestion des contraintes résiduelles	21
3.5. Lien avec les systèmes supérieurs	21
3.6. Mise à jour des cadres de référence	21
4. Modèle cinématique	23
4.1. Utilisation du modèle cinématique	23
4.1.1. Rattachement à des points fixes	23
4.1.2. Utilisation d'un service de positionnement par GNSS	23
4.1.3. Mesures GNSS post-traitées	23
4.1.4. Utilisation d'un service PPP	23
4.2. Réalisation du modèle cinématique	23
4.2.1. Estimation des déplacements verticaux des points fixes	24
4.2.2. Méthode d'interpolation	26
5. Modèles de géodonnées	27
5.1. Définition du nouveau système de référence en INTERLIS 2	28



5.2.	Adaptations du module de base de la Confédération	29
5.3.	Recommandations pour la prise en compte de la cinématique	29
5.4.	Recommandations pour le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV	30
6.	Concept de transformation des géodonnées existantes	31
6.1.	Algorithme de transformation	31
6.2.	Transformation résiduelle	32
6.2.1.	Algorithme d'interpolation	33
6.3.	Mise en œuvre	33
6.3.1.	« Proofs of Concept » avec les cantons	33
7.	Conclusions et recommandations	35
	Bibliographie	37
	Liste des figures	39
	Liste des tableaux	41
	Glossaire	43



1. Introduction

Avec l'amélioration constante de la précision de la détermination altimétrique par RTK, cette technique de mesure entre en ligne de compte pour un nombre croissant d'applications. Comparée à la détermination altimétrique classique au moyen de nivellements géométriques ou trigonométriques, la détermination de l'altitude par RTK est beaucoup plus simple, rapide et efficace.

Pour bénéficier de ces avantages, la définition pérenne d'un nouveau système de référence altimétrique nommé CHVRS¹ est nécessaire pour l'ensemble du pays. Le système doit être compatible avec les systèmes internationaux et adapté à la détermination altimétrique par GNSS.

Dans le cadre du projet « swiss height system »², un premier rapport technique a examiné différents systèmes altimétriques nationaux, européens et internationaux ainsi que l'état de la science. Le présent deuxième rapport est une ébauche de définition de l'éventuel futur système altimétrique.

Ce rapport sert, d'une part, de base de travail pour les études ultérieures et, d'autre part, de base pour une décision fondée sur la suite des opérations. Il appartient à la direction de swisstopo de donner son aval à la poursuite des études. L'introduction formelle d'un nouveau système altimétrique requiert une décision du Conseil fédéral, sur proposition de swisstopo.

Dans la proposition actuelle, le nouveau système altimétrique est basé sur des cotes géopotentielles et sur des altitudes normales. De plus, dans le but d'assurer la pérennité la plus longue possible du cadre de référence altimétrique, un modèle cinématique est défini, permettant de tenir compte des déformations verticales présentes en Suisse.

Le présent rapport contient la terminologie, les principales définitions du nouveau système altimétrique suisse et de son modèle cinématique, son concept de réalisation, une proposition de modélisation en INTERLIS³ et le concept de transformation des géodonnées altimétriques existantes vers le nouveau système.

1.1. Champ d'application

Conformément à l'article 5 de la loi sur la géoinformation [RS 510.62], le Conseil fédéral édicte des prescriptions relatives aux systèmes et cadres de référence géodésiques pour les géodonnées de base relevant du droit fédéral. Les géodonnées de base relevant du droit fédéral sont listées dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la géoinformation [RS 510.620]. Les photos aériennes, les cartes nationales ou la mensuration officielle sont des exemples de géodonnées de base relevant du droit fédéral. Pour les autres géodonnées, la Confédération ne peut pas édicter de prescriptions relatives au système et au cadre de référence. En raison de la large diffusion des géodonnées de base relevant du droit fédéral, l'introduction d'un nouveau système de référence et d'un nouveau cadre de référence implique de facto une introduction à l'échelle nationale pour la quasi-totalité des géodonnées.

¹ *Swiss Vertical Reference System*

² <https://swiss-height-system.heig-vd.ch/>

³ Langage de modélisation des géodonnées utilisé en Suisse.



1.2. Terminologie

Ce sous-chapitre a pour objectif d'introduire les principaux termes en rapport avec le nouveau système altimétrique. La terminologie est basée sur les sources et les normes suivantes :

- Terminologie de l'administration fédérale⁴
- Usages scientifiques
- ISO 19111:2019
- Usages internes à swisstopo

1.2.1. Système altimétrique

Un système altimétrique est la définition théorique d'un cadre de référence altimétrique. Le système altimétrique comprend ainsi toutes les conventions nécessaires pour déterminer une altitude. Selon la terminologie de l'administration fédérale, *système altimétrique* et *système de référence altimétrique* sont synonymes. Dans la norme ISO 19111:2019, c'est le terme de *système de référence vertical* qui est utilisé.

Le nouveau système altimétrique porte le nom de *Swiss Vertical Reference System (CHVRS)*.

1.2.2. Cadre de référence altimétrique

Un cadre de référence altimétrique comprend tous les résultats et produits nécessaires pour déterminer des altitudes. Il s'agit donc de la mise en œuvre ou de la réalisation d'un système altimétrique. Dans la norme ISO 19111:2019, le terme correspondant est *repère de référence vertical*.

Un cadre de référence du CHVRS porte le nom de *Swiss Vertical Reference Frame xxxx (CHVRFxxxx)*, où xxxx représente l'année de détermination ou de réalisation.

1.2.3. Modèle cinématique

Un modèle cinématique attribue une vitesse à chaque point de la surface dans la zone considérée. Dans le contexte de la détermination altimétrique, il s'agit de vitesses verticales. Idéalement, le modèle cinématique est une représentation des processus tectoniques lents. Le modèle cinématique n'est pas basé sur un modèle de forces, c'est pourquoi le terme *cinématique* est utilisé et non le terme *dynamique* selon ISO 19111:2019. Dans le contexte scientifique, le terme *déformations intra-cadre* est également utilisé. Le modèle cinématique permet de transformer des coordonnées d'une époque à une autre. Dans ISO 19111:2019, cette opération est appelée *opération liée au mouvement du point*.

1.2.4. Époque

L'époque d'une coordonnée ou d'une altitude est le moment auquel la coordonnée ou l'altitude se rapporte. L'époque est exprimée en années avec un ou deux chiffres après la virgule et, selon ISO 19111:2019, dans le calendrier grégorien.

L'époque de référence du cadre de référence altimétrique est l'époque à laquelle se réfèrent les altitudes et les produits du cadre en question.

1.2.5. Altitude officielle

L'altitude officielle désigne une coordonnée verticale dans le système et le cadre de référence conformément à l'ordonnance sur la géoinformation et à l'époque de référence du cadre de référence.

⁴ <https://www.termdat.bk.admin.ch/>



1.2.6. Modèle de quasi-géoïde

Un modèle de quasi-géoïde est la surface de référence pour la détermination des altitudes normales. Le modèle de quasi-géoïde associé à CHVRFxxxx s'appelle *CH-QGeo-xxxx* et se compose d'une partie statique *CH-QGeo-Static-xxxx* et d'une partie cinématique *CH-QGeo-Kinematic-xxxx*.

1.2.7. Modèle de pesanteur

Le modèle de pesanteur à la surface associé à CHVRFxxxx s'appelle *CH-SGrav-xxxx* et se compose d'une partie statique *CH-SGrav-Static-xxxx* et d'une partie cinématique *CH-SGrav-Kinematic-xxxx*.

1.2.8. Modèle des déviations de la verticale

Le modèle des déviations de la verticale à la surface associé à CHVRFxxxx s'appelle *CH-SDeflec-xxxx* et se compose d'une partie statique *CH-SDeflec-Static-xxxx* et d'une partie cinématique *CH-SDeflec-Kinematic-xxxx*.





2. Définition du nouveau système

2.1. Principes et objectifs

La définition du nouveau système altimétrique est guidée par les principes et les objectifs suivants.

- **Compatibilité internationale** : le nouveau système altimétrique est compatible avec les conventions et les standards européens et internationaux ; pour des raisons de faisabilité ou de spécificités suisses, on pourra déroger à cette règle.
- **Compatibilité avec la géodésie spatiale** : à l'ère de la géodésie spatiale, le nouveau système altimétrique suisse sera compatible avec les techniques de géodésie spatiale, en particulier avec le GNSS.
- **Introduction généralisée** : le nouveau système altimétrique suisse est introduit comme nouveau système officiel ; ainsi, il répond aux exigences de la mensuration nationale, de la mensuration officielle, de la géoinformation et aux exigences des autres utilisateurs.
- **Pérennité** : le nouveau système altimétrique n'a, a priori, pas de fin de vie nominale et donc une durée de vie potentiellement illimitée, au minimum de quelques décennies.

2.2. Définitions fondamentales

Définition 1 – Le nouveau système altimétrique est basé sur des cotes géopotentielle (C), à partir desquelles des altitudes normales et des altitudes orthométriques sont calculées.

La majorité des pays qui utilisent des systèmes altimétriques basés sur des altitudes physiques utilisent des altitudes normales ou orthométriques. Pour les géodonnées relevant du droit fédéral, un type d'altitude doit être défini. Pour de nombreuses applications scientifiques et techniques, il faut en outre connaître les différences entre types d'altitudes, notamment entre les altitudes normales et les altitudes orthométriques.

L'Office fédéral de topographie swisstopo devra donc être en mesure de produire les deux types d'altitudes : les altitudes normales et les altitudes orthométriques.

La cote géopotentielle C_P d'un point P est la différence entre le potentiel de la surface de référence W_0 et le potentiel de pesanteur terrestre W_P en ce point, soit $C_P = W_0 - W_P$.

Cette définition correspond à la définition du système de référence altimétrique international (cf. résolution n° 1 2015 de l'Association Internationale de Géodésie).

Définition 2 – Le potentiel de référence W_0 fait partie du cadre de référence et est donc déterminé lors de la réalisation du nouveau système altimétrique. Il est calculé en imposant une condition « no net translation » sur une sélection de points stables en Suisse et peut être pourvu d'un offset.

La condition « no net translation » signifie qu'il n'y a pas de translation du réseau de points de référence. La somme des différences entre les cotes géopotentielle (ou altitudes) des points dans RAN95 (ou un autre système comme EVRS) et celles dans le nouveau système altimétrique est donc nulle. Il est préférable d'utiliser des points stables pour le calage. La valeur ainsi obtenue peut en outre être pourvu d'un offset afin de tenir compte, par exemple, de particularités nationales.



Définition 3 – Les altitudes officielles sont de type normal.

Pour calculer des altitudes normales à partir de cotes géopotentielles, il n'est pas nécessaire d'émettre une hypothèse sur la répartition de la masse de la Terre. Les altitudes orthométriques dépendent de la pesanteur moyenne le long de la ligne d'aplomb. Des modèles de densité de la croûte terrestre sont donc nécessaires pour calculer les altitudes orthométriques. En supposant que ces modèles s'améliorent progressivement à l'avenir, la précision des altitudes orthométriques peut également être améliorée progressivement. Les altitudes normales ne sont en revanche pas influencées par ces améliorations.

En termes de propagation d'erreurs et de pérennité, il est plus avantageux de définir un système d'altitudes normales.

Définition 4 – Le champ de pesanteur normal est défini par le modèle officiel de l'Association Internationale de Géodésie (AIG). Il s'agit actuellement du GRS80.

Les altitudes normales sont dépendantes de l'ellipsoïde de référence et de son champ de pesanteur normal.

Conformément à la résolution n° 1 1979 de l'AIG, le GRS80 est utilisé.

Il est à noter que l'ellipsoïde de référence pour la planimétrie est l'ellipsoïde de Bessel (défini dans le système CH1903+). Il n'est pas envisageable d'utiliser deux ellipsoïdes différents dans la pratique. Les altitudes normales peuvent être calculées à partir d'altitudes ellipsoïdales à l'aide d'un modèle de quasi-géoïde, par analogie au calcul d'altitudes orthométriques à l'aide d'un modèle de géoïde. Dans la pratique, il n'est donc pas nécessaire de disposer explicitement du champ de pesanteur normal et de l'ellipsoïde sur lequel il repose. Il suffit de mettre à disposition le quasi-géoïde sous forme d'anomalies d'altitude (de manière analogue aux cotes du géoïde). Cela se fera dans le système de référence CH1903+ et par rapport à l'ellipsoïde de Bessel.

Définition 5 – Les altitudes, les cotes géopotentielles et les mesures sont réduites dans le système de marées « mean-tide », à moins qu'elles ne soient déjà dans ce système. Le modèle du champ de pesanteur est dans le système « zero-tide ».

Le système des marées définit la manière dont les forces d'attraction du soleil, de la lune et des autres planètes sont prises en compte dans les réductions des mesures et dans les résultats. Il existe trois approches :

- *Tide-free (ou non-tidal) – dans une quantité dite « tide-free », toutes les influences des marées sont éliminées par calcul, comme si la lune, le soleil et les autres planètes n'existaient pas. Ce système ne peut jamais être observé dans la réalité.*
- *Mean-tide – une quantité « mean-tide » est réduite des effets périodiques, mais contient l'effet permanent du soleil et de la lune. Pour la croûte terrestre, il s'agit de la croûte moyenne. « Mean-Tide » décrit bien les mouvements des eaux et la marche des horloges. Ce système pose toutefois des problèmes pour la détermination du géoïde, car les effets des masses à l'extérieur du corps terrestre sont encore inclus.*
- *Zero-tide – une quantité dite « zero-tide » ne contient que les effets indirects dus à la déformation de la Terre par les marées, tandis que tous les effets directs (attraction directe du soleil, de la lune et des autres planètes) ont été supprimés. Cette solution intermédiaire résout les problèmes liés à la détermination du géoïde.*

Conformément à la résolution AIG n° 16 de 1983, le système de marée « mean-tide » est utilisé pour les coordonnées et le système de marée « zero-tide » pour le champ de potentiel.

Dans la pratique, le système des marées peut généralement être négligé.



Définition 6 – Le système de référence géométrique pour le nouveau système altimétrique est CHTRS. Le potentiel W_P d'un point est une fonction de ses coordonnées \mathbf{X}_P .

Ainsi, $W_P = W(\mathbf{X}_P)$ où \mathbf{X}_P est exprimé en CHTRS. CHTRS est un système de référence terrestre géocentrique compatible avec ETRS89 et attaché à la croûte terrestre en Suisse.

Définition 7 – Le nouveau système altimétrique est cinématique.

Les déplacements verticaux relatifs sur les points localement stables atteignent des valeurs d'environ 1 à 2 mm par année en Suisse. Afin de garantir la pérennité des cadres de référence, le système altimétrique comporte une composante cinématique. L'altitude varie dans le temps. Le modèle cinématique permet de transformer une altitude d'une époque à une autre époque.

2.3. Produits

Définition 8 – Le cadre de référence comporte les produits suivants :

- les altitudes officielles des points du réseau altimétrique, avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle de quasi-géoïde avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle de la pesanteur à la surface avec une partie statique et une partie cinématique ;
- un modèle des déviations de la verticale à la surface, avec une partie statique et une partie cinématique.

Les parties cinématiques peuvent être de valeur nulle.

Définition 9 – Ces produits sont consistants entre eux, c'est-à-dire qu'ils sont issus du même cadre de référence et du même modèle de champ de pesanteur.

Définition 10 – Les produits sont fournis dans le système et le cadre de référence officiel suisse ainsi que dans le système européen (ETRS89).

2.4. Conventions de notation

Définition 11 – À partir de l'introduction du nouveau système altimétrique, toute altitude CHVRFxxxx devra obligatoirement être accompagnée de la mention du cadre CHVRFxxxx. Par exemple :

1239.943 m CHVRF2030

Cette mention peut apparaître soit directement à côté de l'altitude ou de manière générale, par exemple dans le cartouche d'un plan, en marge d'une carte ou sous forme d'attribut dans les métadonnées d'un jeu de données.

Définition 12 – Si l'altitude se réfère à une autre époque que l'époque de référence du cadre, l'indication de l'époque est obligatoire. Dans les autres cas, l'indication de l'époque est recommandée. La convention de notation est la suivante :

1239.943 m CHVRF2030 2030.0



2.5. Résumé

Le tableau suivant résume les principales définitions du nouveau système altimétrique décrites dans le présent document.

Tableau 2-1 : Résumé des définitions du nouveau système altimétrique CHVRS.

	CHVRS	Référence dans le document
Origine/référence	W_0 déterminé lors de la réalisation	Définition 2
Type d'altitude	Altitude normale	Définition 3
Champ de pesanteur normal	GRS80	Définition 4
Système des marées	Mean-tide	Définition 5
	CHVRFxxxx	Référence dans le document
Réalisation de l'origine	« no net translation » sur plusieurs points de référence	Définition 2
Cinématique	Modèle cinématique	Définition 7



3. Concept de réalisation

Ce chapitre décrit le concept de réalisation du système altimétrique CHVRS tel qu'il est défini dans le chapitre précédent. La réalisation comporte deux aspects principaux : l'obtention de cotes géopotentielles (y compris leurs variations dans le temps) pour les points fixes altimétriques ainsi que la détermination du géoïde.

3.1. Calcul des cotes géopotentielles

Le calcul des cotes géopotentielles pour le nouveau système altimétrique se fonde en grande partie sur les méthodes et les logiciels qui ont été développés pour la réalisation de RAN95. Ce dernier a de nombreuses caractéristiques en commun avec le nouveau système altimétrique. Les méthodes et les procédés de calcul ont fait leurs preuves et les logiciels sont disponibles, ce qui est un immense avantage. En effet, le travail de développement fastidieux et marqué d'incertitudes se verra ainsi fortement réduit. La description détaillée des méthodes et des procédés de calculs est disponible dans les paragraphes suivants et dans les publications en référence.

3.1.1. Données de base et réseaux

De manière générale, on utilise les **mesures de nivellement** du réseau altimétrique national (RAN) pour réaliser le nouveau système altimétrique. Comme pour la réalisation de RAN95, les données sont complétées par quelques lignes cantonales qui sont mesurées avec les mêmes exigences de qualité que les lignes du RAN. Depuis le calcul de RAN95, le jeu de données a été régulièrement complété et contient les dernières mesures du RAN.

Des **mesures gravimétriques** seront utilisées pour calculer les différences de potentiel. Ici aussi, des jeux de données existent déjà. Dans ce contexte, deux sources de données sont pertinentes :

1. La première source de données concerne les mesures gravimétriques le long des lignes de nivellement fédéral. Ces mesures sont prises régulièrement depuis 1974. Pour ce faire, on a utilisé un gravimètre LaCoste&Romberg jusqu'à la fin 2007. Depuis, les mesures sont prises avec un Scintrex CG-5 ou CG-6. Cependant, il existe aussi des mesures encore plus anciennes, qui ont été recueillies sous la direction de la Commission géodésique suisse entre 1953 et 1957. On utilisait alors des gravimètres Worden.
2. La deuxième source est le jeu de données du relevé gravimétrique national de la Commission géophysique suisse. Ce jeu de données comprend environ 30'000 mesures. Il permet l'interpolation de la pesanteur en tout point de la surface.

Ces deux jeux de données ont également été régulièrement complétés depuis la réalisation de RAN95 et comprennent les mesures les plus récentes qui seront donc aussi utilisées pour la réalisation du nouveau système altimétrique.



3.1.2. Procédure de calcul

Le procédé pour le calcul de cotes géopotentielles sur les points principaux de RAN95 se trouve dans Schlatter (2007). Voici un résumé des étapes de calculs :

1. Les différences d'altitude observées sont intégrées numériquement à l'aide des mesures gravimétriques afin de calculer les différences de potentiel. Cela se fait par fascicules. Un fascicule représente une campagne de nivellement.
2. Les mesures sont réduites aux points principaux. Les points principaux sont les nœuds (liaisons entre les fascicules ainsi que les nœuds entre les boucles). En font également partie d'autres points sélectionnés manuellement qui sont considérés comme particulièrement stables. Tous les points intermédiaires supplémentaires sont supprimés.
3. Le calcul des erreurs de fermeture des boucles sert au contrôle de qualité (vérification du calcul correct et complet).
4. La compensation cinématique se trouve au cœur du processus de calcul. Les résultats de cette étape de calcul sont les cotes géopotentielles compensées ainsi que leurs vitesses.

En principe, le même processus et la même solution logicielle seront utilisés pour le calcul des cotes géopotentielles dans le nouveau système altimétrique.

L'intégration numérique se fait par tronçon d'après la formule suivante :

$$\Delta C = \sum_i g_i \delta n_i \quad (3.1)$$

ΔC est la différence de potentiel de la section, δn_i la différence d'altitude nivelée et g_i la pesanteur interpolée pour cette différence d'altitude. La réduction aux points principaux est également maintenue. Il n'est cependant pas nécessaire de sélectionner les mêmes points principaux que pour le calcul de RAN95. On peut de nouveau choisir les points principaux pour le calcul du nouveau système altimétrique et tenir compte des mesures les plus récentes, mais de grandes adaptations ne devraient pas être nécessaires et ne sont pas souhaitables. La compensation cinématique, qui constitue le cœur du calcul, est effectuée selon le modèle suivant :

$$\Delta C_{i,j}^k + \epsilon_{i,j}^k = C_j^0 - C_i^0 + \Delta t (\dot{C}_j - \dot{C}_i) \quad (3.2)$$

$\Delta C_{i,j}^k$ représente la différence de potentiel entre les points i et j par rapport à l'époque de mesure d'indice k , C_j^0 et C_i^0 sont les cotes géopotentielles des points i et j par rapport à l'époque de référence t_0 , Δt est la différence de temps entre l'époque de mesure et l'époque de référence ($\Delta t = t_k - t_0$), \dot{C}_i et \dot{C}_j sont les dérivées temporelles des cotes géopotentielles.

Le modèle cinématique utilisé pour le calcul des cotes géopotentielles n'est pas identique au modèle cinématique du cadre de référence. Dans le premier, seuls les points fixes altimétriques ont une vitesse verticale. L'époque de référence du calcul des cotes géopotentielles n'est pas nécessairement identique à l'époque de référence du cadre de référence et, dans le calcul des cotes géopotentielles, il n'y a pas de conditions de cohérence avec les modèles précédents.



3.1.3. Définition du datum

Les deux cadres de référence altimétrique CHVRFyy⁵ et RAN95⁶ développés dans le cadre de la nouvelle mensuration nationale de 1995 sont définis de la manière suivante :

Tableau 3-1 : Définition des deux cadres de référence altimétrique de la nouvelle mensuration de 1995, CHVRFyy et RAN95.

Systeme de référence planimétrique	CHTRS95	CH1903+
Type d'altitude	Cotes géopotentielle	Altitudes orthométriques
Point de départ	Point fondamental Z ₀ à Zimmerwald	Point fondamental Z ₀ à Zimmerwald
Altitude de départ	C ₀ = 880.3459 gpu ⁷	H ₀ = 897.9063 m
Rattachement altimétrique		
Origine	Solution UELN 1973/1986	Choisie de telle sorte que H _{RPN} = 373.600 m
Cadre de référence altimétrique correspondant	CHVRFyy	RAN95
Référence cinématique		
$\dot{C} = 0$ sur le point suivant	Aarburg	Aarburg

Le nouveau système altimétrique sera défini différemment :

- D'une part, la dualité des systèmes devient caduque ; à l'avenir, il n'y aura plus qu'un seul système altimétrique suisse. Si nécessaire, des paramètres de transformation vers d'autres systèmes altimétriques seront calculés et publiés.
- D'autre part, le système n'est plus rattaché à un seul point, mais à une sélection de points avec une condition « no net translation ». Celle-ci s'applique de préférence aux altitudes et non aux cotes géopotentielle, car la stabilité altimétrique est l'aspect pertinent. Le choix des points se fait pendant la phase de réalisation, avec un accent sur la stabilité à long terme des points. Grâce à cette adaptation, la réalisation du système altimétrique ne dépend plus d'un seul point fixe altimétrique et gagne à la fois en flexibilité et en robustesse.
- Lors de la première réalisation, le système altimétrique est rattaché au EVRS au moyen d'une sélection de points adaptés. Lors des réalisations suivantes, il est rattaché au dernier cadre de référence altimétrique réalisé.

Voici la formule de la condition « no net translation » :

$$0 = \sum_i (H_i^* - H_i^{ref}) p_i \quad (3.3)$$

⁵ À ne pas confondre avec CHVRFxxxx, un cadre du nouveau système altimétrique CHVRS.

⁶ Dans ce rapport, RAN95 est parfois décrit comme système altimétrique, ce qui est en réalité faux. Deux systèmes altimétriques ont été intégrés dans le contexte de la nouvelle mensuration de 1995, un global et un local. Cependant, aucun nom n'a été attribué aux systèmes. Les cadres de référence altimétrique correspondants ont été appelés CHVRFyy et RAN95.

⁷ L'unité de la cote géopotentielle est identique à celle d'un potentiel. Néanmoins, en géodésie, la cote géopotentielle est également dans une unité spéciale, en *unité géopotentielle* [gpu], de l'anglais *geopotential unit*, qui est définie de la façon suivante : 1 [gpu] = 10 [m² · s⁻²]



H_i^* est l'altitude normale du i -ème point fixe altimétrique, qui est intégrée dans la définition du datum, et H_i^{ref} est l'altitude de référence du même point pour le rattachement. p_i est un poids optionnel (de 1 par défaut). L'altitude de référence peut, mais ne doit pas impérativement être une altitude normale.

3.2. Calcul des altitudes normales

Le calcul de l'altitude normale se fait à partir des cotes géopotentielle compensées de la façon suivante :

$$H^*(x_P) = \frac{C(x_P)}{\bar{\gamma}} \quad (3.4)$$

$H^*(x_P)$ et $C(x_P)$ sont les altitudes normales et les cotes géopotentielle du point P ayant les coordonnées x_P , et $\bar{\gamma}$ représente la pesanteur normale moyenne (GRS80) le long de l'aplomb normal.

A titre d'exemple numérique, les données suivantes sont utilisées : $C(x_P) = 1037.6342$ gpu
 $\varphi = 46.929883^\circ$

Le calcul de l'altitude normale se fait selon les étapes suivantes :

1. Calcul de la pesanteur normale γ_0 sur l'ellipsoïde (Moritz, 1980) :

$$\gamma_0 = \gamma_E \cdot \frac{1 + k \cdot \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (3.5)$$

9.807944908 m · s⁻²

Avec γ_E : pesanteur normale à l'équateur ; e^2 : première excentricité numérique au carré ; k : formule de pesanteur constante.

$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1 \quad (3.6)$$

Où γ_P est la pesanteur normale au pôle.

2. Calcul de la pesanteur normale moyenne $\bar{\gamma}$ (Heiskanen & Moritz, 1967) :

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 \left[1 - (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{H^*}{a} + \frac{H^{*2}}{a^2} \right] \quad (3.7)$$

Ici, φ représente la latitude ellipsoïdale dans un système de référence global ; a est le demi-grand axe de l'ellipsoïde ; f est l'aplatissement et m représente le rapport entre la force gravitationnelle et centrifuge à l'équateur.

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} \quad (3.8)$$

Avec ω : vitesse de rotation de la Terre ; b : demi-petit axe de l'ellipsoïde ; GM : constante gravitationnelle géocentrique.



La pesanteur normale moyenne peut ensuite être calculée de façon itérative. Pour la première itération, la valeur de γ_0 est utilisé comme approximation de $\bar{\gamma}$.

Itération 0 :	$\bar{\gamma} = \gamma_0 = 9.807944908$	$H^* = 1057.95272$
Itération 1 :	$\bar{\gamma} = 9.806313071$	$H^* = 1058.12877$
Itération 2 :	$\bar{\gamma} = 9.806312800$	$H^* = 1058.12880$
Itération 3 :	$\bar{\gamma} = 9.806312800$	$H^* = 1058.12880$

Les constantes GRS80 et les grandeurs dérivées suivantes sont à utiliser :

$$a = 6378137.0000 \text{ m}$$

$$b = 6356752.3141 \text{ m}$$

$$f = \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.257222101} = 0.00335281068118$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0.00669438002290$$

$$\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$GM = 398600.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\gamma_E = 9.7803267715 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\gamma_P = 9.8321863685 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} = 0.00344978600308$$

$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1 = 0.001931851353$$

3.3. Détermination du quasi-géoïde

Conformément au choix des altitudes normales, le quasi-géoïde correspond à la surface de référence pour déterminer l'altitude. Le quasi-géoïde peut être déterminé directement ou par l'intermédiaire du géoïde, en ajoutant la différence entre le géoïde et le quasi-géoïde. L'approche actuelle consiste à passer par le modèle du géoïde.

3.3.1. Mesures et données

Les observables du champ de pesanteur sont la déviation de la verticale, la pesanteur, la différence de potentiel (résultant du nivellement et de la pesanteur), ainsi que les anomalies d'altitude (généralement sous forme de points de GNSS-nivellement). Il existe en Suisse et dans les pays limitrophes suffisamment de mesures pour une bonne détermination du géoïde, mais il serait souhaitable d'avoir quelques nouvelles mesures. Il faudrait en particulier remplacer certaines anciennes mesures de déviation de la verticale pour ainsi éliminer d'éventuelles erreurs systématiques. De plus, il faudrait si possible déterminer quelques nouveaux points de GNSS-nivellement. Ces points se trouvent jusqu'à présent presque exclusivement le long des lignes du nivellement fédéral. Pour une meilleure répartition spatiale, il faudrait traiter les lignes de nivellement cantonales à partir des données brutes.

Des campagnes ciblées visant à combler les lacunes dans les jeux de données gravimétriques ne sont pas envisagées, car elles demandent de grands efforts. Ces lacunes en matière de données existent bien entendu principalement en haute montagne. Effectuer quelques mesures de déviation de la verticale constitue le meilleur moyen pour pallier de telles lacunes.



Il faut utiliser un modèle de champ de pesanteur global comme modèle de référence pour le calcul d'un géoïde local. Pour un pays comme la Suisse, l'accent doit être mis sur l'utilisation d'un modèle combiné (satellite et terrestre) à haute résolution.

Pour calculer avec précision un modèle de géoïde national, il faut utiliser au moins un modèle altimétrique numérique à haute résolution. Pour ce faire, une résolution de 10 mètres suffit, mais il serait également utile d'utiliser un modèle de 2 mètres pour la réduction de la pesanteur et la réduction des déviations de la verticale.

Il est également nécessaire d'avoir un modèle bathymétrique des plus grands lacs de Suisse. Cela permet avant tout d'améliorer la réduction des mesures directement sur les rives des lacs, mais aussi d'interpoler le modèle de géoïde au-dessus des lacs, car aucune donnée de mesure n'y est généralement disponible.

Il reste encore à déterminer dans quelle mesure d'autres modèles de densité seraient nécessaires pour un modèle de géoïde national. Il s'agirait surtout d'un modèle des glaciers (GLAMOS), de la modélisation des vallées quaternaires (GeoQuat) ou d'un modèle des densités de surface (SAPHYR).

3.3.2. Concept et méthode

Pour les transformations entre systèmes altimétriques, la séparation entre le géoïde et le quasi-géoïde doit être modélisée indépendamment du type de système altimétrique choisi. Pour cette raison, il est également possible de calculer soit un modèle de géoïde, soit un modèle de quasi-géoïde pour ensuite le transformer.

Il n'est pas encore possible de déterminer la variation temporelle du géoïde (approche cinématique) de façon statistiquement significative. Le modèle de géoïde aura donc une partie cinématique nulle pour l'instant.

Pour une réalisation optimale du système altimétrique par un modèle de géoïde, la solution qui sera fournie aux utilisateurs doit être contrainte sur les points de GNSS-nivellement (solution hybride ; Marti, 1997, p. 19). Des différences systématiques peuvent sinon apparaître en fonction de la détermination de l'altitude par GNSS (plus géoïde) ou par nivellement (corrigé par gravimétrie).

La première étape pour déterminer le géoïde consiste à enlever l'influence de la pesanteur (selon les modèles de masse connus) des observations effectuées. Il s'agit en général d'un modèle de champ de pesanteur global et de l'influence du modèle numérique de terrain (y compris la bathymétrie). On pourrait également tenir compte d'autres modèles de densité connus, mais ils sont généralement de moindre importance. Cette étape a pour objectif d'obtenir un champ résiduel relativement lisse et facile à interpoler.

Ce champ résiduel est interpolé de façon appropriée dans une deuxième étape. Pour ce faire, les observations originales (pesanteur et déviations de la verticale) sont converties en anomalies d'altitude. Dans ce contexte, il faut considérer les propriétés connues du champ de pesanteur en tant que champ de force harmonique. Pour les modèles officiels de géoïde, en Suisse, on a utilisé jusqu'à présent une approche de collocation selon les moindres carrés. D'autres méthodes sont toutefois possibles. L'inconvénient de l'approche de collocation est qu'il faut inverser une matrice avec la dimension « nombre d'observations » et que cela limite son utilisation à des zones relativement restreintes.

La troisième étape pour déterminer le géoïde consiste à rajouter les influences que l'on a précédemment enlevées des modèles de masse, mais cette fois-ci sous la forme d'anomalies d'altitude ou de cotes du géoïde. Le calcul de cette troisième étape se fait sur des points d'une grille régulière. Les utilisatrices et utilisateurs finaux recevront ensuite la grille qui a été générée.

Comme le quasi-géoïde présente un tracé plus rugueux que le géoïde, on peut déjà affirmer que la résolution de la grille du nouveau modèle de quasi-géoïde sera plus élevée que celle du modèle actuel CHGeo2004 (1 km ou 30 arcs secondes).



3.4. Gestion des contraintes résiduelles

Des contraintes résiduelles apparaissent inévitablement au moment de réaliser le système altimétrique. Les mesures de nivellement sont typiquement entachées d'erreurs systématiques à longues longueurs d'onde et les mesures GNSS d'erreurs stochastiques à courtes longueurs d'onde.

Dans le cadre de la réalisation, il faut déterminer s'il est possible de procéder à une répartition spectrale exacte des contraintes résiduelles afin d'attribuer les différentes parts à la source correspondante. Lors de la réalisation de RAN95, cette démarche n'a pas été possible, raison pour laquelle les contraintes résiduelles ont été intégrées dans le géoïde (par la contrainte du géoïde sur les mesures de GNSS-nivellement).

3.5. Lien avec les systèmes supérieurs

La définition rigoureuse du système altimétrique est un des prérequis pour une bonne compatibilité avec les systèmes supérieurs. Le passage des cadres des systèmes supérieurs comme EVRS et IHRS aux cadres du système suisse sera assuré par des transformations. Dans l'idéal, ces transformations devraient consister uniquement en un ΔW_0 (ou ΔH). Cependant, il est probable que des inconsistances rendent nécessaire une transformation plus complexe, par exemple une surface de transformation qui peut être interpolée ou un modèle de géoïde, compatible avec le système supérieur.

Ainsi :

$$H_{\gamma VRF} = \frac{H_{CHVRF}^* \bar{\gamma} + \Delta W_0}{g_0} \quad (3.9)$$

$H_{\gamma VRF}$ est une altitude dans le système d'altitude cible, H_{CHVRF}^* est une altitude dans le CHVRS, $\bar{\gamma}$ est la pesanteur normale moyenne le long de la normale à l'ellipsoïde et g_0 est l'accélération correspondant au type d'altitude du système d'altitude cible.

À la publication d'un nouveau cadre de référence supérieur et en cas de besoin avéré, swisstopo fournira aux utilisatrices et utilisateurs une transformation appropriée de ce cadre vers le cadre suisse en vigueur.

3.6. Mise à jour des cadres de référence

Le système altimétrique est défini afin que les cadres de référence aient une durée de vie maximale. L'expérience du passage de MN03 à MN95 a montré que tout changement de cadre de référence est lié à d'importants coûts, rendant le rapport coût/bénéfice défavorable pour tout changement, à moins d'apporter d'importants avantages. Le cadre altimétrique en vigueur actuellement est NF02 et date de 1902. Il a donc plus de 120 ans. Il est possible que le nouveau cadre altimétrique ait une durée de vie similaire.

Dans tous les cas, la consistance entre les produits sera maintenue, afin de ne pas contrevenir à la définition. De plus, le choix de réaliser ou non un nouveau cadre incombera dans tous les cas à swisstopo. Aucun automatisme n'est prévu. Voici quelques exemples de situations qui pourraient conduire à la réalisation d'un nouveau cadre de référence :

- dégradation inacceptable du cadre en vigueur ;
- nouveaux besoins internes ou externes à swisstopo ;
- introduction de nouvelles technologies ;
- mandat légal.





4. Modèle cinématique

4.1. Utilisation du modèle cinématique

L'utilisation du modèle cinématique se distingue en fonction du cas d'utilisation. Les sections suivantes détaillent les différents cas.

4.1.1. Rattachement à des points fixes

À proximité des lignes de nivellement, les utilisatrices et utilisateurs auront accès au cadre de référence altimétrique à travers les points fixes. Pour des cheminements raisonnablement courts, c'est-à-dire moins de quelques kilomètres, le modèle cinématique peut être négligé, les utilisatrices et utilisateurs travailleront uniquement avec des coordonnées à l'époque de référence. L'époque de mesure n'a donc pas besoin d'être considérée.

4.1.2. Utilisation d'un service de positionnement par GNSS

Les services de positionnement par GNSS (comme par exemple swipos) mettrons à disposition plusieurs points de montages⁸, laissant aux utilisatrices et utilisateurs le choix de l'époque à laquelle se réfère la coordonnée. Le cas standard sera l'utilisation de coordonnées de l'époque de référence du cadre. Le modèle cinématique sera donc appliqué par le service de positionnement. Les utilisatrices et utilisateurs n'ont pas à se préoccuper du modèle cinématique.

4.1.3. Mesures GNSS post-traitées

Afin de garantir un traitement rigoureux, le post-traitement de mesures GNSS devra être accompli à l'époque des mesures. Les utilisatrices et utilisateurs doivent récupérer les données de la station AGNES à l'époque de mesure. Ensuite, les résultats devront être transformés à l'époque de référence du cadre. Cette transformation se fera à l'aide d'un service web. En entrée, le service web demandera les informations suivantes :

- coordonnée est et nord (MN95) et altitude du point ;
- époque de l'altitude avant transformation ;
- époque souhaitée après la transformation (valeur par défaut : époque de référence du cadre).

Le service renvoie l'altitude à l'époque souhaitée, par exemple à l'époque de référence du cadre.

4.1.4. Utilisation d'un service PPP

Les utilisatrices et utilisateurs de services PPP (ou autres services globaux) obtiendront a priori des coordonnées géocentriques dans un système global ou continental, par exemple ITRS ou ETRS. Les coordonnées devront donc d'abord être transformées dans le cadre de référence terrestre suisse (à l'aide d'un service web du type de REFRAME), avant d'être transformées à la bonne époque, comme dans le cas des mesures GNSS post-traitées.

4.2. Réalisation du modèle cinématique

Le modèle cinématique aura les propriétés suivantes :

⁸ Adresse virtuelle d'un service de positionnement, permettant la transmission de différents types de messages et données GNSS (en anglais : « MountPoints »).



- Bonne représentation des mouvements verticaux de la croûte terrestre, sans les effets locaux. Par « effets locaux », on entend les phénomènes qui se limitent à une pente, respectivement une zone de glissement ou une zone d'affaissement. Les zones d'affaissement connues, comme par exemple la plaine de la Linth (Cantons de Glaris, Saint-Gall, Schwytz) ou la région du Locle (Canton de Neuchâtel), et dues à des phénomènes non tectoniques sont également à exclure du modèle.
- Le modèle cinématique renvoie pour chaque point situé en Suisse le déplacement vertical que ce point a subi entre t_1 et t_2 , soit :

$$\Delta h = f(E, N, t_1, t_2) \tag{4.1}$$

$$h(t = t_2) = h(t = t_1) + \Delta h \tag{4.2}$$

- Normalement, le modèle est continu au sens mathématique, tant dans la dimension spatiale que temporelle, c'est-à-dire qu'il ne présente pas de sauts. Il peut être dérogé à cette règle si les altitudes subissent un changement discontinu, par exemple suite à un séisme.
- La première dérivée n'est pas obligatoirement continue.
- Le modèle cinématique représentera, en tout temps, la meilleure approximation connue du champ de vitesse de la croûte terrestre en Suisse. Le modèle pourra être actualisé sans besoin d'assurer la consistance avec les modèles précédemment publiés. Il n'est donc pas possible de garantir que les altitudes puissent être transformées à volonté entre les époques sans risquer une perte de cohérence. Si le modèle cinématique a été modifié entre-temps, la cohérence peut être perdue.
- Si cette contrainte est inacceptable pour un cas d'utilisation spécifique, les altitudes en question sont à conserver à l'époque de mesure. En effet, il se peut qu'une application requière des transformations entre plusieurs époques qui soient consistantes.

4.2.1. Estimation des déplacements verticaux des points fixes

Les déplacements verticaux relatifs d'une sélection de points de nivellement avaient déjà été calculés dans le cadre de la réalisation de RAN95. Ces déplacements verticaux ont pu être estimés par des mesures répétées. Pour une grande partie du réseau de nivellement, deux mesures répétées complètes sont déjà disponibles. La Figure 4-1 présente l'état des mesures répétées et la Figure 4-2 les déplacements verticaux. Le modèle cinématique du nouveau système altimétrique sera principalement basé sur cette méthodologie, car il fournit, à ce jour, les résultats les plus précis et les plus robustes. Une autre source d'information importante sur les déplacements verticaux sont les stations permanentes GNSS du réseau AGNES.

Au besoin et en fonction de l'évolution technologique future, d'autres méthodes pourront venir compléter ces mesures, notamment les mesures GNSS et l'interférométrie radar (InSAR).

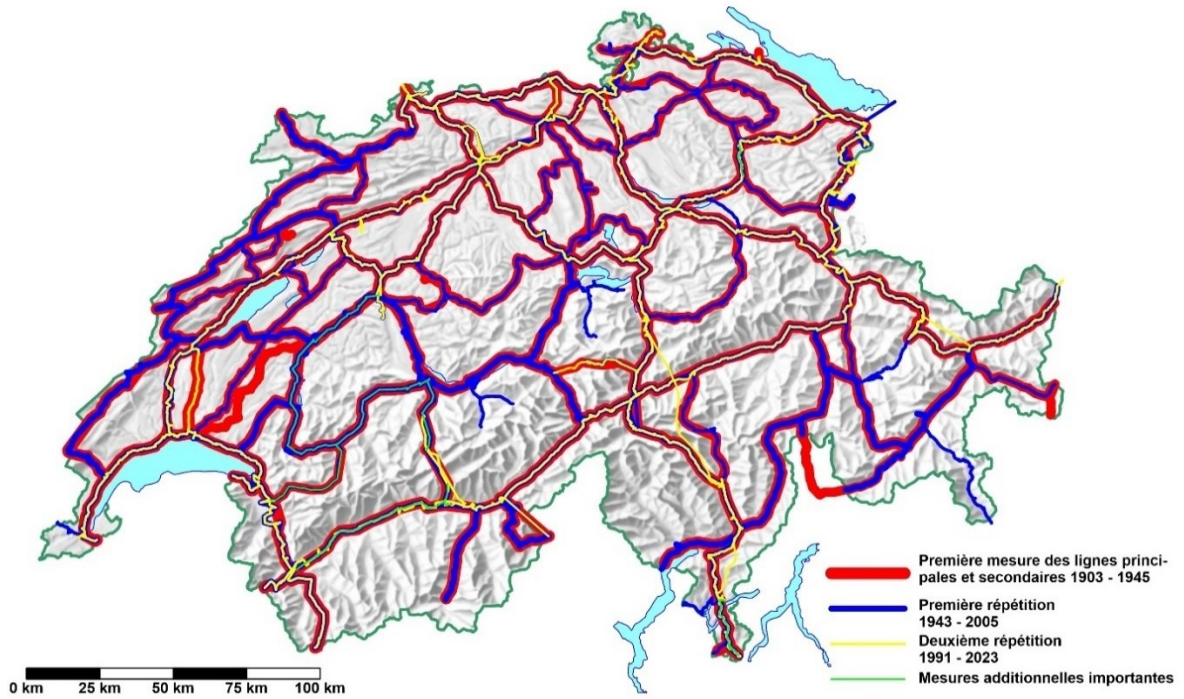


Figure 4-1 : Statuts des mesures répétées de nivellement 1902 - 2023

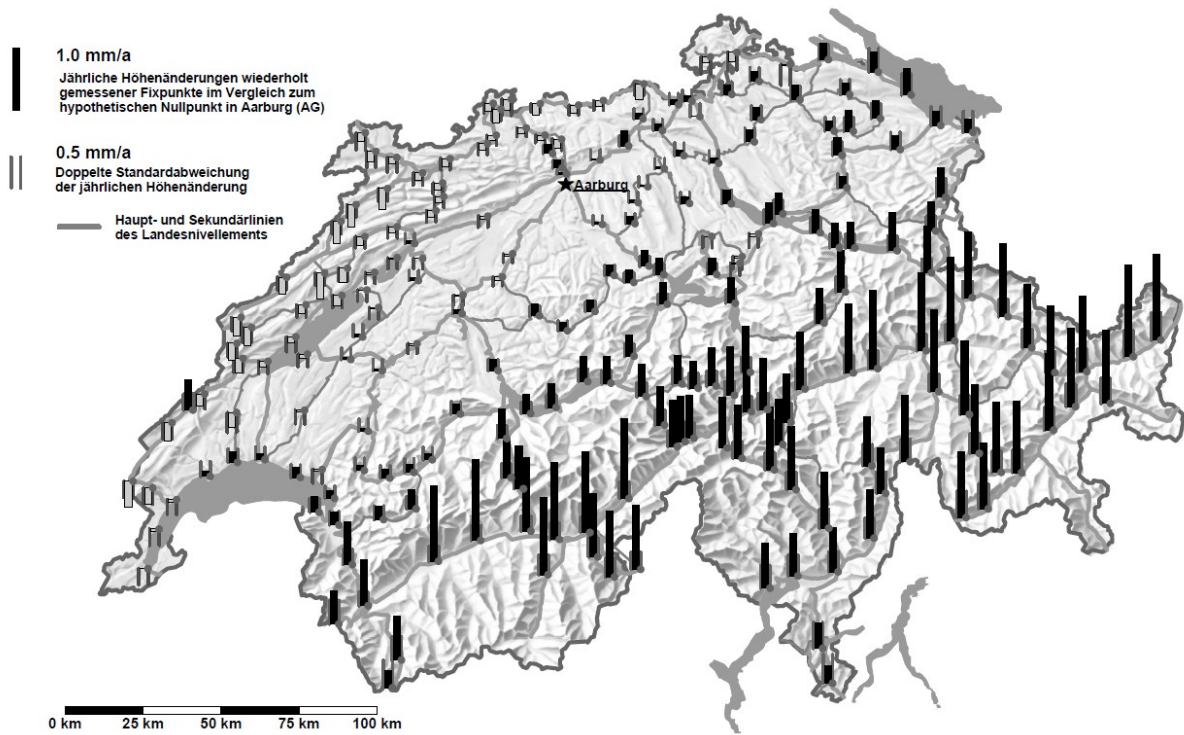


Figure 4-2 : Déplacements verticaux relatifs à Aarburg d'une sélection de points fixes du nivellement fédéral. Source : Schlatter (2007).



4.2.2. Méthode d'interpolation

Une importance capitale revient à la méthode d'interpolation des déplacements verticaux. Une interpolation est nécessaire afin de pouvoir prédire les déplacements verticaux entre les lignes de nivellement et les points fixes.

Plusieurs méthodes existent pour l'interpolation bi-dimensionnelle de données éparses (grille irrégulière). Quelques-unes sont :

- pondération inverse à la distance ;
- interpolation linéaire sur un réseau irrégulier de triangles ;
- interpolation non-linéaire sur un réseau irrégulier de triangles ;
- interpolation par fonctions de base radiale ;
- collocation par les moindres carrés.

L'interpolation par fonctions de base radiale présente l'inconvénient de retomber à zéro en l'absence d'observations. Or, ce n'est pas le cas du champ de vitesse de la croûte. Cette méthode semble donc inappropriée dans le cas présent. Les méthodes envisageables sont donc l'interpolation linéaire ou non-linéaire sur un réseau irrégulier de triangles, la pondération inverse de la distance ainsi que la collocation par les moindres carrés.

L'interpolation linéaire sur un réseau irrégulier de triangles a l'avantage d'être connue par les spécialistes de la géomatique en Suisse, car elle est à la base de la transformation FINELTRA, qui permet le passage de MN03 à MN95. De plus, cette transformation s'applique de façon très flexible à toute configuration de point et elle permet la densification locale sans influence sur les points hors du triangle concerné. L'inconvénient est la définition des triangles, qui est difficilement automatisable à cause des spécificités de la mensuration officielle.

Outre une interpolation sur une grille irrégulière, une interpolation bilinéaire sur une grille régulière est également envisageable, du moins pour la mise à disposition du champ de vitesse.

La décision finale pour l'algorithme d'interpolation sera prise lors de la mise en œuvre.



5. Modèles de géodonnées

Ce chapitre vise à proposer les adaptations nécessaires aux fichiers de référence INTERLIS et aux modèles de géodonnées minimaux suite à l'introduction du nouveau système altimétrique. Il propose également des recommandations pour adapter le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV.

Les fichiers de référence INTERLIS, qui traitent des systèmes de référence et des systèmes de coordonnées, sont détaillés dans l'annexe K du manuel de référence INTERLIS 2 eCH-0031. Il s'agit des fichiers suivants :

- *CoordSys.ili* (modèle de système de référence)
- *MiniCoordSysData.xtf* (fichier de description des systèmes de référence)

Les modèles doivent être ajustés pour refléter les définitions du nouveau système (voir section 2.2). Cela implique particulièrement l'association d'une coordonnée altimétrique à son cadre de référence⁹, ainsi que la capacité à prendre en compte la gestion des époques de mesure.

Il y a notamment lieu d'adapter le module de base de la Confédération pour les modèles de géodonnées minimaux qui décrit les géométries :

- *CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili*

⁹ En réalité, dans la modélisation INTERLIS, les altitudes se réfèrent à un système de coordonnées à axe unique, et l'on n'emploie pas directement les termes de système de référence ou de cadre de référence.



5.1. Définition du nouveau système de référence en INTERLIS 2

La modélisation du nouveau système altimétrique peut être réalisée en tant que nouvelle classe *GeoHeight*, conformément au modèle du système de référence *CoordSys* qui reste inchangé. Les attributs nécessaires pour définir cette classe *GeoHeight* comprennent le type de système altimétrique, l'altitude de référence ainsi que la description de cette dernière. Cette classe est associée à un ellipsoïde de référence, un géoïde, et à un modèle de gravité.

Ainsi, pour permettre d'associer une altitude à son cadre de référence, le fichier *MiniCoordSysData* doit être complété avec les descriptions nouvelles suivantes :

```
<GeoHeight ili:tid="BcoordSys.CHVRFxxxx">
  <ili:Name>SwissVerticalReferenceFramexxxx</ili:Name>
  <ili:Axis>
    <LengthAXIS>
      <ShortName>H</ShortName>
      <Description>Swiss Normal Altitude</Description>
    </LengthAXIS>
  </ili:Axis>
  <System>normal</System>
  <ReferenceHeight>0</ReferenceHeight>
  <ReferenceHeightDescr>XX reference points</ReferenceHeightDescr>
  <EllipsoidRef ili:ref="BcoordSys.GRS80"/>
  <GeoidRef ili:ref="BcoordSys.CH-QGeo-xxxx"/>
  <GravityRef ili:ref="BcoordSys.CH-SGrav-xxxx"/>
</GeoHeight>

<Ellipsoid ili:tid="BcoordSys.GRS80">
  <ili:Name>GRS80</ili:Name>
  <EllipsoidAlias>GRS 1980</EllipsoidAlias>
  <SemiMajorAxis>6378137</SemiMajorAxis>
  <InverseFlattening>298.2572221</InverseFlattening>
  <Remarks>Geodetic Reference System 1980</Remarks>
</Ellipsoid>

<GeoidModel ili:tid="BcoordSys.CH-QGeo-xxxx">
  <ili:Name>SwissQuasiGeoidxxxx</ili:Name>
  <Definition>See new Swiss Geoid swisstopo</Definition>
</GeoidModel>

<GravityModel ili:tid="BcoordSys.CH-SGrav-xxxx">
  <ili:Name>SwissGravityNetworkxxxx</ili:Name>
  <Definition>See documentation swisstopo Landesschwerenetz</Definition>
</GravityModel>
```

Figure 5-1 : Description de CHVRFxxxx (fichier MiniCoordSysData.txt).

Dès lors, pour les modèles INTERLIS entièrement nouveaux, l'altitude est modélisée comme suit :

```
REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFxxxx;

DOMAIN
Hoehe = COORD
-200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFxxxx[1]};
Hkoord = COORD
2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
-200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFxxxx[1]},
ROTATION 2 -> 1;
```

Figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRFxxxx



5.2. Adaptations du module de base de la Confédération

Afin d'adopter le nouveau système altimétrique, le module CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili¹⁰ doit être modifié.

Ce module comprend les trois modèles suivants :

- *Geometry_V2*
- *GeometryCHLV03_V2*
- *GeometryCHLV95_V2*

Il y a lieu de modifier les modèles *GeometryCHLV03_V2* et *GeometryCHLV95_V2* comme suit :

```
TYPE MODEL GeometryCHLV95_V2 (en)
AT "https://models.geo.admin.ch/CH/" VERSION "2021-10-19" =

IMPORTS Units;
IMPORTS CoordSys;
IMPORTS Geometry_V2;

REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
OBJECTS OF GeoCartesian2D: CHLV95
OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFxxxx;

DOMAIN
!!@CRS=EPSG:2056
Coord3 EXTENDS Geometry_V2.Coord3 = COORD
  2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
  1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
  -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFxxxx [1]},
ROTATION 2 -> 1;

!!@CRS=EPSG:2056
MultiPoint3D EXTENDS Geometry_V2.MultiPoint3D = MULTICOORD
  2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
  1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
  -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFxxxx [1]},
ROTATION 2 -> 1 ;
```

Figure 5-3 : Recommandation d'adaptation du module CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.

5.3. Recommandations pour la prise en compte de la cinématique

On peut identifier deux scénarios distincts en ce qui concerne la gestion des époques :

1. **Valeur de l'altitude sans indication d'époque** : Dans ce cas, l'altitude ne comporte pas d'information sur l'époque de mesure. On considère alors cette altitude comme une altitude officielle, soit à l'époque de référence du cadre.
2. **Valeur de l'altitude avec indication de l'époque** : L'altitude inclut une indication de l'époque de mesure. Dans cette situation, la valeur de l'altitude correspond à celle de l'époque de mesure. Pour obtenir une altitude officielle, soit à l'époque du cadre de référence, l'application du modèle cinématique est nécessaire.

Le groupe de travail recommande d'exprimer l'époque de mesure dans les modèles minimaux en année décimale.

¹⁰ https://models.geo.admin.ch/CH/CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili



La modélisation de l'époque de mesure peut être réalisée en créant un nouveau domaine pour l'époque de mesure, comme le présente l'exemple suivant :

```
DOMAIN
  Hoehe = COORD
    -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFxxxx[1]};
  Epoch = 1500.00 .. 2999.99;
```

5.4. Recommandations pour le modèle de géodonnées de la mensuration officielle DMAV

Aujourd'hui, les altitudes de la mensuration officielle sont modélisées simplement par une valeur et ne sont associées à aucun système de référence. Dans le modèle *DMAVTYM_Geometrie_V1_0.ili*, l'altitude est définie de la façon suivante :

```
DOMAIN
  Hoehe = -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m]
```

Le groupe de travail recommande pour la mensuration officielle :

- d'indiquer le cadre de référence dans la description du modèle (voir figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRF) ;
- de ne pas modéliser l'époque de mesure et de n'admettre que des coordonnées à l'époque de référence du cadre.



6. Concept de transformation des géodonnées existantes

Ce chapitre couvre les aspects des transformations altimétriques des géodonnées existantes entre le cadre de référence altimétrique officiellement en vigueur NF02, le cadre de référence altimétrique rigoureux RAN95 et le nouveau cadre de référence altimétrique CHVRFxxxx.

6.1. Algorithme de transformation

L'algorithme de transformation est présenté à la Figure 6-1. La partie centrale de l'algorithme est la transformation de RAN95 vers CHVRFxxxx. RAN95 est présumé suffisamment compatible avec CHVRFxxxx pour qu'une transformation mathématique directe soit possible avec une précision suffisante, validée par des points de contrôle en nombre suffisant. Cet aspect est à vérifier dans le cadre des « Proofs of Concept ».

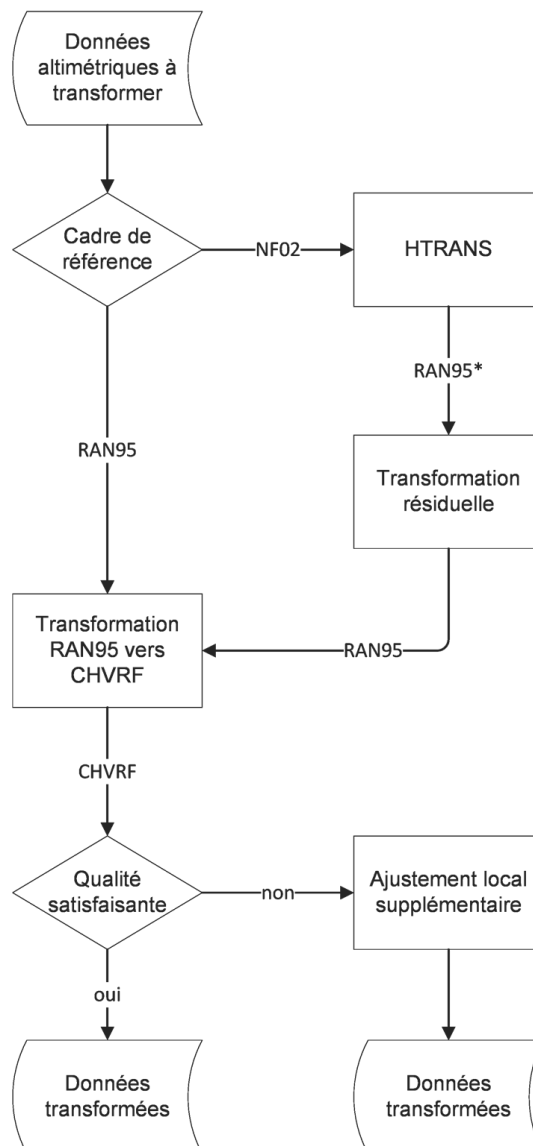


Figure 6-1 : Algorithme de transformation des altitudes. RAN95* désigne une approximation de RAN95 avant la transformation résiduelle.



Cependant, les géodonnées altimétriques dans le cadre NF02 ne peuvent pas être transformées directement par HTRANS vers CHVRFxxxx avec une précision suffisante. Dans ce cas, HTRANS doit être suivi d'une transformation résiduelle.

6.2. Transformation résiduelle

Afin de maintenir la précision altimétrique des géodonnées existantes dans le cadre de référence NF02, voire de l'améliorer, une transformation supplémentaire est nécessaire. En effet, HTRANS n'est pas défini hors des lignes fédérales de nivellement. Les imprécisions inhérentes à NF02 sont un autre facteur limitant. Les résidus sont une fonction des paramètres suivants :

- Type de mesure qui a conduit à l'altitude d'un point (RTK-GNSS, nivellement géométrique, nivellement trigonométrique)
- Cheminement de nivellement (pour les points nivelés)
- Altitude des points de rattachement
- Epoque de mesure

Ces facteurs ne sont en principe pas connus. Cependant, des résidus seront déterminés grâce à des mesures GNSS statiques effectuées sur des points adéquats, ayant une altitude NF02 connue. La Figure 6-2 présente le processus pour obtenir les résidus sur les points d'appui à la transformation (PAT).

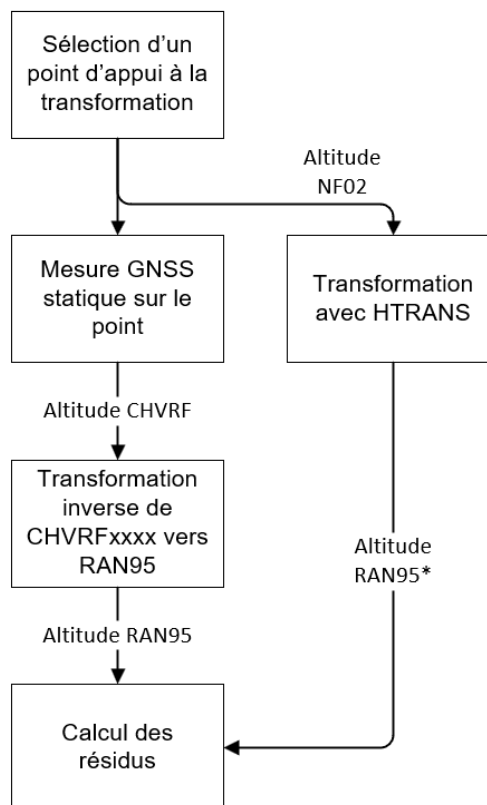


Figure 6-2 : Processus d'établissement des points d'appui à la transformation (PAT).

Une partie cruciale du travail consiste donc à identifier les PAT. Des PAT cantonaux et communaux viendront compléter la transformation, en fonction des besoins locaux et des résultats des transformations.

De plus, pour évaluer la qualité des transformations, des points de contrôle en nombre suffisant seront systématiquement déterminés et comparés avec les altitudes transformées.



6.2.1. Algorithme d'interpolation

La méthode d'interpolation est à définir lors de la réalisation de la transformation. Plusieurs algorithmes sont envisageables (liste non exhaustive) :

- Transformation par maillage triangulaire (même type que « FINELTRA », utilisée pour le passage de MN03 à MN95).
- Interpolation bilinéaire sur une grille régulière avec sous-grilles de plus haute densité.

6.3. Mise en œuvre

Afin de faciliter la mise en œuvre du nouveau système altimétrique officiel suisse des services de transformations facile d'utilisation et performants seront préalablement mis à disposition des utilisatrices, des utilisateurs et du public. Les gestionnaires de géodonnées seront responsables pour la mise en œuvre, c'est-à-dire la transformation de leurs géodonnées dans le nouveau cadre de référence altimétrique. Les géodonnées transformées devront respecter les conventions de notation décrites dans ce document.

6.3.1. « Proofs of Concept » avec les cantons

Dans le but de vérifier la mise en œuvre du concept de transformation des géodonnées existantes, environ quatre projets pilotes sur quelques communes et avec des géodonnées altimétriques de différents domaines d'activités seront réalisés en Suisse avec les cantons concernés et sous la conduite de swisstopo.

L'Office fédéral de topographie swisstopo lancera un appel à projets auprès des cantons afin de bien définir les conditions et objectifs du projet. Au terme de la réalisation des projets, chaque projet pilote fera l'objet d'un rapport et contribuera à consolider le concept de transformation et de mise en œuvre.





7. Conclusions et recommandations

Le présent document est un ensemble cohérent de définitions pour le nouveau système altimétrique suisse CHVRS. Il constitue la base des travaux ultérieurs et fait donc partie des bases de décision pour la suite des opérations.

Les altitudes CHVRS sont basées sur le calcul de cotes géopotentielles, elles sont de type normal et dans le système de marées « mean-tide ». Le système de référence géométrique pour le nouveau système altimétrique est CHTRS. L'ellipsoïde pour le calcul du champ de pesanteur normal est le GRS80. Afin de garantir la pérennité des cadres altimétriques dans le temps, les vitesses verticales des altitudes sont modélisées. Les altitudes officielles sont les altitudes du cadre de référence en vigueur à l'époque de référence du cadre. Au besoin, elles sont réduites à l'époque du cadre de référence à l'aide du modèle cinématique.

Le concept de réalisation du nouveau système altimétrique est principalement basé sur une compensation cinématique de différence de cotes géopotentielles provenant des mesures de nivellement du réseau altimétrique national, corrigées des effets de pesanteur. Le datum est fixé sur les altitudes de plusieurs points de référence.

Une transformation rigoureuse entre RAN95 et CHVRS sera calculée. Les points qui ne présentent pas d'altitude connue en RAN95 devront être transformés à l'aide d'une transformation résiduelle. Afin de calculer cette transformation, des mesures de densification par observations GNSS statiques sont indispensables. L'algorithme d'interpolation est à définir dans la phase de réalisation.

Les concepts de transformation et de mise en œuvre seront affinés dans le cadre de « Proofs of Concept » en collaboration avec quelques cantons.

Le groupe de travail recommande de poursuivre les travaux, en particulier :

1. Réalisation de « Proofs of Concept » afin de vérifier la mise en œuvre du concept de transformation des géodonnées existantes
2. Évaluation et tests de logiciels scientifiques, notamment pour le calcul du géoïde
3. Réalisation et adaptations des outils logiciels pour la transformation des altitudes de différentes géodonnées à caractère officiel avec estimation de la précision des altitudes transformées
4. Élaboration de plans détaillés de mise en œuvre et de communication
5. Établissement d'un plan de financement



Bibliographie

Heiskanen WA, Moritz H. (1967). Physical geodesy. San Francisco, WH Freeman.

Marti U. (1997). Geoid der Schweiz 1997. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.

Moritz H. (1980). Geodetic reference system 1980. Bulletin géodésique, 54, 395-405. doi: 10.1007/BF02521480.

Schlatter A. (2007). Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.





Liste des figures

Figure 4-1 : Statuts des mesures répétées de nivellement 1902 - 2023	25
Figure 4-2 : Déplacements verticaux relatifs à Aarburg d'une sélection de points fixes du nivellement fédéral. Source : Schlatter (2007).	25
Figure 5-1 : Description de CHVRFxxxx (fichier MiniCoordSysData.xtf).	28
Figure 5-2 : Modélisation d'une altitude CHVRFxxxx.....	28
Figure 5-3 : Recommandation d'adaptation du module CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.	29
Figure 6-1 : Algorithme de transformation des altitudes. RAN95* désigne une approximation de RAN95 avant la transformation résiduelle.	31
Figure 6-2 : Processus d'établissement des points d'appui à la transformation (PAT).....	32





Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Résumé des définitions du nouveau système altimétrique CHVRS.	14
Tableau 3-1 : Définition des deux cadres de référence altimétrique de la nouvelle mensuration de 1995, CHVRFyy et RAN95.	17





Glossaire

AGNES : *Automatisches GNSS Netz Schweiz* ; réseau de stations permanentes GNSS suisse.

AIG : Association Internationale de Géodésie (*IAG* en anglais).

Altitude : une altitude peut être de type normal, orthométrique, ellipsoïdal ou usuel.

Cadre de référence : ensemble des points et des résultats qui permettent de se repérer à l'aide de coordonnées sur terre ou dans l'espace.

Cadre de référence altimétrique : cadre de référence qui permet la détermination d'altitudes.

Cadre de référence planimétrique : cadre de référence qui permet la détermination de coordonnées planimétriques.

CH1903+ : Système de référence planimétrique officiel suisse.

CHTRS : *Swiss Terrestrial Reference System* ; Système de référence terrestre suisse.

CHVRFxxxx : *Swiss Vertical Reference Frame xxxx* (où xxxx est l'année du cadre). Il s'agit d'un cadre associé à CHVRS.

CHVRFyy : *Swiss Vertical Reference Frame yy* (où yy est l'année du cadre). Il s'agit d'une désignation pour le cadre de référence altimétrique associé aux altitudes globales dans le contexte du projet MN95. Cette appellation est obsolète.

CHVRS : *Swiss Vertical Reference System*. Le nouveau système altimétrique suisse.

Cinématique : qui présente une vitesse. Si les vitesses sont le résultat d'une modélisation physique, on parle alors de dynamique.

Commission géophysique suisse : une commission de l'académie suisse des sciences, qui était chargée, entre autres, de recueillir les données gravimétriques en Suisse.

Compensation cinématique : dans le contexte présent, il s'agit du calcul des altitudes en tenant compte des déplacements verticaux.

Cote géopotentielle : différence de potentiel entre le géoïde et le point en question. Il s'agit d'un type particulier d'altitude qui est à la base des altitudes rigoureuses.

Déviations de la verticale : angle formé entre l'aplomb local et la normale à l'ellipsoïde du lieu.

DMAV : *Datenmodell der Amtlichen Vermessung*. Le modèle de données de la mensuration officielle en Suisse.

ETRS89 : *European Terrestrial Reference System 1989* ; Système de référence européen.

EVRS : *European Vertical Reference System* ; Système de référence altimétrique européen.

Géodésie spatiale / géodésie satellitaire ou par satellite : terme générique qui englobe généralement tous les systèmes satellitaires pouvant être utilisés pour mesurer des positions, c'est-à-dire le GNSS, le VLBI, le SLR et DORIS.

GNSS : *Global Navigation Satellite System* ; désigne les principaux systèmes de navigation par satellite, soit le GPS (Etats-Unis d'Amérique), Galileo (Union européenne), GLONASS (Russie) et Beidou (Chine).

GRS80 : *Geodetic Reference System of 1980* ; Système et ellipsoïde de révolution de référence de 1980.

HTRANS : Transformation permettant de convertir des altitudes entre les cadres de référence NF02 et RAN95.

IHRS : *International Height Reference System* ; Système de référence altimétrique international.



InSAR : *Interferometric Synthetic Aperture Radar* ; technique de télédétection par satellites qui permet de détecter des changements millimétriques de la surface de la terre. En pratique, cette technique souffre de beaucoup de limitations et a donc, pour l'instant, un usage limité à certaines applications spécifiques.

INTERLIS : langage de modélisation des géodonnées utilisé en Suisse.

ITRS : *International Terrestrial Reference System* ; Système de référence international.

Mesures gravimétriques, également : mesures de pesanteur : mesures de la pesanteur terrestre à l'aide d'un gravimètre. Utile pour déterminer le géoïde et corriger le nivellement.

MN03 : cadre de référence planimétrique officiel suisse jusqu'en 2016.

MN95 : cadre de référence planimétrique officiel suisse depuis 2016.

Modèle de densité ou modèle de masses : modèle du sous-sol qui comprend l'information sur la géométrie mais aussi sur la densité des roches.

NF02 : Cadre de référence altimétrique officiel suisse ; basé sur la définition Repère Pierre du Niton (RPN) = 373,6 m de l'année 1902 ; réalisé par les mesures du nivellement national et les ouvrages de mensuration qui s'y rattachent.

PPP : *Precise Point Positioning* ; technique de mesures GNSS en temps réel, avec une précision décimétrique et le potentiel d'obtenir un positionnement centimétrique.

Proof of Concept : preuve de faisabilité, qui intervient avant un projet pilote.

RAN95 : Cadre de référence altimétrique orthométrique de la mensuration nationale, réalisé avec le projet MN95, basé sur les données du réseau altimétrique national.

REFRAME : service web de transformation de coordonnées de swisstopo, donnant accès aux transformations officielles suisses.

Résidu : différence entre une valeur mesurée et une valeur estimée.

RTK : *Real Time Kinematic* ; mesures GNSS cinématiques en temps réel avec une précision centimétrique.

Système de référence : ensemble des considérations théoriques qui permettent de réaliser un cadre de référence. On distingue les systèmes de référence altimétriques et planimétriques.

Système des marées : conventions utilisées pour le calcul des marées (luni-solaires) pour la réduction des observations qui entrent dans le calcul des altitudes.

Transformation résiduelle : transformation empirique qui vise à minimiser les différences entre les altitudes transformées et les altitudes mesurées.

UELN : *United European Levelling Network* ; Réseau européen unifié de nivellement.